

Проф. К. ТЕРЦАГИ.

# ИНЖЕНЕРНАЯ

# ГЕОЛОГИЯ



ГЕОРАЗВЕДИЗДАТ • 1932

ПРОФ. К. ТЕРЦАГИ

551.492

T-35

# ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМИ СТАТЬЯМИ

Г. АПФЕЛЬБЕК, К. ПРЕКЛИК,  
К. КЮН и К. ШАРРЕР

ПЕРЕВОД С НЕМЕЦКОГО ПРОФ. Н. Ф. ПОГРЕБОВА,  
ДОЦ. Г. В. ТРИНКЛЕРА и А. В. ЛЕРМОНТОВОЙ  
ПОД РЕДАКЦИЕЙ и С ПРЕДИСЛОВИЕМ ПРОФ.  
Н. В. БОБКОВА

488784

4p 4113

БИБЛИОТЕКА  
Геологического Ин-та  
Арт. Физ. Наук СССР



НКТП

ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ  
ГЕОЛОГО-РАЗВЕДОЧНОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО  
ЛЕНИНГРАД 1932 МОСКВА

Ответственный редактор *Н. В. Бобков.*

Сдана в набор 25/VIII 1932 г.

Формат 62 × 94.

Ленгорлит № 60254.

Георазведиздат № 335

Тираж 7150—24<sup>3</sup>/<sub>8</sub> л.

Техн. редактор *Р. А. Аромс.*

Подписана к печати 27/XII 1932 г.

Тип. зн. в 1 п. л. 55.440.

Заказ № 3447.



ОГЛАВЛЕНИЕ.

	Стр.
Предисловие проф. Н. В. Бобкова . . . . .	6
<b>Глава I. Грунтоведение (К. Терцаги. Кембридж, Массачузетс, САСШ)</b>	<b>11</b>
Описание свойств грунтов с технико-геологической точки зрения для строительно-технических целей . . . . .	—
1. Задачи геологической экспертизы для строительных целей. Геологический профиль, описание грунтов . . . . .	—
2. Арена и процесс образования грунтов. Выветривание, климатические грунтовые зоны, глубина и структура грунтов, выветривание, обогащение и отложение осадков проточными водами. Обогащение и перемещение грунтов воздушными течениями. . . . .	13
3. Главные типы грунтов оснований . . . . .	24
4. Свойства несцементированных, связанных или несвязанных сцеплением разновидностей грунтов. Постоянство объема и формы, величина зерен и коллоидальные составные части грунта, сцепление и внутреннее трение, сжимаемость и упругость . . . . .	27
5. Выражение свойств грунта цифровыми показателями. Цифровые показатели для грунтов, сущность характера глины и физическое значение чешуеобразных составных частей этих грунтов . . . . .	37
6. Выбор цифровых показателей для технических целей	59
7. Классификация несцементированных разновидностей грунтов для строительно-технических целей . . . . .	64
<b>Глава II. Горные обвалы и оползни (К. Терцаги. Кембридж, Массачузетс, САСШ)</b>	<b>68</b>
1. Движения земляных масс и распространение этого явления на земной поверхности . . . . .	—
2. Условия равновесия земляных масс . . . . .	70
3. Классификация движений земляных масс . . . . .	75
4. Процессы, вызывающие движения земляных масс и меры борьбы с ними. Изменение статических условий, гидростатическое боковое давление, разрыхление горных пород под действием перемены температуры, мороза и влажности. Соскальзывание, обвал неправильно-трещиноватых горных пород, оползни, происходящие по поверхностям скольжения, выдавливание мягких пластичных масс, скольжение раздробленных масс, оползни в глинах с включениями водоносных песков, оползни глинисто-щебнистых склонов. Типичные потоки пород (Setzungsfliessung); подземные песчаные потоки . . . . .	76
5. Ход оползневых процессов . . . . .	103
6. Описание некоторых специфических случаев. Движение берегов озер, оползни насыпей . . . . .	106
7. Проведение железнодорожных линий вдоль склонов и пересечение водоразделов . . . . .	110
<b>Глава III. Пределные нагрузки и явления оседания грунта (К. Терцаги. Кембридж, Массачузетс, САСШ)</b>	<b>112</b>
1. Механика оседания. Песок, однородная глина, глина с прослойками песка, оценка строительных свойств грунтов . . . . .	—

2. Главные типы строительных грунтов. Строительный грунт, преимущественно без сцепления (речные отложения, дельтовые образования, морские береговые отложения, ледниковые отложения). Пльвуны. Искусственное понижение грунтовой воды. Закладка фундамента в глинах (пойменные мелководные глины, глубоководные глины). Образование коры и консистенция глинистых отложений. Работы по закладке фундаментов в однородных глинах. Пресноводные глины с прослоями песка . . . . .	118
3. Региональный подход к геологии оснований Миоценовый морской залив, местами плейстоценовый галечник и лёсс (Вена). Древне-аллювиальные песчаные, современные отложения ила и торфа (Берлин). Затопленные долины с истыми наносами, флювио-гляциальные отложения (Нью-Йорк). Подводный холмистый (друмлинный) ландшафт ледниковых и современных пресноводных отложений (Бостон). Ледниковые пресноводные глины и морские береговые образования (Чикаго). Пойменные глины в области дельты (Нью-Орлеан). Мелкозернистые дельтовые образования (Шанхай). Обзор . . . . .	140
Глава IV. Геология оснований плотин (К. Терцаги. Кембридж, Массачузетс, САСШ) . . . . .	161
1. Выбор места постройки. . . . .	—
2. Свойства коренных пород основания. Гидрографическое и статическое значение трещиноватых пород. Исследование условий трещиноватости пород и искусственное заполнение трещин. Изменение условий устойчивости плотины с временем. Влияние свойств породы основания на устойчивость плотин . . . . .	163
3. Плотины, заложенные на коренных породах. Соседство сбросов. Коренные породы с почти горизонтальным залеганием. Неравномерно-трещиноватые породы. Основание плотин на известняках. Податливые породы основания . . . . .	178
4. Плотины, основанные на наносах. Механика прорыва основания. Влияние условий залегания грунта на вероятность прорыва основания. Примеры прорыва основания. Потери воды вследствие просачивания. Земляные плотины . . . . .	188
Глава V. Работы по закладке фундаментов на торфянистых грунтах (К. Терцаги. Кембридж, Массачузетс, САСШ) . . . . .	204
1. Классификация торфяных грунтов . . . . .	—
2. Дорожные и железнодорожные насыпи на торфяном грунте . . . . .	205
3. Проницаемость торфяников . . . . .	210
4. Закладка высоких зданий и мостов на торфяниках . . . . .	—
5. Искусственное уплотнение торфяников . . . . .	212
6. Действие болотной воды на бетон . . . . .	213
Глава VI. Геология грунтовых дорог (К. Терцаги. Кембридж, Массачузетс, САСШ) . . . . .	215
Опыт прежних лет и эмпирические свойства . . . . .	—
Опыт последнего времени и методы работ . . . . .	216
Глава VII. Геология туннелей (К. Терцаги. Кембридж, Массачузетс, САСШ) . . . . .	223
1. Сопротивление пород при выемке . . . . .	—
2. Давление пород на ствол туннеля. Сухие сыпучие породы. Пльвучие породы. Твердые однородные породы. Пластичные породы (проявления давления в глинах, цржав-	

	Стр.
ления давления в мергелистых пластах, проявления давления в выветрившихся или разложившихся породах) . . . . .	225
3. Давление горных пород на шахтную крепь . . . . .	250
4. Требования, предъявляемые к креплению напорных туннелей и шахт. Теория проблемы устройства напорного туннеля. Практика строительства напорных туннелей . . . . .	252
5. Обрушения крепи. Обрушения потолка вследствие вывала глыб из находящейся над ним толщи пород. Обрушения крепи при встрече пустот, заполненных обломками горных пород. Обрушения крепи при неожиданной встрече с плавучей породой. Обрушения крепи вследствие обвалов, происходящих в плавучих породах . . . . .	262
6. Напор подземных вод. Породы, несвязанные сцеплением. Твердые равномерно-трещиноватые породы. Приток воды из зон разлома при тектонических нарушениях. Водопроницаемость известняковых пород . . . . .	264
7. Газы . . . . .	271
8. Температуры . . . . .	272
9. Геологическая экспертиза . . . . .	273
<b>Глава VIII. Движения поверхности в связи с разработкой недр и влияние этих движений на сооружения, находящиеся на дневной поверхности (Г. Алфельбек. Фалькенау). . . . .</b>	<b>279</b>
<b>Глава IX. Технические исследования горных пород (К. Преклик. Прага). . . . .</b>	<b>302</b>
1. Общие методы исследований. Количественный минералогический состав, степень выветривания, структура. Крупность зерна. Объемный вес и объем пор. Водопоглощение, коэффициенты насыщения и водораспределение. Испытания окрашиванием. Испытания сопротивлений (на сжатие, растяжение, изгиб и скалывание), соотношение между этими сопротивлениями. Твердость и изнашивание. Предохранительные средства против выветривания. Размягчаемость. Морозостойкость (условия морозостойкости, теоретическое определение морозостойкости и экспериментальное). Погодостойкость (агенты выветривания). Условия погодостойкости пород. Методы испытания погодостойкости. Основные данные для оценки погодостойкости горных пород . . . . .	303
2. Оценка пород для строительных целей. Породы для надземных сооружений. Породы для инженерных сооружений. Породы для дорожного строительства. Присадочные бетонные материалы составления бетона. Точильные и жерновые камни, порошки для шлифовки. Литература. . . . .	345
3. Меры к охране каменных сооружений (К. Кюн. Прага). Влияние способов обработки и кладки камней на их погодостойкость. Мероприятия против выветривания. Предохранительные средства против выветривания. Литература. . . . .	364
<b>Глава X. Грунт как сельскохозяйственный фактор (К. Шаррер. Вейн-стефан. Мюнхен) . . . . .</b>	<b>372</b>
1. Подразделения и свойства почво-грунтов с сельскохозяйственной точки зрения. . . . .	—
2. Исследование почв для сельскохозяйственных целей. Взятие пробы, механический анализ, физическое исследование почвы, химическое и растительно-физиологическое испытание почвы, биологическое исследование почвы, минералого-петрографическое исследование почвы, оценка результатов исследования . . . . .	375

## ПРЕДИСЛОВИЕ.

Предлагаемый читателям курс инженерной геологии является переводом с немецкого языка ряда статей, принадлежащих перу различных авторов и составляющих в совокупности одно из лучших иностранных руководств в этой области „Ingenieurgeologie“ Prof. K. A. Redlich — Prof. K. Terzaghi — Priv. Doz. R. Kampe (Verlag von Julius Springer, Wien und Berlin, 1929).

Переведена лишь часть указанной книги, а именно те ее главы, которые касаются специальных вопросов инженерной геологии, всего менее разработанных в нашей научно-технической литературе. Статьи проф. К. Редлиха, проф. К. Преклика и прив.-доц. Р. Кампе по вопросам общей геологии, петрографии, минералогии, гидрогеологии и по исследованию различных месторождений полезных ископаемых не переведены главным образом потому, что по этим вопросам на русском языке имеется достаточное количество хороших руководств, и кроме того указанные статьи не имеют прямого отношения к инженерной геологии.

Перевод сделан по инициативе и на средства Центрального научно-исследовательского геолого-разведочного института Союзгеоразведки (ЦНИГРИ) его сотрудниками: ст. геологом проф. Горного института Н. Ф. Погребовым — глава II „Горные обвалы и оползни“, а остальные главы — доцентом Г. В. Тринклером и А. В. Лермонтовой под редакцией и при участии заведывающего кабинетом инженерной геологии ЦНИГРИ проф. Н. В. Бобкова.

Около  $\frac{3}{4}$  объема предлагаемого руководства (главы от I до VII включительно) составляют труд одного из самых крупных иностранных специалистов по инженерной геологии, проф. Кембриджского технологического института в САСШ К. Терцаги<sup>1</sup>, автора „Erdbaumechanik“, составившей, как известно, целую эпоху в области исследований грунтов как оснований под различного рода сооружения, и только оставшая, сравнительно небольшая, часть принадлежит перу других авторов: Г. Апфельбека (глава VIII), К. Преклика и К. Кюна (глава IX) и К. Шаррера (глава X).

Обращаясь к рассмотрению отдельных глав, надлежит отметить следующие достоинства и недостатки их содержания.

**Глава I. Грунтоведение.** В этой главе рассматриваются главнейшие физические и технические свойства различных несцементированных грунтов, относящихся к четвертичным отложениям,

<sup>1</sup> Ныне профессора Высшей технической школы в Вене.

причем автором устанавливается тесная связь между указанными свойствами грунтов и геологическими условиями их образования. Геологический подход к изучению физических свойств грунтов, служащих основанием для сооружений, является новым в технической литературе и особенно ценным, так как только при таком подходе можно правильно оценить строительные свойства грунтов и избежать многих ошибок.

Рассматривая физические и технические свойства различных грунтов, автор устанавливает главные константы, определяющие степень устойчивости грунтов в качестве оснований, и дает константам цифровое выражение, указывая в то же время методы исследований для их получения.

Недостатками этой главы являются излишняя конспективность изложения и отсутствие указаний на способы вычисления одних показателей на основании других, полученных путем простейших испытаний грунтов, что может несколько затруднить широкое использование на практике предлагаемых автором методов исследования грунтов и выявление их главных показателей<sup>1</sup>. К недостаткам этой главы следует отнести также отсутствие рассмотрения физических и технических свойств цементированных грунтов (коренных пород), что, казалось бы, должно относиться к предмету грунтоведения, так как тяжелые массивные сооружения часто требуют скального основания. Хотя автор и разбирает свойства этих пород в последующих главах (о плотинах и туннелях), но многие вопросы при этом остаются неосвещенными.

**Глава II. Горные обвалы и оползни.** В этой главе автор подходит к анализу оползневых процессов с физико-технической точки зрения, что представляет особенный интерес для русского читателя, так как у нас до сего времени имеются лишь отдельные статьи, преимущественно геологов, с подробным описанием оползневых движений в различных районах Союза, в которых дается анализ оползневых явлений только с точки зрения геологической или гидрогеологической. Вопрос же о физико-механических свойствах горных пород, участвующих в оползневых движениях, о значении этих свойств и их влиянии на весь ход оползневых процессов в русской литературе совершенно не затрагивался. Автор, наоборот, не уделяет достаточно внимания вопросам геологическим и гидрогеологическим и изучению связи между чисто геологическими явлениями и физико-механическими свойствами грунтов при оползневых движениях земляных масс.

**Глава III. Предельные нагрузки и явления оседания грунта.** Остановившись на механике оседания грунтов, вызываемого весом сооружений, и устанавливая соотношения между предельными нагрузками, нагружаемой поверхностью и осадкой, автор дает характеристику несущих свойств различных несцементированных грунтов с точки зрения геологических условий их образования с учетом влияния на эти свойства однородности, формы зерна и

<sup>1</sup> *Прим. ред.* К недостаткам этой главы относится также отсутствие рисунков приборов, при помощи которых производятся опыты различных испытаний грунтов.

водопроницаемости. Весьма интересной является теория автора об изменении с течением времени указанных свойств некоторых глинистых отложений в связи с изменением их консистенции и образований коры выветривания. Не менее интересна заключительная часть этой главы, в которой автор дает подробный анализ грунтовых условий в различных крупных населенных пунктах, как то Берлин, Нью-Йорк, Чикаго, Шанхай и др., отмечая каждый раз изменение этих условий в зависимости от геоморфологических и геологических особенностей данного района.

Расчетные данные по определению величины деформаций в различных грунтах, которые подробно разработаны автором в его основной капитальной работе „Erdbaumechanik“, в данной главе, так же как и в остальной части книги, к сожалению, почти совершенно отсутствуют, в то время как, казалось бы, в руководстве по инженерной геологии основные способы расчетов и соответствующие формулы должны быть помещены, чтобы дать возможность более широкому кругу специалистов произвести на практике цифровую оценку несущих свойств грунтов в районе проектируемых сооружений.

**Глава IV. Геология основания плотин.** Эта глава является также одной из основных глав данного руководства и представляет большой интерес. В ней автор дает анализ главнейших условий, от которых зависит устойчивость плотин, подробно разбирая физические и технические свойства различных коренных пород и наносов, служащих основанием, и отмечает изменение этих свойств с течением времени в зависимости от гидростатического напора и геологического строения района подпорных сооружений.

Далее, останавливаясь на механике прорыва основания, автор иллюстрирует многочисленными примерами обрушение плотин в различных странах, обусловленное теми или другими дефектами основания.

Приводя эти примеры, автор не всегда достаточно подробно разбирает условия и причины деформаций основания в каждом отдельном случае, что было бы весьма ценно для руководства по геологии оснований плотин.

Другим недостатком этой главы является отсутствие каких-либо расчетов устойчивости оснований, а также отсутствие указаний на способы подсчетов общих потерь воды на фильтрацию в районе плотин и водохранилищ.

**Глава V. Работы по заложению фундаментов на торфянистых грунтах.** **Глава VI. Геология грунтовых дорог.** В них автор кратко разбирает основные условия устойчивости сооружений на торфянистых грунтах и почвенные условия для проведения грунтовых дорог, останавливаясь главным образом на технических мероприятиях, связанных с подготовкой основания для сооружений. В конце последней главы приведена довольно обширная иностранная литература по грунтовым дорогам.

**Глава VII. Геология туннелей.** Этой главой заканчивается труд проф. К. Терцаги. В данной теме автор обращает особое внима-

ние на горное давление и сопутствующие ему в туннельном строительстве явления, разбирая наиболее известные теории, касающиеся горного давления.

Автор приходит к выводу, что предсказать заранее на основании теоретических подсчетов размеры горного давления в настоящее время возможно лишь для рыхлых пород и то только весьма ориентировочно; что же касается давления в связных и упругих породах (скальных), то в этих случаях автор советует пользоваться исключительно эмпирическими данными, получаемыми при проходке пробных штолен в процессе проведения туннелей, полагая, что для построения правильной теории горного давления для этих пород современный уровень наших знаний еще недостаточен.

Обстоятельно разобрана автором теория устойчивости гидротехнических напорных туннелей и напорных шахт, проводимых в различных геологических и гидрогеологических условиях. Менее подробно освещен вопрос о подземных водах и недостаточно внимания уделено автором температурным условиям и газам, имеющим большое значение в туннельном строительстве.

**Глава VIII. Движения поверхности в связи с разработкой недр и влияние этих движений на сооружения, находящиеся на дневной поверхности** (Г. Апфельбек). Эта глава тесно связана с предшествующей главой и представляет большой интерес для русского читателя особенно потому, что в нашей технической литературе этот весьма важный вопрос почти не разработан. Излагая основы механики оседания земной поверхности в связи с подземными горными разработками, автор останавливается на деформациях зданий, расположенных в различных частях мульды оседания, разбирает причины тех или других напряжений, возникающих в зданиях, и указывает технические мероприятия, благодаря которым эти деформации могут быть сведены к минимуму.

**Глава IX. Технические исследования горных пород** (К. Преклик). В начале главы автор разбирает самые методы технических исследований горных пород, как строительных материалов, и порядок отбора образцов для этих исследований. Затем автор дает оценку горным породам, предназначенным в качестве материалов для различных строительных целей. Большим достоинством настоящей главы является подход к оценке ископаемых строительных материалов не только с точки зрения их технических свойств, но и в зависимости от минералого-петрографического состава пород, структуры и влияния различных агентов выветривания. В конце главы приведена небольшая статья К. Кюна о мерах к охране различных каменных сооружений, способах обработки и кладки каменных строительных материалов в целях наилучшего сопротивления их выветриванию. К той и другой статье приложен обширный список иностранной литературы по этим вопросам.

**Глава X. Грунт как сельскохозяйственный фактор** (К. Шаррер). Эта глава касается вопросов почвоведения, причем автор

оценивает почво-грунты главным образом с точки зрения сельскохозяйственного их использования, одновременно указывая и главнейшие способы исследований. Хотя эта глава и не имеет прямого отношения к инженерной геологии, но тем не менее сведения, сообщаемые в ней, будут весьма полезны инженерам-геологам, работающим в области сельскохозяйственной гидротехники и ирригации, а также специалистам по дорожному строительству.

Резюмируя все сказанное, следует признать, что несмотря на некоторые недостатки, отмеченные выше, выпускаемое в печать руководство по инженерной геологии является крупным и весьма ценным вкладом в научно-техническую литературу. Выпуск этого руководства является вполне своевременным в условиях развертывающегося социалистического строительства, предъявляющего все большие и большие требования к инженерной геологии. Помимо удовлетворения этих чисто практических требований данное руководство может служить также основным пособием при прохождении курса инженерной геологии студентами различных технических и геолого-разведочных вузов.

Ленинград.  
5/V 1932 г.

Проф. Н. В. Бобков.

## ОПИСАНИЕ СВОЙСТВ ГРУНТОВ С ТЕХНИКО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ЦЕЛЕЙ.

### 1. ЗАДАЧИ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ ЦЕЛЕЙ.

Инженер требует от геолога разъяснения условий залегания, мощности и характера составляющих подпочву горных пород, с целью вывести из сообщенных геологом данных заключение о важных в строительном отношении особенностях данного района.

Настоящая глава посвящена разъяснению вопроса о том, поскольку эти данные, при современном состоянии науки, отвечают целям инженера.

**Геологический профиль.** Результаты геологической съемки выражаются в форме геологической карты. Эта карта является результатом более или менее непосредственного наблюдения. Она представляет собой выявленную эмпирическим путем картину доступного наблюдению фактического материала.

В противоположность этому геологический профиль не есть картина наблюденной действительности, а некоторое построение, сделанное на основании геологической карты при помощи известных теоретических представлений. Правдоподобность его поэтому в значительной мере зависит от степени закономерности, господствующей в характере изображаемой местности, и от ясности, с которой нами схвачена сущность этой закономерности (строение складок, направление сбросов, и т. д.). В тех случаях, когда в местностях с неправильным залеганием пластов (при линзообразном или гнездовом залегании пород) или глубоко проникающими тектоническими нарушениями (*Zerrüttungen*) отдельные детали ускользают от каких бы то ни было априорных предположений, правдоподобный в техническом отношении геологический профиль может быть изображен только на основании пробных буровых скважин.

Но и в том случае, когда надежный геологический профиль уже составлен, задача экспертизы еще не может считаться разрешенной, так как дело сводится кроме того к тому, чтобы осветить собранный геологический материал с точки зрения глубинно-строительной техники.

Достижение успеха в этой особой области инженерной геологии возможно лишь при условии систематического сбора данных, выявляющих влияние различных элементов тектоники и характера пород на ход технических работ. Так, например, задача региональной геологии может считаться выполненной, как только установлены наличие сброса и характер находящихся с обеих его сторон массивов. Но

с технической точки зрения наличие сброса может или не иметь никакого значения, или представлять существенную важность, в зависимости от того, является ли сброс только плоскостью скольжения, или же зоной интенсивного нарушения, сухой он, или содержит воду, и, наконец, от того, какого рода сооружение в данном случае проектируется. До настоящего времени мы не располагаем еще статистической сводкой опытных данных, полученных при встрече или пересечении сбросовых трещин в местностях с различным тектоническим и петрографическим характером. Поэтому сейчас еще затруднительно, в каком-либо определенном случае, составить себе картину предельных значений, которые могут иметь свойства сброса, его водоносность и ширина нарушенной зоны. Такие и подобные им сопоставления могли бы привести к открытию закономерностей, до сего времени нам еще неизвестных.

**Описание грунтов.** Описание пород или грунтов представляется технически удовлетворительным в том случае, если одноименность каких-нибудь двух пород определяет в то же время и их техническую равноценность. В современных методах описания необходимо отличать материалы цементированные от нецементированных.

В отношении цементированных материалов петрографический метод описания горных пород стоит довольно высоко. На основании результата оптического исследования горной породы инженер может быть осведомлен относительно структуры последней, величины, формы и степени разложения ее отдельных минералов — компонентов. Петрографическая тождественность двух пород, правда, ни в коем случае не обуславливает их технической равноценности, но недостающие данные могут быть пополнены путем опытов. Во всяком случае, поскольку налицо имеется образец горной породы, геолог всегда имеет возможность дать инженеру довольно обстоятельное разъяснение относительно природы ее.

В противоположность этому обычный способ петрографического описания нецементированных, связанных или (*kohärenter* oder *kohäsionsloser*) не связанных сцеплением пород, представляет едва ли большую ценность, чем характеристика этих материалов, даваемая опытными буровым мастером. Вследствие этого характеристика проб, получаемых при бурении нецементированных отложений, обычно и дается буровым мастером. Последний дает образцам названия, основываясь на своем опыте, после произведенного предварительно осмотра и ощупывания материала.

Экспертизы грунтов, производившиеся как геологом, так и буровым мастером, неоднократно приводили к ошибкам, чреватых тяжелыми последствиями. Поэтому важнейшей и настоятельной задачей инженерной геологии в настоящее время является выработка метода классификации нецементированных отложений, не зависящего от усмотрения наблюдателя и отвечающего потребностям технической практики. При современных условиях инженеры не в состоянии еще согласовать результаты своего опыта с данными геолога и бурового мастера, вследствие чего эта область глубинного строительства является наиболее отсталой главой технической науки.

Среди объединений, занятых разрешением этой в высшей степени важной проблемы, можно назвать следующие: С.-А. Бюро общественных путей, Вашингтон, Почвенный комитет американ-

ского об-ва гражданских инженеров, Нью-Йорк, Геотехнические комиссии Швеции и Финляндии и Норвежский геологический государственный институт.

Будущее значение инженерной геологии, как вспомогательной науки для инженера по глубинному строительству, в первую очередь зависит от успеха исканий в области классификации несцементированных разновидностей грунтов. Прежде, однако, чем входить в рассмотрение основ и сущности этих исканий, необходимо сделать некоторые предварительные замечания по поводу мест, служащих ареной осуществления технических сооружений грунтового строительства.

## 2. АРЕНА И ПРОЦЕСС ОБРАЗОВАНИЯ ГРУНТОВ.

Верхний слой земной коры, на котором и внутри которого производится большая часть строительно-технических работ, отнюдь не представляет собой чего-либо вечного, не изменяющегося; напротив, он находится в состоянии непрерывного изменения и является ареной действия активных или скрытых сил, которые при нарушении его целостности часто проявляют себя самым неожиданным образом. Поэтому для правильной оценки возможных последствий искусственных вскрытий земной коры необходимо быть до известной степени знакомым с теми изменениями, которые и без нашего вмешательства уже происходят по соседству с земной поверхностью. Они заключаются главным образом в постепенном разрушении горных пород, в более или менее значительных превращениях продуктов разрушения и перемещении последних.

**Выветривание.** Большинство элементов земной коры, обозначаемых термином „горные породы“, приобрели свой петрографический характер в условиях температуры и давления, значительно отличающихся от существующих на поверхности земли. Петрографический характер породы представляет собой некоторым образом состояние равновесия между химическим составом горной породы и физическими условиями ее существования. Пока физические условия не изменяются, горная порода в известном смысле „мертва“, так как она не изменяется. Но как только такая порода вскрывается, причем поверхность разреза приводится в соприкосновение с атмосферой и дождевой водой и подвергается периодическим изменениям температуры, то она снова „оживает“ и путем ряда механических и физических изменений своего состояния стремится к новому состоянию равновесия. Этот процесс носит название „выветривания“ и состоит главным образом в механическом измельчении, химическом превращении и растворении.

**Механическое разрушение горной породы** вызывается главным образом изменением температуры и действием мороза. К этому присоединяются еще механические явления, которые сопровождают химические процессы, происходящие в области поверхностей раздела (поверхности пластов, плоскости кливажа, диаклазы и пр.), а в местностях, покрытых растительностью, еще и разрыхляющее действие корней растений. Механическое действие при данной разности температур тем сильнее, чем быстрее наступает изменение температуры, так как интенсивность термических напряжений зависит

только от скорости изменения температуры, а не от величин ее конечных значений.

*Химическое выветривание* является результатом химического взаимодействия между минералами, образовавшимися без доступа воздуха при высоком давлении, и атмосферными агентами. Оно состоит главным образом в присоединении химической воды и окислении. Еще 25 лет тому назад химическое выветривание приписывалось главным образом действию кислот, содержащихся в просачивающихся водах. С тех пор однако пришли к заключению (А. Д. Кушман и П. Хуббард), что подавляющее большинство реакций выветривания вызывается нахождением воды, отчасти в состоянии диссоциации, т. е., что эти реакции происходят путем гидролиза. Разложившиеся гидролизом силикаты образуют с содержащимися в просачивающихся водах кислотами ( $\text{CO}_2$  и др.) и основаниями легко растворимые соли, а нерастворимые составные части остаются на месте в форме „элювиального грунта“. В связи с увеличением степени диссоциации воды с повышением температуры, значение химического выветривания для различных местностей возрастает в направлении от арктических стран к экваториальным. При температурах, лежащих ниже  $0^\circ$ , химическое выветривание более не происходит.

При одинаковых климатических условиях химическое выветривание, в общем, тем интенсивнее, чем значительнее разница между физическими условиями, существующими на земной поверхности, и теми, в которых сформировался петрографический характер горной породы. Как типичных представителей горных пород с различной степенью подверженности химическому выветриванию можно назвать: сланцы, мергели, глины (наиболее выветриваемые) и кварцевые пески (наименее выветриваемые).

Одно из наиболее важных свойств реакций химического выветривания состоит в том, что продукты выветривания большинства породообразующих минералов образуются в коллоидальной форме, т. е. в столь тонко измельченном состоянии, при котором величина зерен достигает размеров менее одной тысячной доли миллиметра. Это обстоятельство придает остаточным продуктам выветривания их характерный отпечаток. Необходимо однако теперь же отметить, что коренного отличия между „грунтовыми коллоидами“ и более грубыми элементами горных пород повидимому не существует. Вследствие неправильного понимания этого факта еще и по настоящее время некоторые свойства грунтов приписываются недостаточно точно определенному „действию коллоидации“, чем отвлекается внимание от истинных, обычно гораздо менее таинственных, физических причин.

Растворение является важнейшим грунтообразующим фактором, главным образом в известковых породах, но имеет существенное значение также и при выветривании других пород, например, гранита.

*Селекционное выветривание.* При одинаковой экспозиции<sup>1</sup>, т. е. при одинаковых климатических условиях и одинаковых уклонах местности, характер грунта и глубина распространения выветри-

<sup>1</sup> W. Penck. Die morphologische Analyse, S. 29. Stuttgart, Engelhorn's Nachf., 1924.

вания зависят от характера горной породы и степени трещиноватости ее. Это явление особенно бросается в глаза, когда приходится вскрывать отложения известняков или глинистых сланцев, пересеченные эруптивными жилами. Несмотря на то, что эруптивная порода в свежем состоянии значительно тверже известняков и сланцев, нередко оказывается возможным выбирать ее киркой и лопатой до глубины 10—15 м, между тем как смежную с ней породу, не глубже 1—2 м, приходится добывать взрывными работами.

**Климатические грунтовые зоны.** Свойства продуктов выветривания, между прочим, зависят от соотношения между интенсивностью различных факторов (изменение температуры, мороз, гидролиз, действие  $\text{CO}_2$  и гумусовых кислот и пр.), обуславливающих явления выветривания. Поскольку это соотношение, по крайней мере в главных чертах, устанавливается климатом, последний отражается и на свойствах выветрившихся грунтов. На эту зависимость было впервые указано Е. В. Гильгардом — для Сев. Америки (1893), затем К. Глинкой — для России, Е. Раманном — для Европы и, наконец, Р. Лангом — для всей земной поверхности.

Для разграничения климатических областей решающим критерием в отношении морфологии грунтов является участие, претерпеваемая выпадающими в данной области дождевыми и снеговыми водами. В зависимости от этого В. Пенк различает три главные группы стран.

а) страны с сырым (humid) климатом, в которых осадков выпадает больше, чем их испаряется, причем избыток их отводится реками;

в) страны с холодным (nival) климатом, в которых снега выпадает больше, чем таивает, причем нарастающий избыток снега отводится ледяными потоками (глетчерами);

с) страны с жарким (arid) климатом, в которых все количество выпадающих осадков испаряется полностью, вследствие чего здесь отсутствуют постоянные проточные воды.

В. Пенк характеризует зависимость вторичных грунтов от климата следующим образом<sup>1</sup>: „От экватора до Северного полюса образуются скопления обогащенного материала, которые обладают наибольшей возможной для них подвижностью, соответствующей их природе и тем климатическим условиям, при которых они образовались. В каждой климатической области имеется наличие оптимальных условий подвижности вторичных грунтов. Продукты химического выветривания, отличающиеся большой подвижностью в сыром виде и связанно-неподвижные в сухом состоянии, образуются именно там, где в течении года имеется в наличии обильная влажность; продукты механического выветривания, обладающие наибольшей подвижностью в совершенно сухом или же сильно смоченном состоянии, развиваются именно там, где имеются в наличии наиболее благоприятствующие этому обстоятельства“.

В связи с этой своеобразной основной чертой, являющейся в морфологическом отношении одним из наиболее важных фактов, мы имеем дело с различного рода грунтами, которые характери-

<sup>1</sup> W. Penck, L. c., S. 50.

зуют отдельные климатические области и называются климатическими грунтовыми зонами. Если принять во внимание лишь конечные продукты обогащения, образующиеся в наиболее благоприятных условиях в какой-либо климатической области и существование коих, согласно Р. Ланга, поддается цифровому определению в единицах выпадающих атмосферных осадков, то грунтовые зоны, в направлении от полюса к экватору, следуют в таком порядке:

Мерзлые грунты механического распада, сохранившие цвет коренной породы . . .	холодная зона (полярная зона).
Черный сырцевый гумус . . . . .	{ субполярная переходная область (крайне сырая область).
Чернозем (темноокрашенный желтозем) . .	{ умеренно-полновлажная область.
Бурозем (темноокрашенный желтозем) . . .	переход.
Краснозем . . . . .	полусырая область.
Желто-серые степные грунты (материал, разрушенный инсоляцией) . . . . .	{ полужаркая область.
Тот же материал, сохранивший цвет коренной породы . . . . .	{ жаркая область.
Красный латерит . . . . .	{ полувлажнотропическая область.
Краснозем . . . . .	переход.
Бурозем (темноокрашенный желтозем) . .	{ тропическая полновлажная область.
Чернозем . . . . .	{ тропическая крайне влажная область.
Гумус . . . . .	{ тропическая крайне влажная область.

Е. Рамман подразделяет почво-грунты Европы на три группы:

1. Южноевропейская зона красных земель (Roterden) более сухих областей (terra rossa) и желтых земель (Gelberden) более сырых стран.

2. Среднеевропейская зона бурых земель (Braunerden), представленных глинистыми и суглинистыми грунтами, окрашенными в бурый цвет гидратом окиси железа, образовавшимся при выветривании углекислых соединений. При более высокой температуре в сухих местностях образуются каштаново-бурые грунты, а в более сырых странах — черноземы южной России.

3. Североевропейская зона серых земель (Grauerden) — сильно выщелоченные грунты, осветленные вследствие удаления из них железистых соединений (рис. 1).

„Цвет грунта является его характерным отличительным признаком; так, например, в областях переходного типа окраска его заметно меняется в зависимости от времен года, если в течении последнего местность переживает разнообразные климатические состояния; в связи с этим в порядке наложения различно окрашенных грунтов можно усмотреть признак наступавших климатических изменений, что особенно заметно проявляется именно в областях переходного типа“.

Для инженера представляет особенную важность то обстоятельство, что климат стран, имеющих реки и потоки, отражается также и на общем характере образующихся отложений.

**Глубина и структура грунтов выветривания.** Если сделать разрез через выветрившийся грунт, то станет заметно, что послед-

ний состоит из нескольких различных по цвету и составу слоев, более, или менее резко отделенных друг от друга. В почвоведении эти слои называются А-, В- и С-горизонтами и характеризуются следующим образом:

А-горизонт. Верхний почвенный слой, который сильно выщелочен дождевыми водами (top soil, грунт выщелачивания). В-горизонт. Средний почвенный слой, в котором отложилась часть вымытых из А-горизонта составных частей грунта (sub soil, грунт

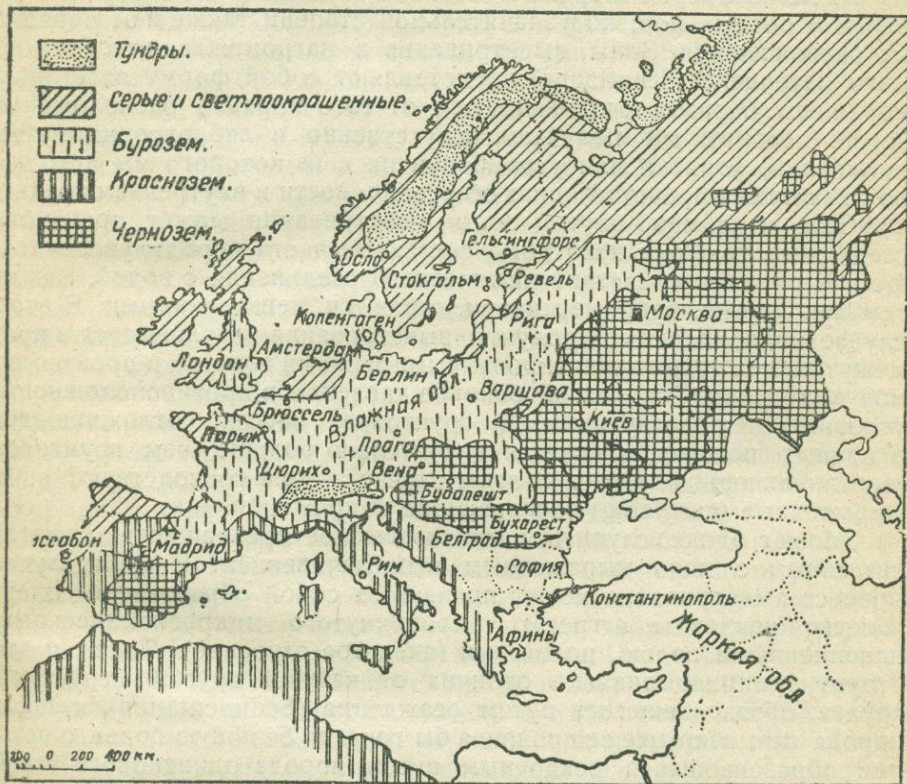


Рис. 1. Почвенная карта Европы (по Раманну).

обогащения). С-горизонт. Материал, из которого произошли В- и А-горизонты. В большинстве случаев верхняя часть С-горизонта уже претерпела известную степень механического разрыхления и химического изменения.

Важные в техническом отношении свойства А- и В-горизонтов имеют значение главным образом в деле дорожного строительства. Нас здесь интересует преимущественно С-горизонт и находящаяся под ним невыветрившаяся горная порода.

В то время как общая мощность А- и В-горизонтов достигает самое большее 1,5—2 м, нижняя граница механического и химического изменений материнской горной породы может простирается до значительной глубины. Глубина ее залегания зависит не только от „экспозиции“ и свойств породы, но также и от степени трещино-

Геологического Ин-та  
Алм. Фил. Наук. ССР

ватости ее, и в зонах тектонических нарушений изменение грунта нередко простирается в глубину неравномерными отросткообразными участками.

В техническом отношении особое значение имеет порядок расположения отдельных зерен породы в В- и С-горизонтах, обстоятельство, которое до настоящего времени еще не было оценено по достоинству.

Дело в том, что устойчивость и внутреннее трение состоящего из отдельных зерен агрегата зависят не только от свойства этих зерен и объема пор, но в значительной степени также и от порядка их расположения. Зоны выветривания и нагромождения обломочного материала (Schuttzone) представляют собой форму залегания, коренным образом отличающуюся от того порядка расположения зерен, который мы получаем искусственно в лаборатории путем насыпания, утряски или утрамбовки их и из которого мы исходим во всех наших представлениях об устойчивости и внутреннем трении.

Так, например, внутри зоны выветривания может произойти следующее явление: некоторые составные части породы увеличиваются в объеме вследствие химического соединения с водой, между тем как другие, например кварц, остаются неизменными. В этом случае коллоидальные продукты выветривания вдавливаются в промежутки между несцементированными зёрнами породы, и производимое выветрившейся массой боковое давление, в противоположность условиям, существующим в грунтовых массах, отложившихся в водных потоках, окажется значительно больше, чем грунтовое (вертикальное) давление. В этом случае в зоне господствуют явно выраженные (ausgiebig) распирающие напряжения.

Может однако случиться, что химическое превращение окажется связанным с явно выраженным выщелачиванием. В этом случае процесс выветривания может повлечь за собой образование содержащего коллоиды агрегата, проникнутого микроскопическими, наполненными водою, полостями (ячеистое строение). Также и эта структура принципиально отлична от каждой другой структуры грунта, образовавшегося путем осаждения (Sedimentation), и такая порода при вскрыше ее проявила бы гораздо большую подвижность, чем образовавшаяся осадочным путем порода одинакового с ней химического и физического состава.

Возможно себе, наконец, представить случай, когда связанная с значительным увеличением объема реакция выветривания распространяется в направлении от диаклазов, так что при этом образуется сетчатая основа выветрившейся породы, заключающая в себе неразложившиеся зерна последней. В этом случае зерна породы вытесняются процессом выветривания из своего первоначального положения и образуют скопление материала, заключающего в себе микроскопические полости и проявляющего при боковой вскрыше весьма незначительную устойчивость.

Эти замечания имеют единственной целью указать на возможность различных физических изменений. Положительные исходные данные для суждения о структуре выветрившихся пород могут быть получены только путем систематического сравнительного изучения этой структуры; между тем повидимому до настоящего времени еще не выработана даже техника производства подобных

исследований. Результаты их имели бы большую ценность как для геоморфолога, так и для инженера.

В основе „оползающих“ грунтов также лежат условия структуры их, статические особенности которой почти еще неизвестны. Новейшие морфологические исследования с очевидностью выявили, что рыхлый слой (Schutthorizont) вместе с налегающим на него грунтом, даже в слабо наклонных местностях, медленно, но неукоснительно сползает в долину. Перекатное движение (Wälzbewegung), которое можно сравнить с продвижением глетчера, не только влечет за собой окатывание обломков породы и перемешивание их в вертикальном направлении (перемешивающее движение, Mischbewegung), наблюдаемое в отношении всех без исключения рыхлых масс, но также и механическое сглаживание подстилающего грунта. По этому поводу В. Пенк<sup>1</sup> сообщает нижеследующее относительно своих наблюдений, произведенных им в Гарце и Фихтельгебирге, в районе распространения гранитных и диоритовых массивов: „Всегда можно наблюдать, что над сцементированными крепкими трещиноватыми породами располагается измеряемая метрами зона (в Луизенбурге, Фихтельгебирге мощностью в 10 м), представляющая собой сильно химически разрушенный продукт выветривания, в который включены округленные глыбы крепкой породы. Структура здесь повсеместно сохранилась в нетронутom виде: как отдельные глыбы, так и разложившее промежуточное вещество — в Фихтельгебирге суглинистый конечный продукт, в граните — более или менее суглинистый мелко искрошенный щебень (Grus) — сохраняют еще в неизменном виде первоначальную природную связь. В следующей вышележащей зоне в Луизенбурге мощностью 3—5 м этого уже больше не наблюдается. По потере породой своей структуры, по размельчению обогащенного суглинком гранитного щебня и по положению надвинутых друг на друга отдельных глыб здесь видно, что эта зона является зоной движения и полного перераспределения материала. Некоторые оставшиеся еще на месте глыбы внедряются снизу в зону движения, в остальном же нижняя поверхность последней имеет резко неправильные очертания с многочисленными карманами подобно дну русла реки“.

Подобное же наблюдение, произведенное им у Флэ (Теплиц-Шенау, Богемия), приводит К. Редлих<sup>2</sup>: „У плоского гребня Ердгебирге граниты разложены на значительную глубину; несмотря на это, кора выветривания, вследствие незначительной крутизны северного склона, могла проявить лишь очень слабое поступательное движение, причем это движение, не сопровождаясь процессом обогащения, имело лишь слабые перемещения слоев; вследствие этого образовался плотный слой глинистого щебня с включенными в него крупными глыбами гранита, представляющий собой инертное отложение водных потоков склонов. То обстоятельство, что на глубине нескольких метров вследствие более сильного стока вод, вероятно во время ледникового периода, имело место отложение крупного щебня, привело к образованию здесь промежуточного сильно пори-

<sup>1</sup> W. Penck. Die morphologische Analyse, S. 56. Stuttgart; Engelhorn's Nachf., 1924.

<sup>2</sup> K. A. Redlich. Das Wasserleitungsprojekt für Teplitz-Schönau und Umgebung. Mitt. d. Hauptver. Deutsch. Ing. i d. C. S. R., S. 223. Brünn, 1925.

стого, а потому и водообильного грунтового слоя, на который в более поздний маловодный период надвинулся упомянутый плотный щебень с валунными включениями."

Под влиянием чисто механических причин зерна пород приводятся в положение, которое ни в каком отношении не может быть сравнимо с положением зерен породы, достигаемым искусственной насыпкой и последующей укаткой их. Зерна под влиянием действия одной лишь силы тяжести находятся в неустойчивом более или менее подвижном положении, и столь непонятная подвижность рыхлого покрова может быть в значительной степени объяснена этой особенной формой их расположения. Тот же самый рыхлый слой (Schutt), который на плоских склонах после ливней „течет“, может оказаться совершенно устойчивым в качестве материала для насыпки плотин, несмотря на свою постоянную пропитанность и частичную насыщенность водою.

**Обогащение и отложение осадков проточными водами.** Покрытые „движущимся щебнем“ склоны являются областью питания широких потоков щебня, которые заполняют более глубокие части долин и доставляют проточным водам осадочный материал. Этот основной факт был так поздно постигнут потому, что склоны с находящимся на них лесным и травяным покровом производят впечатление чего-то застывшего, неподвижного. Оседающий материал предварительно сортируется по крупности зерна и отлагается затем как в речных областях, так и в бассейнах озер и в море. Законы этого процесса составляют предмет одной из новейших отраслей геологии — геологии осадочных пород.

Материалы, отложившиеся в руслах рек при понижении уровня вод, всегда отличаются довольно смешанным составом зерна (стр. 119). То же самое наблюдается и в отношении тонкозернистых осадков, образовавшихся в богатых электролитами водовместилищах (озера, принимающие в себя воды из известняковых гор, и океаны), потому что в них более грубые частицы осаждаются вместе с теми составными частями грунта, которые извлекаются из последнего в виде хлопьев действием электролитов. В противоположность этому в озерах с водами, содержащими малые количества электролитов, имеет место довольно чистое разделение осаждающегося материала по крупности его зерна. В отложениях дельт обычно наблюдается уменьшение крупности зерна по направлению сверху вниз. Однако, вследствие постоянного изменения положения русла потоков, крупность зерна даже в горизонтальном направлении колеблется в значительных пределах, так что более или менее однородные отложения встречаются лишь местами и в виде исключения (стр. 122).

Важные в техническом отношении свойства отложений зависят, однако, не только от качества материала, но в значительной степени также и от плотности отложения; она в свою очередь зависит от быстроты осадения (пески), а также от того, отлагаются ли осадки во впадине озера, речном протоке или областях периодического затопления (глины). Глина, осевшая под водой и постоянно под ней оставшаяся, мягка. Но если та же глина один раз в течение своей геологической истории подверглась временному уплотнению, например, вследствие высыхания на поверхности или давления

отложившегося на ней впоследствии нового слоя, то она лишь отчасти снова увеличивается в объеме и сохраняет значительную часть своего сцепления. Факт этот находит себе подтверждение во многих взятых из природы примерах (см. „Закладка фундаментов в глинах“, стр. 129).

Подобное временное уплотнение путем высыхания претерпевают, например, глинистые пласты, отложившиеся в районах, подверженных затоплениям. Вследствие этого глины речных областей очень компактны; они могут, однако, заключать в себе линзы глин однообразного состава, которые находятся в мягком состоянии и выжимаются наружу, как только их обнажат разрезом. Эти мягкие включения представляют собой отложения глин в мертвых пространствах постоянно заполненных водой впадин и речных рукавов.

В отношении своей плотности и сложения наименее поддаются определению гляциальные и постгляциальные отложения.

Некоторые исследователи настоятельно подчеркивают влияние электролитов на консистенцию и физические свойства глин, отложившихся в тех или других водоемах. Содержание электролитов действительно в известных пределах может влиять на степень однородности зерна глинистых отложений (степень смешения зерен) и на консистенцию верхнего глинистого слоя. Но физические свойства более глубоко залегающих глинистых слоев, имеющих значение для устройства фундаментов, повидимому довольно независимы от содержания электролитов в осаждающей среде.

**Обогащение и перемещение грунтов воздушными течениями.** Рассмотренное выше перемещение частиц грунта проточными водами ограничено сетью узких артерий, причем грунт доставляется в эти артерии путем сползания его по склонам. В противоположность водным потокам воздушные течения проносятся над обширными площадями. Руслом воздушного потока является весь ландшафт в целом. Там, где постоянно отсутствует предохраняющий растительный покров, приобретают значение воздушная денудация (дефляция) и эрозия (коррозия). Они отвечают следовательно, с одной стороны, смывающему действию дождевой воды, с другой — эрозионному действию рек на свои русла. Действие эрозии воздуха, так же как эрозии воды, усиливается с увеличением концентрации взвешенной фазы наносов.

В Гомезике (Homesick) в седловине между Сан-Бернардино и хребтом Сан-Жацинто в Калифорнии телеграфные столбы в течение года близ поверхности земли почти насквозь пропиливаются несущими песок воздушными течениями.

Образованные воздушными течениями выемки и насыпи соответствуют вымоинам, песчаным и илистым отмелям рек, но первые, вследствие огромной ширины русел воздушных течений, отличаются значительно большими размерами. Несмотря на то, что воздушные течения очень часто меняют свою силу и направление, сортировка переносимого ветром материала по крупности зерна происходит совершеннее, чем это производится водою. Поэтому эоловые отложения отличаются меньшими показателями неравномерности. Истирание грунтовых зерен, переносимых ветром, также происходит более полно, чем это производится водою. При

переносе водой истиранию подвергаются зерна размерами не мельче гравия и щебня, между тем как округление зерен, производимое ветром, простирается на все зерна, не превосходящие крупностью примерно 0,1 мм. Вследствие округленной формы зерен и однородности их эоловые песчаные отложения по свойствам зерна относятся к самым подвижным разновидностям грунтов.

Крупность зерна эоловых отложений, как и в случае отложений, производимых реками, в общем убывает с увеличением расстояния их от области питания. Если областью питания служит оголенный горный хребет, то склоны последнего бывают или гладко выметены, или покрыты обломками породы. В области предгорий, как и в среднем течении рек, садится песок (песчаные дюны), а на окраинах предгорий происходит отложение пыли (лёссовые образования). Признаками материкового происхождения лёсса служат находимые в нем материковые формы улиток, как, например, *Pira muscorum*, *Helix hispida* и др., а также отсутствие в нем слоистости. Обогащение грунтового материала ветром, подобное процессу, обуславливающему образование пустынь, наблюдается также в гольях или почти оголенных степях влажных областей.

Как дюны, так и песчаные отмели рек внутри не покрытых растительностью областей находятся в состоянии постоянного перемещения, поскольку они не будут закреплены искусственными мероприятиями. Во влажных областях с материковой стороны дюн о закреплении перемещающихся песчаных масс заботится сама природа, засаживающая их особого вида кустарником *Strandhafer* und *Strauchweizen*, а затем и сосновым лесом. Подобным же образом поступают и при закреплении дюн. Кроме того применяют также искусственные тюфяки и плетеные заграждения, как это имеет место в деле борьбы с снежными заносами. В железнодорожном строительстве в пустынях, где исключена возможность засаждения откосов дюн, придерживаются принципа, по возможности, не нарушать наличия существующих условий и избегают устройства как высоких насыпей, так и глубоких выемок<sup>1</sup>.

Современные дюны отличаются по видимому рыхлым сложением и потому обнаружили бы весьма слабое сопротивление нагрузке. Объем пор, обнаруженный Раманном в одной дюне у Еберсвальде, состоящей из тонко- и среднезернистых дилювиальных песков, оказался также необыкновенно большим<sup>2</sup>. С другой стороны, находящиеся в северо-западной части Берлина сухие дюнные пески слыvät прекрасным строительным грунтом, что, в связи с большой однородностью сложения и округленностью зерен песка, приводит к заключению о крайне плотном сложении их. Статистических данных об относительной плотности и сопротивлении нагрузке дюнных грунтов до сих пор еще не имеется.

В низменностях с материковой стороны береговых дюн, согласно Торнквисту, нередко образуются залежи гнилого ила (*Faulschlamm*) с торфяным покровом. Если в этом случае дюны перемещаются вглубь материка, то отложения торфа, под влиянием

<sup>1</sup> M. Clavenad. Les dunes du Sahara. Possibilité de les traverser en voie ferrées. Ann. des ponts et chaussées, I, p. 696. 1881.

<sup>2</sup> Raman. Bodenkunde, S. 309. 3 Aufl., 1911.

веса дюн, уплотняются и деформируются; образовавшийся при этом почти водонепроницаемый прослойк может явиться причиной проявления необычной деятельности грунтовых вод (восходящий поток грунтовой воды, образование пльвуна).

Гораздо больше разнообразия в технико-геологическом отношении проявляют эоловые пылеватые грунты (лѣсс), образующиеся на окраинах областей, когда-то или и поныне еще бедных растительностью. Классическим примером области лѣссовых отложений служит Китай, где пыль доставляется из пустынь Центральной Азии. Лѣссовые отложения Германии образовались после отступления ледников в то время, когда освободившаяся от льда местность еще не была покрыта растительностью. Лѣсс Венской котловины и южной Венгрии был нанесен после усыхания понтического моря.

Пылевые отложения, вследствие тонкости своих частиц, могут образовываться только на тех местах земной поверхности, где они оседают на площадях, покрытых растительностью, так как в противном случае они снова уносились бы воздушными течениями. Поэтому, так как пустыни по геоботаническим причинам всегда бывают отделены от лесистых местностей поясом степей, типичный лѣсс представляет собой степное образование. Активный размер лѣссовой крупинки представляет собой величину порядка 0,005 мм. Материал лѣсса желтоватого или коричневатого цвета, состоит из слегка округленных зерен кварца, слюды и полевого шпата и в типичной форме проникнут тонкими вертикальными, покрытыми изнутри известью, корневыми трубочками. Порядок расположения корневых трубочек делает лѣсс довольно проницаемым для воды и воздуха, но только проницаемость эта в горизонтальном направлении значительно меньше, чем в вертикальном. Вследствие этого, уровни грунтовых вод в лѣссовых областях необыкновенно круты<sup>1</sup>.

Флювиальные промежуточные намывы песка и щебня могут образовать водообильные и в горизонтальном направлении сильно-проницаемые водоносные горизонты.

Наличие корневых трубочек обуславливает также склонность лѣсса к вертикальной отдельности, так что типичный степной лѣсс очень часто образует высокие вертикальные стены (вдоль Дуная у Сланкама в Сербии и на южном берегу у Рушука). Сцепление частиц лѣсса настолько значительно, что образованные в нем пустоты (погребя, пещерные жилища и др.) долгое время сохраняются открытыми. Некоторое насыщение лѣсса влагою, при условии сохранения им своей структуры, также не уничтожает сцепления его частиц, так как оно вызывается здесь непосредственно прочностью известковистого вяжущего вещества, а не поверхностным натяжением воды, обуславливающим сцепление частиц в затвердевшей глине. Но если разрушить структуру лѣсса размачиванием в воде, то материал превращается в лѣссовидную глину, свойства которой как в отношении сцепления, так и водопропускной способности корневым образом отличаются от соответственных свойств материнской породы.

---

<sup>1</sup> H. Vatter. Eine Grundwasserstudie im Lössgebiet des Sundgaaes (Oberelsaß). Stuttgart, 1919.

С течением времени лёсс может утратить известковый цемент вследствие выщелачивания его грунтовыми водами и претерпеть при этом столь значительные изменения, что конечный продукт окажется почти совершенно не имеющим общих свойств с типичным лёссом. Перенесенный на другое место лёсс, подобно лёссовидной глине или лёссу, непосредственно осевшему в воде (озерный и болотный лёсс), представляет собой суглинистое отложение с свойствами очень тощей глины или кварцевого суглинка. Поэтому обозначение „лёсс“ ведет к недоразумениям, нередко возникающим в технических кругах.

### 3. ГЛАВНЫЕ ТИПЫ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЙ.

Фундаменты постоянных высоких построек (Hochbauten) и мостов, как правило, всегда закладываются ниже границы промерзания грунта, или границы годовых колебаний температуры и влажности. Поэтому следующие выводы будут касаться только С-горизонта и залегающих ниже его пород. А- и В-горизонты будут приняты во внимание лишь при разборе оползней и в отделе геологии дорожного строительства (см. эти главы).

Чтобы в первую очередь получить грубое представление о свойствах грунта, вскрытого бурением, следует поступать следующим образом.

Берут часть извлеченной буром пробы и высушивают ее при комнатной температуре. После высушивания проба представляет собой или лишенный сцепления порошок, или более или менее твердое тело. В последнем случае высушенную пробу бросают в наполненный водою сосуд, дают ей насытиться водой до тех пор, пока она перестает на глаз изменяться, и затем встряхивают ее вместе с водой. При встряхивании проба, вполне или частично, распадается на свои отдельные составные части, или же остается неизменной. В последнем случае ее следует подвергнуть повторному высушиванию и пропитыванию водой. Во время последней операции проба или попрежнему остается неизменной, или же разламывается на более мелкие куски. Наконец, пробу испытывают на открытом пламени.

Смотря по результатам этих испытаний, можно извлеченные бурением образцы грунта подразделить на семь главных групп (от *a* до *g*, табл I).

Каждая из этих семи групп требует, с технико-геологической точки зрения, особого к себе отношения.

Группы *a* и *f* имеют значение только для заложения грунтовых дорог, железнодорожного полотна и легких наземных построек, а также для устройства каналов. Органические отложения со схожими геологическими свойствами, как правило, настолько сходны между собой и в отношении сжимаемости, и сопротивления нагрузке, что для характеристики их с технико-геологической стороны достаточно бывает подробного геологического описания отложений, основанного на результатах бурения.

Группы *b* и *c*. Для суждения о природе основания группы *b* достаточно знания сопротивления давлению нетрещиноватых проб, а также характера трещиноватости и водопроницаемости породы.

То же самое следует сказать и о группе *c*, поскольку при возведении построек принимаются меры к тому, чтобы поверхность основания была защищена и оставалась защищенной от влияния агентов выветривания. В том случае, если породы групп *b* и *c* должны служить строительными материалами, более детальное петрографическое исследование их становится неизбежным.

Таблица I.  
 Главные типы грунтовых оснований.

После высушивания	При встряхивании высушенной пробы с водой	После повторного высушивания и пропитывания водой	На открытом пламени	Обозначение групп
Образует связанную, более или менее твердую массу	Без изменения	Сжимается и разбухает	Сгорает	a) Волокнистые органические массы
		Без изменения	Без изменения	b) Плотная устойчивая порода
	Распадается на более мелкие куски	—	—	c) Крошащаяся порода
	Распадается лишь отчасти на более мелкие куски	—	—	d) Частично сцементированное скопление зерен
	Распадается вполне на отдельные зерна	—	—	Без изменения
—		—	Сгорает вполне или отчасти	f) Аморфные органические массы
Состоит из отдельных зерен	—	—	—	g) Скопление зерен, не связанных сцеплением

*Группа d.* При „частично сцементированных породах“ вопрос сводится к тому, имеем ли мы дело с породами, находящимися в состоянии прогрессирующего выветривания (разрушения), или с продуктами разрушения, находящимися в состоянии цементации. В первом случае физический и механический характер породы в высокой степени зависит от ее структуры, и поэтому здесь приходится неизбежно прибегать, наряду с исследованием самого вещества свежеснятой породы, также и к исследованию ее структуры,

т. е. определению пористости породы по суммарному объему пустот и их отдельным размерам. Во втором случае частичная цементация может происходить вследствие или наличия в породе нерастворимого, вяжущего вещества, или же процесса старения содержащихся в грунте коллоидов. Сообразно степени сцементированности породы она с технико-геологической точки зрения может рассматриваться как разновидность, относящаяся к группам *b* или *c*, или же к одной из нижеследующих групп.

*Группа e.* Эта группа в технико-геологическом отношении представляет особую важность, так как подавляющее большинство затруднений, встречаемых при выполнении строительных работ (осадка, движение почвы и пр.), находятся в связи с разновидностями грунтов этой группы. Буровой мастер среди пород этой группы различает глинистый песок (Schluffsand), ил, суглинок и глину.

Чтобы отличить глинистый песок от ила американские буровые мастера скатывают в руке колбасообразный цилиндр примерно в 2 см диаметром. Если выступающий из руки кончик колбасы отламывается под влиянием своего веса, то породу относят к глинистому песку. Если же кончик гнется и вытягивается, то породу называют «илом». Глина отличается от ила главным образом большей пластичностью и более светлой окраской. «Ил» вследствие содержания органических примесей большей частью отличается черноватой окраской, между тем как глина бывает синего, серого, желтого, красного или беловатого цветов. Консистенция глины определяется словами «мягкая», «средняя» или «твердая». Суглинок — это естественная смесь из песка и глины. Иногда выражение «суглинок» обозначает также наличие некоторого содержания извести. Наибольшее число ошибок, вытекающих из общепринятых методов оценки грунтовых проб, заключается в смешении глинистого песка с илом, в неправильном определении консистенции глин и в подведении под одну категорию глин с весьма различными степенями пластичности.

Имея в виду, что нередко бывает трудно отличить даже тонкие глинистые пески от ила или глины, следует признать дальнейшее подразделение грунтов этой группы по чисто внешним признакам на суглинок, супесок, пльвун и т. д., имеющим мало практической ценности.

Вследствие отсутствия ясных признаков для различения этих особых разновидностей применение названий их вносит только путаницу в техническую литературу.

Каждое из обозначений, принятых для грунтов группы *e*, объемлет разновидности грунтов, представляющих в техническом отношении весьма различную ценность. Поэтому, для того чтобы придать большую точность толкованию результатов бурения, представляется неизбежным определять наиболее важные технические свойства относящихся к этой группе грунтов в цифровых показателях, получаемых на основании данных лабораторных испытаний.

*Группа f.* Рассматривать как группу *a*.

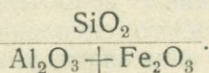
*Группа g.* Не связанные сцеплением пески, гравий и щебень. Отдельные зерна различаются невооруженным глазом.

#### 4. СВОЙСТВА НЕСЦЕМЕНТИРОВАННЫХ, СВЯЗАННЫХ ИЛИ НЕСВЯЗАННЫХ СЦЕПЛЕНИЕМ РАЗНОВИДНОСТЕЙ ГРУНТОВ (ГРУППЫ *e* и *g*).

**Постоянство объема и формы.** Если разновидность грунта группы *e* подвергнуть поверхностному испытанию, то прежде всего замечают, что одна и та же разновидность грунта может быть жидкой, вязкой или твердой, смотря по количеству содержащейся в грунте воды. Если сравнить между собой отдельных представителей этой группы, после предварительного однородного испытания их, то оказывается, что они могут проявить в высшей степени различные свойства. Некоторые из этих разновидностей при высушивании сжимаются или, как говорят, усыхают и твердеют. Другие почти сохраняют неизменный объем. Во время процесса высыхания некоторые грунты приобретают временную пластичность, тогда как другие вообще не могут быть переведены в пластичное состояние. Некоторые грунты разбухают, если их после предварительного высушивания погружают в воду, другие не разбухают. Различие физических свойств равным образом обнаруживается в продолжительности срока, в течении которого высушенная проба распадается после смачивания ее водой. Срок этот для разных грунтов весьма различен.

**Величина зерна и коллоидальные составные части грунта.** Средняя величина зерна и неоднородность его (отношение между диаметрами самых крупных и самых мелких зерен) также меняются в широких пределах. Несцементированные, связанные сцеплением разновидности грунтов содержат более или менее значительное количество материала, состоящего из очень тонких частиц с величиной зерна ниже 0,002 мм, так называемых грунтовых коллоидов<sup>1</sup>. Особенности образования грунта, ясно выраженное уменьшение объема и разбухание его, настолько явно связаны с высоким содержанием в нем коллоидов, что некоторое время, особенно в Соединенных Штатах, надеялись на возможность установить классификацию грунтов для практических целей на основании содержания в них коллоидов. Эта надежда, между прочим, была основана на ошибочном взгляде, что коллоидная составная часть различных глин представляет собой одно и то же вещество определенного химического состава.

С углублением наших взглядов на сущность грунтовых коллоидов эта надежда исчезла. Прежде всего было установлено, что химический состав, а с ним и физические свойства грунтовых коллоидов меняются в широких пределах. Грунтовые коллоиды, подобно более грубым частям грунтов, представляют собой некоторую смесь простых коллоидов, химически и физически различных между собой. Разнообразие встречающихся в природе смесей выражается в известной мере изменчивостью отношения



<sup>1</sup> Размер в 0,002 мм был, между прочим, установлен Аттербергом в качестве верхнего предела для диаметра коллоидальных составных частей грунта. Другие исследователи приводили для верхнего предела гораздо меньшие величины.

Кроме того было установлено, что один и тот же грунтовый коллоид может проявлять весьма различные физические свойства, смотря по содержанию в нем гумуса и характеру адсорбированных коллоидом электролитов. Обозначаемые словом „гумус“ органические составные части представляют собой, согласно А. Р. Дахновскому, весьма малые частички органического вещества, противостоящие процессу гниения, которому, под влиянием доступа воздуха, подвергались растительные и животные остатки. Коллоиды большинства грунтов должны быть рассматриваемы как комплексы адсорбции, состоящие из грунтового коллоида и включенных в него связанных адсорбцией электролитов. Сюда в некоторых случаях, присоединяется еще и гумус. Влияние этих компонентов на физические свойства грунта настолько сложно, что о простом соотношении между „содержанием коллоида“ и свойствами грунта не может быть и речи.

**Сцепление и внутреннее трение** (уменьшение объема и разбухание). Разнообразие в составе грунтов, а также в количестве и свойствах содержащихся в них грунтовых коллоидов отражается на грунтах в форме столь же значительного разнообразия, наблюдаемого в отношении их важных в техническом отношении свойств. Инженер интересуется главным образом устойчивостью откосов, боковым давлением грунта на опорные стенки и сопротивлением грунта нагрузке.

Устойчивость откосов зависит от сцепления и внутреннего трения. В общем сцепление, т. е. сопротивление грунта скалыванию, с увеличением степени тонкости его частиц увеличивается, а внутреннее трение при тех же условиях уменьшается. Для свободных от глины, совершенно сухих или вполне насыщенных водой песка и щебня (разновидности грунтов с макроскопическими отдельными зернами) сцепление равно нулю, коэффициент же внутреннего трения по меньшей мере выражается цифрами от 0,60 до 0,65. Для тонкозернистых разновидностей грунтов сцепление может выражаться сопротивлением до 100 кг на см<sup>2</sup>, а коэффициент внутреннего трения снижаться до 0,20. Обе величины, однако, могут для одного и того же грунта варьировать в значительных пределах, а в верхних слоях его заметно меняться даже со дня на день. Поэтому данные о сцеплении и внутреннем трении связанных разновидностей грунтов имеют смысл лишь тогда, если они сопровождаются исчерпывающим описанием геологических и физических условий, при которых эти данные получены.

Простейший метод грубой оценки степени сцепления связанных грунтов заключается в определении сопротивления давлению (на единицу поверхности) цилиндра или кубика, вырезаемых из грунта и подвергаемых испытанию в состоянии естественной влажности. Сцепление, другими словами сопротивление скалыванию грунта, равно или больше половины сопротивления цилиндра сжатию. Если цилиндр высушивать, то сцепление его вещества, по мере уменьшения содержания в нем влаги, увеличивается. Так как этого рода сцепление, согласно учению физики грунтов, обуславливается поверхностным натяжением воды, то будем обозначать его словами „кажущееся сцепление“.

По Терцаги, кажущееся сцепление и причинно связанные

с ним явления происходят следующим образом<sup>1</sup>. Поверхностное натяжение действует на пробу грунта наподобие окружающей ее резиновой пленки. Давление, производимое на пробу этой пленкой, называется капиллярным давлением. Если проба глины высыхает, то поверхностное натяжение усиливается, и глина уменьшается в объеме так, как если бы она подверглась сжатию путем произведенного на нее внешнего (механического) давления. Говорят, что глина „усыхает“. В то же время кажущееся сцепление усиливается, так как оно представляет собой не что иное, как внутреннее трение, возбужденное капиллярным давлением. Кажущееся сцепление равно капиллярному давлению, помноженному на коэффициент внутреннего трения. Чем мельче поры, тем больше величина верхнего предела капиллярного давления. Для жирных глин оно может достигнуть даже величины нескольких сот атмосфер. Вследствие этого и связанное с высыханием изменение объема, при одинаковых свойствах зерна, с уменьшенном крупности последних увеличивается. В том же смысле возрастает сопротивление давлению высохшего вещества, причем для жирных глин оно может достигнуть сопротивления давлению, проявляемого тощим бетоном.

Если наполовину или вполне высохший грунт погрузить в воду, то поверхностное натяжение, а с ним и капиллярное давление сейчас же становятся равными нулю. Грунт упруго расширяется, причем всасывает воду подобно расширяющейся под водою губке. Это явление называется „распуханием“ или „разбуханием“. При одинаковом максимальном значении капиллярного давления связанное со сжатием и разбуханием изменение объема зависит от свойств грунта, определяющих его прочность, которые, с своей стороны, определяются количеством содержащихся в грунте чешуеобразных минеральных составных частей (стр. 54).

При разбухании глины сцепление ее хотя и уменьшается, но совершенно не исчезает. Сцепление, остающееся в глине после погружения ее в воду, происходит не от поверхностного натяжения воды, но от слипания между собой частиц грунта и потому будем называть его „истинным сцеплением“. Для одного и того же грунта истинное сцепление тем больше, чем плотнее были прижаты друг к другу его частицы перед погружением в воду. Для некоторых глин (например, Mississippi Gumbo или синих гляциальных глин в Main) истинное сцепление достигает столь значительной величины, что эрозия лишь медленно проникает в их недра.

Кажущееся сцепление может быть снижено продолжительными ливнями до размера истинного сцепления, и связанное с этим снижением сцепления увеличение объема ведет к растрескиванию (Sprungbildung) или к раскрашиванию грунта. Истинное сцепление, напротив, ни в какой мере не подвержено изменению под влиянием доступа воды.

Классический пример истинного сцепления мы имеем в одном из сообщений, опубликованном Шведской геотехнической комиссией<sup>2</sup>. В этом сообщении описывается случай, когда высохшее с по-

<sup>1</sup> Terzaghi. Erdbaumechanik. Wien, Franz Deuticke, 1925.

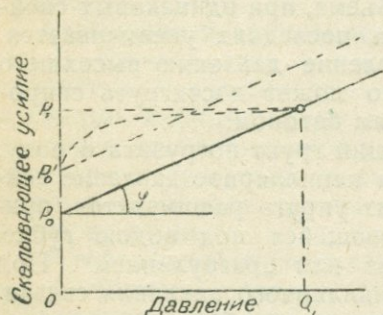
<sup>2</sup> Statens Järnvägars Geotekniska Commission, 1914—1921, Slutbetänkande, 31 Maj, 1922, Stockholm, p. 133—140, tab. 41.

верхности месторождение глины в течении геологического развития ландшафта долгое время оставалось под водою и было покрыто слоем рыхлых отложений в несколько метров мощностью. В части глины, находившейся под корой усыхания, кажущееся сцепление было снижено до размеров истинного. Последнее однако, вследствие находящегося в связи с высыханием сближения частиц грунта, оказывается столь значительным, что прежняя кора усыхания в настоящее время образует в высшей степени жесткий промежуточный пласт в несколько метров мощностью, залегающий на глубине 8—10 м под уровнем озера (Аспензее) между подстилающими и покрывающими его мягкими отложениями<sup>1</sup>.

Внутреннее трение связанных грунтов только тогда поддается надежным измерениям, если проба в течении испытания остается под водою. В противном случае истинное положение вещей затемняется явлениями кажущегося сцепления. Но даже опыты над трением, производимые под водою, ни в коем случае не дают одинаковых результатов для данной разновидности грунта.

Опыт над трением состоит в том, что пробу грунта помещают в открытую сверху и снизу раму, подвергают верхнюю поверхность пробы нагрузке  $Q$  и затем определяют горизонтальную составляющую силу  $P$ , которая необходима для того, чтобы вызвать явление скольжения между нижней стороной нагруженной пробы и шероховатой подложенной под нее пластиной.

Рис. 2. Графическое изображение результатов опыта по определению трения в связанном грунте.



Если нанести на диаграмме нагрузки  $Q$  на оси абсцисс, а горизонтальные составляющие сдвигающей силы  $P$  на оси ординат, то получится примерно картина, изображенная на рис. 2. Усилие  $P$ , необходимое для того, чтобы вызвать скольжение, выражается обычно следующей формулой

$$P = P_0 + Q \frac{P_1 - P_0}{Q_1} = P_0 + Q \cdot \operatorname{tg} \varphi = P_0 + Qf \dots \dots (1)$$

В этой формуле обозначают:  $P_0$  — сцепление грунта,  $\varphi$  — угол внутреннего трения и  $f$  — коэффициент внутреннего трения. Эта формула была впервые выведена Кулоном и еще в настоящее время представляет собой основное положение теории связанных грунтов.

На практике, однако, условия никогда не бывают столь простыми, как это следует из формулы (1). Если испытание производится под водою, то  $P_0$  представляет собой исключительно истинное сцепление и, как таковое, в гораздо меньшей степени подчинено влиянию внешних условий по сравнению с кажущимся сцеплением,

<sup>1</sup> Относительно механики образования коры см. Terzaghi. Erdbaumechanik, Wien, Franz Deuticke, 1925.

вызываемым поверхностным натяжением воды. Но и истинное сцепление ни в коем случае не дает для одной и той же разновидности грунта единого определенного значения. Если, например, в случае, изображенном на рис. 2, постепенно уменьшать нагрузку  $Q$  от величины  $Q_1$  до нуля и затем повторить испытание, то возможно, что результаты его выразились бы на диаграмме линией, изображенной пунктиром с точками. Истинное сцепление в таком случае будет  $P_0' > P_0$ . Но и значение угла трения  $\varphi$ , смотря по тому, как проводится испытание, может колебаться в значительных пределах. Если в быстрой последовательности увеличивать нагрузку от нуля до  $Q_1$ ,  $Q_2$  и т. д., то для  $\varphi$  получается значение, едва отличающееся от нуля. Чем больше промежуток времени, в течении которого производится испытание, тем более угол  $\varphi$  приближается к верхнему пределу, составляющему для жирных глин примерно  $12^\circ$ . Этот верхний предел называется „углом трения в узком смысле этого слова“, и только этот предел может рассматриваться как некоторая постоянная для данного грунта величина, более или менее независимая от условий опыта.

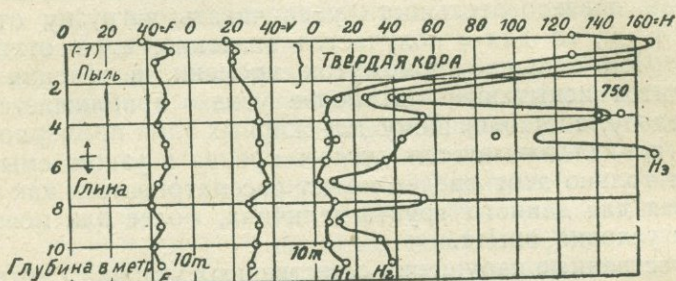
Искусственные нарушения естественных условий, смотря по роду этих нарушений, могут изменять господствующие в грунте напряжения или очень быстро, или очень медленно. Поэтому подлежащее определению сопротивление трению зависит не только от рода и состояния ненарушенного грунта, но также и от рода намечаемого нарушения.

Дальнейшим важным обстоятельством является влияние нарушения сложения грунта на сцепление его при неизменяющемся содержании в нем воды и постоянном его объеме. Путем простого разминания образца глины сцепление ее снижается до некоторой дробной части его первоначального значения, причем степень этого снижения, смотря по роду грунта, бывает весьма различна.

На рис. 3 абсциссы кривых  $H_3$  изображают сцепление проб грунта в их естественном состоянии,  $H_2$  — сцепление после частичного нарушения, а абсциссы кривых  $H_1$  — сцепление таких же проб после основательного нарушения их сложения (по определениям, произведенным Шведской геотехнической комиссией путем испытания проб конусом (см. стр. 48). На ординагах отложены в метрах глубины, с которых пробы извлечены из буровых скважин. Из рисунка видно, что сцепление основательно нарушенных проб грунта, даже в образцах, с виду схожих между собой (в данном случае переслаивающаяся с глиной песчаная пыль), может колебаться в широких пределах от 26 до 2,6% от сцепления ненарушенных проб. На основании результатов испытаний сопротивления давлению, Терцаги установил, что сцепление синих гляциальных глин из Кембриджа в Массачусетс, путем разминания их, снижалось до значений, составлявших от 55 до 25% сцепления ненарушенных образцов глин. Физические причины этого сильного влияния нарушения структуры на сцепление до настоящего времени еще не выяснены. Явление это само по себе имеет, однако, выдающееся практическое значение. Даже такое явление, как естественное разжижение глинистых масс при оползнях в ледниковых отложениях, норвежские и шведские исследователи склонны объяснять влиянием нарушения структуры на уменьшение сцепления. Автору приходилось в Новой Англии неодно-

кратно наблюдать случаи, когда гляциальные пылавые суглинки (Schlufftone) от вколачивания в них свай переходили в полужидкое состояние, несмотря на то, что в некоторых случаях процесс вколачивания сопровождался значительным уменьшением объема пробитых слоев грунта. В общем можно сказать, что влияние нарушения структуры на сцепление уменьшается с увеличением степени пластичности грунта. Сильнее всего оно по видимому проявляется

а) Буров скважина 63 мет. справа от оси плотины



б) Буров. скважина, 89 м. справа от оси плотины

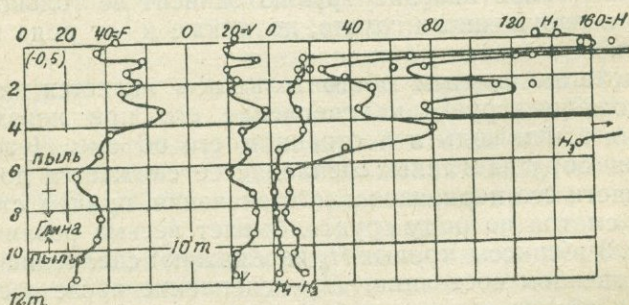


Рис. 3. Снижение сцепления после нарушения структуры породы (по данным Шведской геотехнической комиссии).

$F$ —нормальное водосодержание,  $V$ —содержание воды в пробе (в % от общего веса),  $H$ —величина консистенции (сцепления), ( $H_2$ —для ненарушенной,  $H_3$ —слегка нарушенной и  $H_1$ —вполне перемятой пробы).

в некоторых слабо пластичных гляциальных плавучих породах и глинах, преимущественно состоящих из тончайшей минеральной пыли.

Если инженер, приступая к работам по вскрыше грунта, обращается за консультацией к геологу, то это делается главным образом с той целью, чтобы на основании данных геолога оценить величины  $P_0$  и  $\varphi$  (формула (1), стр. 30) для слоев грунта, предназначенных к вскрыше. Поэтому геолог тем лучше может удовлетворить предъявляемым инженером требованиям, чем основательнее он ознакомлен с вышеприводимыми факторами, от которых величины  $P_0$  и  $\varphi$  зависят, и чем яснее эти факторы выражены в составленном им грунтоописании.

Боковое давление земли на опорные стенки также главным образом зависит от величин  $P_0$  и  $\varphi$ . В противоположность этому

на сопротивление, оказываемое нагрузке основанием, помимо указанных факторов, существенно влияют также и другие свойства грунта.

**Сжимаемость и упругость.** Рис. 4 представляет собой разрез через отведенный под постройку участок с горизонтальной поверхностью фундамента. Здесь  $ab$  — вспомогательные линии, которые до нагрузки были прямыми и опускались вниз в вертикальном направлении. Если теперь поверхность  $aa$  подвергается нагрузке каким-либо сооружением, то это сооружение „оседет“. Часть этой осадки  $aa_1$  происходит за счет распираия в стороны нагруженного грунта. Эта часть осадки выражается боковым выпучиванием вспомогательных линий  $ab$ . Она при всяких условиях наступает сравнительно быстро и связана только с изменением формы грунта, но не плотности его. Вторая часть осадки  $a_1a_2$  обуславливается увеличением плотности части грунта, заключенной в объеме  $a_1a_1a_2a_2$ .

В том случае, если поры этой части грунта целиком заполнены водой, что имеет место у большинства тонкозернистых разновидностей грунта, то увеличение плотности бывает связано с выдавливанием воды, причем должна преодолеться вязкость последней. Чем водонепроницаемее грунт, тем медленнее удаляется излишек воды. Вследствие этого вторая часть осадки сооружения при слабой водопроницаемости грунта происходит медленно, причем скорость осадки зависит от степени водопроницаемости нагруженных слоев.

Если инженер говорит о „допустимой нагрузке грунта“ (*zulässige Bodenbeanspruchung*), то под этим термином он понимает тот груз, приходящийся на единицу поверхности, при котором осадка сооружения становится незаметной, т. е. не превосходит 1 или 2 см. Согласно рис. 4 эта осадка зависит от следующих факторов:

- а) сопротивления грунта распиранию в стороны;
- в) сжимаемости грунта, т. е. степени увеличения плотности, вызванной давлением, и
- с) водопроницаемости, так как последняя определяет скорость, с которой протекает процесс уплотнения нагруженного грунта.

Свойство „а“ определяется примерно теми же факторами, от которых зависит устойчивость откосов, т. е. уже упоминавшимися величинами  $P_0$  (сцепление) и  $\varphi$  (угол трения).

Для того чтобы сравнить между собой свойства сжимаемости отдельных разновидностей грунта, пробу грунта подвергают испытанию давлением в закрытом сосуде, т. е. сжатию в условиях затруд-

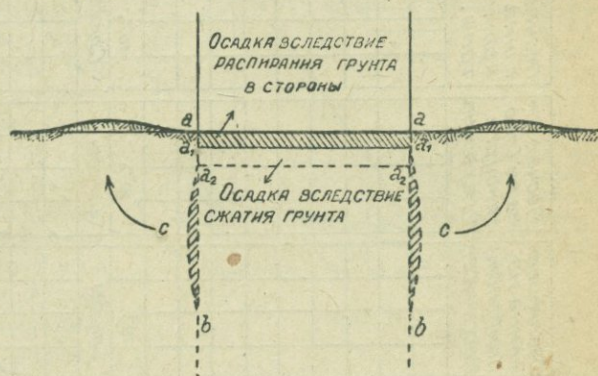


Рис. 4. Нагрузка отведенной под постройку площади при горизонтальной поверхности фундамента сооружения.

ненного выпучивания в стороны, при этом для стока или притока воды необходимо озаботиться включением фильтрующего слоя или

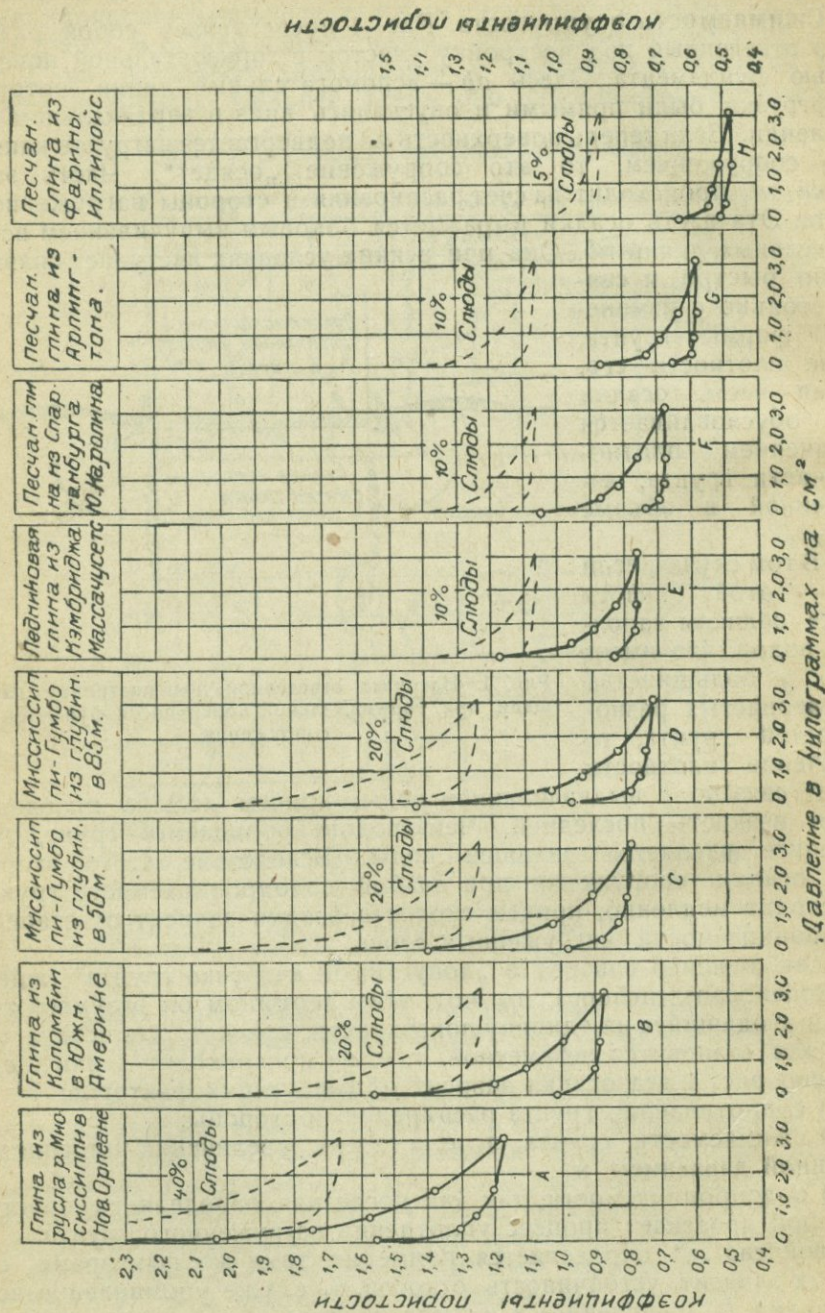


Рис. 5. Диаграммы результатов испытаний на сжатие некоторых грунтов Сев. и Южн. Америки.

устройством пористого основания. Результаты этого опыта изображаются графически, причем на горизонтальной оси наносятся давле-

ния, а на вертикальной — соответствующие содержания воды<sup>1</sup>. Сплошные кривые на рис. 5 изображают результаты подобных опытов на сжатие, произведенных над типичными грунтами в Сев. и Южной Америке. На каждой диаграмме нисходящая ветвь изображает собой влияние непрерывного увеличения давления на содержание воды (прогрессирующее уплотнение), а восходящая ветвь — результат последующего непрерывного уменьшения давления (упругое расширение или разбухание). Из диаграммы видно, что как сжимаемость, так и способность разбухать у различных грунтов могут быть чрезвычайно различны.

Но даже для одной и той же разновидности грунта сжимаемость его очень изменчива в зависимости от плотности грунта, которую последний имел в начале испытания.

Рис. 6 иллюстрирует результаты двух опытов давления пробой песка. При первом



Рис. 6.

произведенных над одной и той же испытании проба песка была помещена в давящий цилиндр в разрыхленном состоянии, при втором же перед началом испытания песок утряхивался. По результатом испытаний видно, какое сильное влияние оказывает плотность начального сложения пробы на сжимаемость грунта, между тем как связанное со снижением давления увеличение объема (кривая упругого расширения или разбухания) от первоначального сложения грунта почти не зависит. Разница в сжимаемости влияет также и на сопротивление грунта нагрузке (рис. 7). На горизонтальной оси диаграммы наносились грузы в килограммах на  $см^2$  нагруженной поверхности, а на вертикальной оси — соответствующие им осадки нагруженной пластинки ( $S$ ) в сантиметрах.

В природе плотность первоначального сложения осадка при данных свойствах его зависит от тех геологических условий, при которых отложение образовалось. Песок, осаждающийся во время спада половодья, как правило, отлагается в более рыхлом

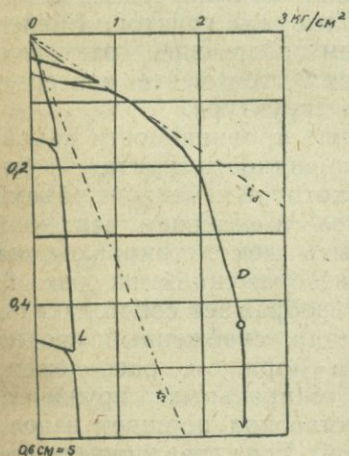


Рис. 7. Диаграмма осадки для утрясенного ( $D$ ) и рыхлого песка ( $L$ ).

<sup>1</sup> Прим. ред. Под содержанием воды в породе автор подразумевает везде влажность.

виде, чем песок, медленно осевший в бассейне озера. Глины, образовавшиеся в пресноводном бассейне, большей частью бывают плотнее глин примерно того же качества, но осевших в море, при условии, что как те, так и другие глины со времени своего образования по-

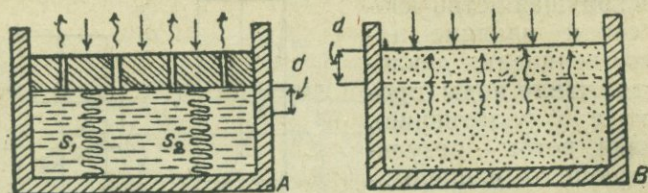


Рис. 8. Модель, наглядно иллюстрирующая влияние водопроницаемости на скорость уплотнения грунта при опытах на сжатие.

стоянно находились под водой. Петрографическая идентичность разновидностей грунтов таким образом отнюдь не является порукой за равенство их в техническом отношении.

Структура песка „консервативна“, другими словами, если песок осел в рыхлом состоянии, то его сложение остается рыхлым или „распертым“ (sperrig) даже в том случае, если он временно или долгое время оставался под высоким статистическим давлением, обусловленным весом лежащих на нем пород. То же можно сказать и о структуре микроскопических или субмикроскопических песков (плавучих грунтов, Fließerden). Чем пластичнее разновидность грунта, тем менее консервативна его структура.

Влияние проницаемости какой-либо разновидности грунта<sup>1</sup> на быструю, с которой изменение объема следует за изменением давления, может быть продемонстрировано на модели, изображенной на рис. 8. Рис. 8 А изображает собой давящий цилиндр, снабженный продырявленным поршнем, расположенным на спиральных пружинах. Пространство под поршнем наполнено водой. Если увеличивать давление на поршень, то опускание последнего сопровождается вытеснением находящейся под ним воды.

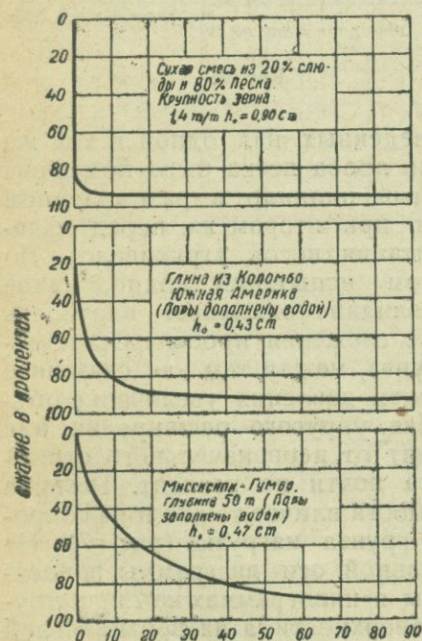


Рис. 9. Соотношение между временем и сжатием для трех сортов грунта.

Чем мельче отверстия, тем медленнее будет опускаться поршень. Изображенная на рис. 8 модель В отличается от модели А только тем,

<sup>1</sup> Теория, устанавливающая связь между проницаемостью и скоростью осадки грунта, изложена у Терцаги в его *Vorlesungen über Bodenmechanik*. IV изд.

что в ней заключен пропитанный водою грунт, из которого при сдавливании вода выжимается по каналам (ходы, образованные порами), пронизывающим всю массу грунта целиком. На рис. 9 показано соотношение между временем (горизонтальная ось) и сжимаемостью (вертикальная ось) для трех разновидностей грунта с весьма различной степенью проницаемости. Пробы были заключены в цилиндр, вроде изображенного на рис. 8 В, и давление во всех трех случаях повышалось с 1,58 до 3,1 кг на см<sup>2</sup>. Цифра 100% соответствует сжимаемости, определившейся по истечении 17 часов. Сжимаемость самой непроницаемой разновидности грунта как раз медленнее всего и стремилась к достижению своего предельного значения. Скорость этого устремления обратно пропорциональна квадрату толщины нагруженного слоя породы. Перед достижением сжатием своего предельного значения часть веса груза, давящего на слой породы, компенсируется гидростатическим давлением воды, заключенной в порах грунта.

Случай, изображенный на рис. 8 В и 9, наблюдается в природе, когда ил, отложившийся на дне озерного бассейна или морской бухты, погребается под массой более молодых отложений. При большой мощности и малой проницаемости такой слой еще и в настоящее время может оказаться в состоянии прогрессирующего уплотнения, или иначе в состоянии несовершенного затвердевания. В этом случае расположенный под полужатвердевшим илом слой песка даст при бурении напорную воду, несмотря на то, что топографические условия местности повидимому исключают возможность ее нахождения. Это явление также может быть объяснено при помощи модели, изображенной на рис. 8 А.

Если просверлить ниже поршня стенку сосуда с водой и соединить просверленное отверстие с вертикальной трубкой, то можно убедиться, что в воде под поршнем существует избыточное гидростатическое давление. Это давление достигает максимальной величины тотчас после момента нагрузки. По мере опускания поршня оно падает и при остановке поршня становится равным нулю.

## 5. ВЫРАЖЕНИЕ СВОЙСТВ ГРУНТА ЦИФРОВЫМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ.

Попытка характеризовать цифрами несцементированные как связанные, так и не связанные сцеплением грунты уже более двадцати лет тому назад делалась многими исследователями различных стран и специальностей. Различные школы проявили в этом направлении довольно значительную независимость, и выбор цифровых показателей, при неполноте нашего знакомства в то время с физическим значением различных свойств грунта, зависел от личного усмотрения отдельных исследователей. По указанной причине в этой области господствует значительное смешение понятий. В общей картине методики еще и в настоящее время гораздо ярче выделяется историческое развитие этой научной области, чем единая основная физическая идея; поэтому увязка между собой отдельных данных, содержащихся в специальных сочинениях различных стран и континентов, представляется делом нелегким.

Цифровые показатели для грунтов. Испытания, производившиеся в целях определения цифровых показателей, могут быть

прежде всего подразделены на две главные группы: испытания, результаты которых дают прямое разъяснение свойств грунта, важных в техническом отношении (например, сцепление, сжимаемость, проницаемость, и т. д.), и такие испытания, результаты коих в лучшем случае имеют косвенную связь со строительно-техническим характером грунта (механический анализ, предельные нормы консистенции). В каждой из этих главных групп следует еще отличать испытания, результаты которых зависят только от петрографического характера грунта, от таких испытаний, результаты коих зависят не только от петрографического характера грунтового материала, но также и от состояния, в котором он находится в природе (например, степень уплотнения, содержание воды и т. д.).

Соответственно с этим для испытаний, приводимых в группах Ia и IIa, могут применяться промятые и отчасти высушенные грунтовые пробы, между тем как испытания групп Ib и IIb должны производиться непосредственно над самим грунтом на месте, или над неизменившимися образцами его (вырезанными или выштампованными из грунта и сохранявшимися до испытания в герметически изолированном виде).

Таблица II дает представление о методах испытаний и показателях, наиболее часто приводимых в специальной литературе. Положение дела однако не так уж безнадежно, как это может показаться по данным табл. II, имея в виду, что результаты различных испытаний грунта находятся между собой в более или менее тесном соотношении. Чтобы уяснить себе эти соотношения, прежде всего необходимо разобраться в сущности различных испытаний и в значении показателей. В нижеследующем сопоставлении номера испытаний соответствуют нумерации их, приводимой в табл. II. К названиям испытаний присоединены наименования корпораций или отдельных исследователей, которые эти испытания предложили и выполняют<sup>1</sup>.

*I ГРУППА (а). 1. Нормализованное испытание уплотнения* (Terzaghi, U. S. Bureau of Public Roads). Цель этого испытания заключается в получении изображенной на рис. 5 графической зависимости между внешним давлением, содержанием воды (или пропорциональным ему коэффициентом пористости, стр. 52), а также скоростью уплотнения, т. е. скоростью, с которой удаляется избыточная вода из пробы при условии невозможности выпучивания последней в стороны и постоянстве нагрузки сверху. Содержание воды в пробе перед началом опыта должно быть путем разминания ее с водой доведено примерно до Аттербергского предела текучести (Atterbergsche Fließgrenze, стр. 49). После загрузки аппарата давление увеличивают ступенями от 0 примерно до 0,4, 0,8, 1,6 и 3,2 кг на см<sup>2</sup> через промежутки времени от 4 до 24 часов (в зависимости

---

<sup>1</sup> Подробные описания различных методов испытаний между прочим имеются в следующих сочинениях: Terzaghi, *Erdbaumechanik*. Wien, Franz Deuticke, 1925. — Terzaghi, *Principles of Final Soil classification*. Public Roads, Vol. 8 № 3, May 1927. — Terzaghi, Hogentogler und Wntermejer, *The Present Status of Subgrade Testing*. Public Roads, Vol. 8, № 9, November, 1927. — Statens Järnvägars Geotekniska Commission, 1914—1922. *Slutbetänkande*, 31. Maj, 1922, Stockholm (испытания № 12 и 24). — I. Kroghi, *Undersökelse over Norske Lerer*. Statens Raastofkomite, I и III, Kristiania, 1923 (испытания №№ 14 и 15).

Таблица II.

Испытания и цифровые показатели для не сцементированных, связанных или не связанных сцеплением разновидностей грунтов.

а) Результаты, зависящие только от разновидности грунта		б) Результаты, зависящие от разновидности грунта и его естественного состояния	
Испытание	Цифровой показатель	Испытание	Цифровой показатель
<b>I Группа. Прямое разъяснение важных в технико-строительном отношении свойств</b>			
1. Нормализованное испытание уплотнения	Величина разбухания. Величина уплотнения. Кривая проницаемости. Индекс проницаемости. Кривая затвердевания	5. Испытание на грузкой	Кривая осадки, коэффициент пористости
2. Нормализованное испытание консистенции	Истинная нормальная консистенция	6. Испытание проницаемости	Коэффициент проницаемости
3. Испытание трения	Коэффициент внутреннего трения	7. Испытание консистенции	Сопротивление давлению. Модуль упругости
4. Испытание сопротивления действию воды	Показатель размокания	8. Испытание на скальвание	Показатель сцепления
<b>II Группа. Косвенная связь с технико-строительным характером грунта</b>			
9. Механический анализ	Кривая распределения. Эффективная крупность зерна. Коэффициент неравномерности. Форма зерна	16. Опыт Меллора	Величина пластичности
10. Определение удельного веса	Удельный вес	17. Испытание пластичности по Бишоффу	Связность
11. Испытание прокаливанием	Содержание органического углерода	18. Определение эквивалента влажности.	Эквивалент влажности
12. Нормализованное испытание конусом	Нормальное водосодержание	19. Испытание по Розе	Эквивалент полевой влажности
13. Определение Аттербергских пределов	Верхний предел текучести. Нижний предел текучести. Предел липкости. Предел раскатываемости. Показатель пластичности. Предел усадки	20. Определение капиллярного поглощения воды	Капиллярное поглощение воды
14. Определение предела насыщения	Предел насыщения	21. Испытание твердости в сухом состоянии	Твердость в сухом состоянии
15. Испытание нормальной консистенции	Нормальная консистенция	22. Испытание адсорбции	Величина адсорбции
		23. Определение водосодержания	Водосодержание. Объем пор. Коэффициент пористости. Относительная плотность. Относительная влажность
		24. Испытание конусом	Показатель консистенции

от степени проницаемости материала), а затем, опять-таки ступенями, давление снижается с 3,2 до 1,6, 0,8, 0,4 кг и до 0.

При повышении давления с 0,4 до 0,8 и с 1,6 до 3,2 кг на см<sup>2</sup> в продолжении от 10 минут до нескольких часов, смотря по проницаемости, производится наблюдение за приростом сжатия при постоянном давлении.

Результат испытания изображают графически, как это явствует из рис. 10. Если  $e$  обозначает коэффициент пористости (ординаты рис. 10 А),  $p$  — давление на единицу поверхности (абсциссы),  $A$ ,  $C$ ,  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $p_c$  и  $p_i$  — постоянные величины, то нисходящая ветвь кривой диаграммы сжатия (рис. 10 А) может быть приблизительно определена уравнением:

$$e = -C \ln(p + p_c) + c_1,$$

а восходящая ветвь (кривая разбухания) — уравнением кривой:

$$e = -A \ln(p + p_i) + c_2,$$

в которых  $\ln$  обозначает натуральный логарифм. Путем определения  $e$  для трех различных значений  $p$  возможно найти величины постоянных  $C$ ,  $p_c$  и  $c_1$  для уравнения сжимаемости и постоянных  $A$ ,  $p_i$  и  $c_2$  — для уравнения разбухания.

Значение  $\frac{1}{A}$  определяет собою величину упругого расширения (разбухания), а значение  $\frac{1}{C}$  — величину уплотнения (сжатия)<sup>1</sup>.

Чем меньше величина разбухания или величина уплотнения, тем меньше, при прочих равных условиях, модуль упругости материала и тем значительнее изменение объема или плотности, которое при одинаковых остальных условиях связано с изменением давления.

На основании кривых уплотнения (рис. 10 В до Е — соотношение между временем и соответствующим сжатием) возможно определить средний коэффициент проницаемости, который был проявлен образцом грунта в течении процесса уплотнения. Для этого поступают следующим образом: для различных ступеней сжатия  $d$  ( $d=60, 70, 80, 90$  и т. д. процентов общего сжатия, ординаты рис. 10 В до Е), соответствующих известному давлению, определяют частное от деления времени  $t_1$ , протекшего до того момента, когда сжатие приняло значение  $d$ , на время  $t_2$ , которое прошло до принятия сжатием половины этой величины ( $d:2$ ). Если нанести значения  $d$

как ординаты, а соответствующие значения  $\frac{t_1}{t_2}$  как абсциссы, то получаются отрезки кривых, изображенные пунктиром на рис. 10 В до Е. На каждом из этих отрезков кривых определяют точку  $p_1$ , для которой отношение  $\frac{t_1}{t_2}$  принимает значение, равное 5,3. Коэффици-

<sup>1</sup> Прим. ред.  $A$  называется коэффициентом упругого расширения,  $C$  — коэффициентом уплотнения.

циент проницаемости  $K$  в см в минуту получается тогда из формулы

$$K = \frac{0,85 h^2}{(1+e) t_1} a,$$

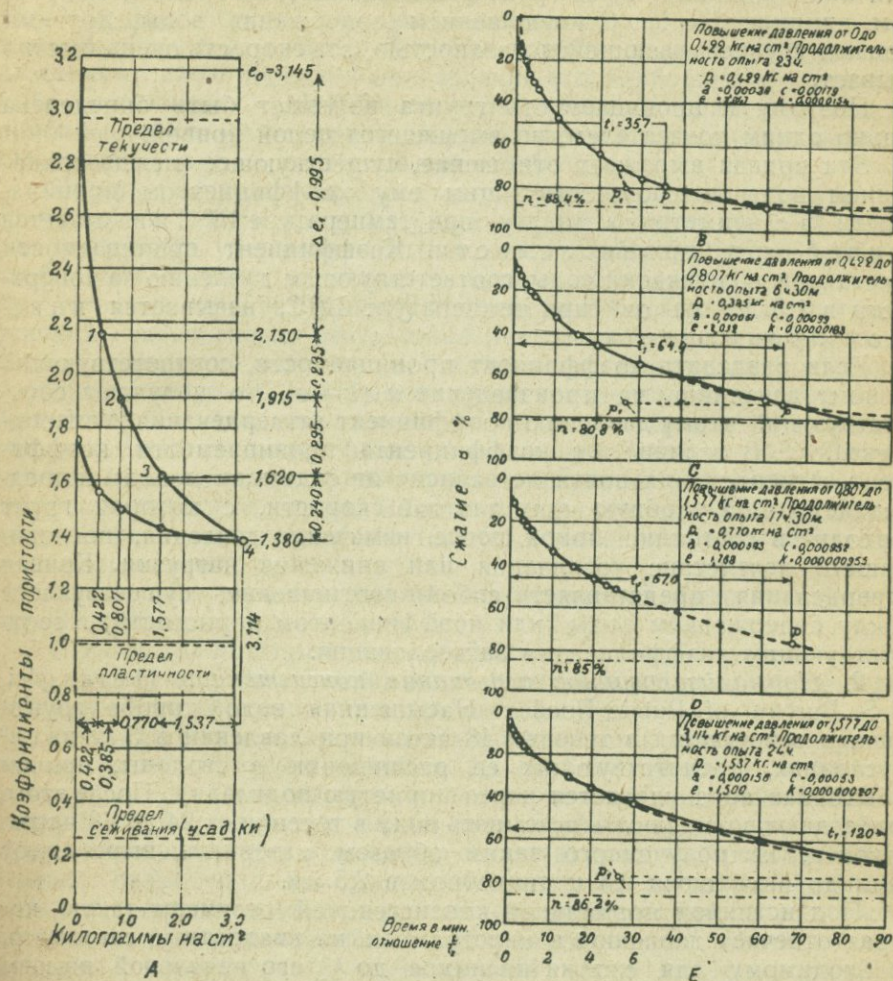


Рис. 10. А — диаграмма испытаний грунта на уплотнение. В — Е — диаграммы соотношений между временем и сжатием. Верхние цифры на оси абсцисс относятся к кривым „время — сжимаемость“ (сплошные линии). Нижние цифры — к кривым  $\frac{t_1}{t_2}$  (короткие отрезки пунктира, проведенные через точки  $p_1$ ).  $p_1$  — повышение давления в кг/см²;  $e$  — коэффициент пористости;  $a$  — уменьшение коэффициента пористости при повышении давления на 1 г на см²;  $c$  — коэффициент уплотнения в г см<sup>-1</sup> мин.<sup>-1</sup>;  $k$  — коэффициент водопроницаемости в см в минуту.

где  $h$  — половина толщины пробы грунта, заключенной между двумя пористыми пластинками в сантиметрах;  $e$  — средний коэффициент пористости, обнаруженной веществу во время опыта;  $t_1$  — время в минутах, соответствующее точкам  $p_1$  (рис. 10 В до Е);  $a$  — пока-

затель уменьшения пористости, проявленной пробой грунта при повышении давления на 1 г на  $см^2$ <sup>1</sup>.

Коэффициент проницаемости определяет скорость, с которой вода выступает на свободной поверхности грунта в том случае, если она проникает через грунт с гидравлическим градиентом, равным единице ( $I=1$ ). С уменьшением содержания воды, другими словами с увеличивающейся плотностью, эта скорость очень быстро убывает.

Поэтому и проницаемость грунта не может быть определена только одним показателем, но выражается целой кривой.

Эта кривая выражает отношение, существующее между содержанием воды и соответствующим ему коэффициентом проницаемости (в сантиметрах в минуту) при температуре  $10^{\circ}C$  и называется кривой водопроницаемости. Коэффициент проницаемости грунта при содержании воды, соответствующем давлению на поверхности в 1,5 кг на  $см^2$  при температуре  $10^{\circ}C$ , называется индексом проницаемости.

Если разделить коэффициент проницаемости, соответствующий данному давлению, на произведение  $a(1+e)$ , то получают соответствующий этому давлению коэффициент затвердевания (*Verfestigungsziffer*). В отличие от коэффициента проницаемости коэффициент затвердевания почти не зависит от содержания воды и представляет собой удобную меру для той скорости, с которой грунт приходит в состояние покоя после изменения давления, последовавшего вследствие увеличения или снижения нагрузки. Кривая затвердевания представляет собой соотношение, существующее между содержанием воды (или коэффициентом пористости) и соответствующим коэффициентом затвердевания.

2. *Нормализованное испытание консистенции* (Terzaghi, U. S. Bureau of Public Roads). Насыщенная водой проба грунта сначала отжимается в течении 48 часов при давлении в 3 кг на  $см^2$  в условиях, препятствующих ее расширению в стороны, причем избыточная вода удаляется через пористую подкладку. После этого пробе дают возможность всасывать воду в течении от 24 до 48 часов. Наконец, из полученного таким образом материала вырезают цилиндр высотой в 2,5 и диаметром в 2,5 см.

Под истинной нормальной консистенцией резюмируют такую, которая отвечает давлению в килограммах на квадратный сантиметр, необходимому для сжатия цилиндра до  $\frac{4}{5}$  его начальной высоты при постоянном содержании воды и в условиях затрудненного его расширения в стороны. Истинная нормальная консистенция служит мерой истинного сцепления, приобретаемого грунтом под влиянием вышеописанной подготовки.

---

<sup>1</sup> Математическое обоснование этого способа и подробное указание областей его применения имеется у Terzaghi, Principles of Final Soil Classification, Public Roads, vol. 7, № 3, Maj 1927. Этот способ испытания может применяться только для сильно глинистых грунтов с очень слабой проницаемостью. При грунтах с более сильной проницаемостью процесс уплотнения протекает так быстро, что наблюдение за ним с должной степенью точности становится невозможным. Для таких материалов нормализованное испытание уплотнения дает представление только об условиях прочности и упругости. Проницаемость определяется здесь независимым испытанием по способу, упоминаемому в рубрике „в“ (табл. II).

3. *Испытание трения.* Это испытание может быть произведено или по способу, указанному на стр. 30, или же следующим образом. Тонкий слой связанной разновидности грунта заключают между двумя шероховатыми пластинами; верхнюю из них нагружают грузом  $Q$  и определяют горизонтальную составляющую силу  $P$ , необходимую для того, чтобы сдвинуть верхнюю пластину параллельно нижней, другими словами чтобы сколоть находящийся между пластинами слой породы в направлении его наибольшего плоскостного протяжения. Некоторые исследователи применяли также приборы, в которых скольжение вызывается вращением верхней пластины вокруг ее вертикальной оси<sup>1</sup>.

Главные затруднения в постановке опытов заключаются в регулировании самого процесса удаления избыточной воды, в пределах от полного удержания воды до предоставления ей совершенно свободного выхода, а также в воспрепятствовании потери воды вследствие испарения. При неудовлетворительном выполнении этих условий извлечение из результатов испытания безупречных в физическом отношении выводов представляется невозможным. Первое условие может быть выполнено путем надлежащего выбора материала для пластин; выполнение же второго условия достигается тем, что испытание производится под водой, или же испытуемый материал заключается в замкнутое пространство, наполненное насыщенным водяным паром. Вследствие трудности строгого соблюдения перечисленных условий техника испытания трения заставляет еще желать многого.

Физическое значение результатов испытаний было пояснено на стр. 28 — 32.

4. *Испытание сопротивления действию воды* (Slaking value test, U. S. Bureau of Public Roads) ведет свое начало от прежних европейских методов испытаний подобного же рода.

Показатель размокания определяется временем в минутах, в течении которого цилиндр (2,5 см высотой и 2,5 см диаметром), сформованный из грунта в твердопластичном состоянии и просушенный в печи при 105° С, будучи облит водою, распадается и проваливается через кольцевую подставку, на которой он лежал. Процесс размокания, как физическое явление, представляется примерно в следующем виде: высушенная проба находится под высоким капиллярным давлением. В момент обливания водою поверхностное натяжение воды в смоченной части пробы становится равным нулю, и проба упруго расширяется. Вследствие незначительной пропускной способности плотного материала разбухание лишь медленно распространяется от поверхности внутрь пробы, и тело последней растрескивается вследствие вторичных напряжений, развивающихся под влиянием неравномерного расширения. Показатель размокания повидимому зависит главным образом от величины разбухания, проницаемости и истинной нормальной консистенции. Показатель размокания представляет собой меру сопротивления связанных грунтов эрозионному влиянию периодических водных потоков (например, в дорожных канавах). Сущность сопро-

<sup>1</sup> Опыты американского Foundation Committee. См. Terzaghi. Erdbaumechnik, S. 56.

тивления грунтов действию воды в настоящее время исследуется, и методы испытаний совершенствуются.

*1 ГРУППА (в). 5. Испытание нагрузкой.* На выровненную поверхность слоя грунта накладывают жесткую пластину и нагружают ее, постепенно увеличивая груз. Два или три раза в этом испытании делают перерыв, продолжительностью в один или несколько дней для того, чтобы произвести наблюдение над увеличением осадки при постоянной нагрузке. Наконец, нагрузку постепенно удаляют.

Результаты наблюдений изображаются графически (кривые осадки рис. 11). Обыкновенно применяют штампы с поверхностью основания в 30 на 30 см. Если пробу нагрузкой предпринимает на дне ямы, последняя должна быть по меньшей мере в пять раз шире чем штамп.

Коэффициент постели (Bettungsziffer)<sup>1</sup> (Енгессер) представляет нагрузку в килограммах на квадратный сантиметр, которая необходима для того, чтобы вызвать осадку величиной в 1 см.

Испытание нагрузкой есть не что иное, как испытание давлением при частично затрудненном расширении нагруженного материала в стороны. Поэтому и кривая осадки представляет собою нечто среднее между изображениями, получаемыми при испытаниях проб, с одной стороны полностью ограниченных с боков, с другой — с совершенно свободными боковыми поверхностями.

Результаты испытания дают точку опоры для суждения о сопротивлении нагрузке верхнего слоя грунта (толщина этого слоя равна примерно диаметру нагруженной поверхности).

*6. Испытание проницаемости.* Значение показателя проницаемости было уже выяснено на стр. 36—37. Описание испытания проницаемости имеет целью внести ясность в представление о проницаемости грунта в его естественном (ненарушенном) состоянии.

Для проведения этого испытания проба, вырезанная или выштампованная из грунта и предохраненная от высыхания вплоть до начала испытания, переносится в открытый сверху и снизу цилиндр, причем как оскобленные боковые поверхности цилиндрической пробы, так и внутренние стороны цилиндра предварительно тщательно покрываются парафином. После этого промежуток между пробой грунта и цилиндром заливается парафином, цилиндр с пробой помещается в аппарат для измерения проницаемости, и определяется количество воды, профильтровывающееся через материал при напоре определенной высоты.

Коэффициент проницаемости определяется как частное от деления количества воды, протекающего через единицу поверхности грунтового слоя на падение гидравлического напора (hydraulischen Gefälle)<sup>2</sup>, иначе говоря, этот коэффициент представляет частное от деления разности между давлениями на верхней и нижней стороне цилиндра на длину пути просачивания. Этот коэффициент, однако, имеет физическое значение лишь в том случае если поток протекающей через грунт воды следует закону Дарси, т. е., если скорость потока возрастает пропорционально гидравлическому уклону ( $J$ ).

<sup>1</sup> Прим. ред. Коэффициент постели иначе называется коэффициентом осадки.

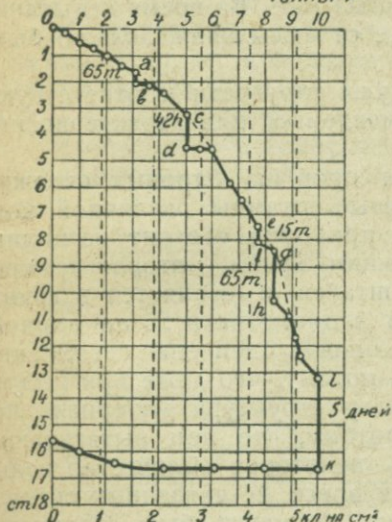
<sup>2</sup> Гидравлический уклон (градиент).

Для сильно проницаемых крупнозернистых разновидностей грунта (крупный песок, щебень), так же как и для связанных сцеплением грунтов, находящихся в состоянии раскрашивания (грунты в обла-

Нагруженная поверхность  $1790 \text{ см}^2$

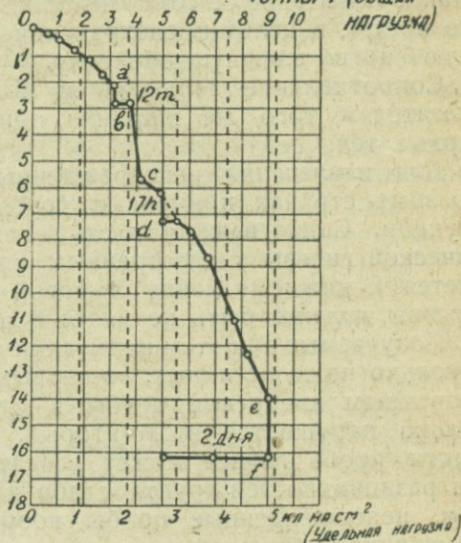
Пробная яма N1

$2,90 \times 1,20 \text{ м}$  Глубь  $18 \text{ м}$  Тонны = Р



Пробная яма N2

$2,50 \times 1,20 \text{ м}$  Глубь  $2,0 \text{ м}$  Тонны = Р (Общая нагрузка)



Осадка пластины при постоянной нагрузке

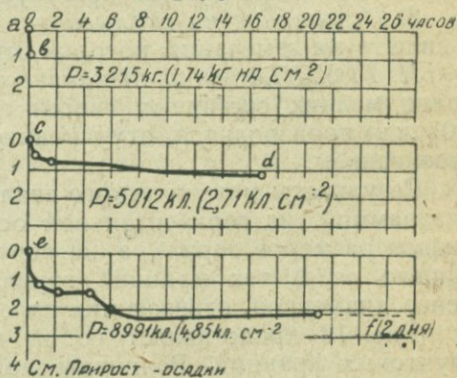
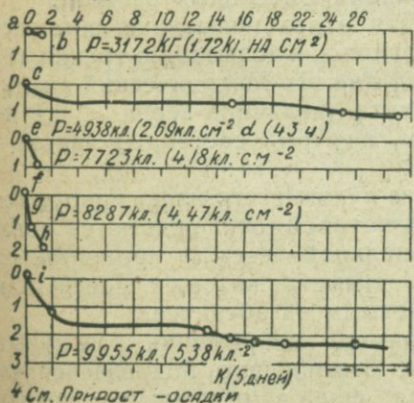


Рис. 11. Испытание нагрузкой в Паша-Лимане (Малая Азия). Грунт: старая искусственная насыпь из суглинка со щебнем. Зеркало грунтовых вод — на высоте дна пробной ямы. Грузовая пластина (штамп) —  $42 \times 42,5 \text{ см}$ . Нагруженная поверхность (площадь штампа) —  $1790 \text{ см}^2$ . Скорость повышения давления — 2 тонны в час. Переводное число (груз Р: давление на штамп) равно 1 : 0,96. Абсциссы — нагрузка в тоннах; ординаты — осадка штампа в сантиметрах.

стях годовых колебаний температуры и влажности), этот закон не подтверждается даже приблизительно, в этом случае проницаемость материала, даже при одной и той же степени плотности его, не поддается определению одним показателем, но может быть характе-

ризована только кривой или уравнением, выражающим отношение между протекающим количеством воды и падением гидравлического напора.

7. *Испытание консистенции.* При помощи трубчатого штампа из грунта извлекают неповрежденную цилиндрическую форму пробы, тут же на месте запечатывают оба конца находящейся в трубе пробы парафином и затем производят над ней в лаборатории нормальное испытание ее сопротивления давлению. Во время испытания тело пробы, в целях предохранения ее от высыхания, должно быть заключено во влажную оболочку.

Сопротивление давлению и модуль упругости соответствуют показателям того же названия, применяемым для характеристики твердых тел.

Для извлечения неповрежденных проб из буровых скважин в разных странах применяют трубчатые штампы различной конструкции. Самая важная часть этих приборов состоит из цилиндрической гильзы с заостренным нижним краем, которая прикрепляется к нижнему концу буровой штанги и вгоняется в грунт. Образцы должны быть не менее 3 см в диаметре и 25 см длиной.

Получаемые при этом испытании величины сцепления несомненно несколько ниже истинных, во-первых, потому, что даже при весьма осторожном внедрении трубы в породу структура материала несколько нарушается и, во-вторых, потому, что при вытягивании штанги проба грунта может всосать некоторое количество воды. Для разновидностей грунта слабо или вовсе не связанных сцеплением, неповрежденные пробы вообще не могут быть получены применением для этой цели простых буровых инструментов, которыми обычно пользуются при глубинно-строительных работах.

8. *Испытание на скалывание.* Для этого испытания остаются в силе те же замечания, которые относились к испытанию трения (3).

II. ГРУППА (а). 9. *Механический анализ.* Механический анализ более мелких составных частей грунта (величина зерна  $< 0,1$  до  $0,07$  мм) производится отмучиванием, а грубых составных частей — отсеиванием.

Результаты механического анализа лучше всего иллюстрируются диаграммой, на горизонтальной оси которой откладываются логарифмы размеров зерна<sup>1</sup>, а на вертикальной — веса (в процентах от общего веса) тех фракций грунта, диаметр которых равен или менее диаметров, отвечающих отложенным на абсциссе.

Рис. 12 представляет собой пример изображения различных грунтовых фракций. Величины зерна, отвечающие подразделениям на фракции, и в настоящее время еще в различных странах различны. Так, например, U. S. Bureau of Soil считает границей между частицами ила и коллоидальными частицами размер в  $0,005$  мм, между тем как в Европе придерживаются принятого Аттербергом предела в  $0,002$  мм.

„Эффективная крупность зерна“ (Аллен Газен), это та величина зерна, которая на рис. 12 соответствует ординате в 10%. Она отвечает величине зерна грунтовой массы, сложенной

<sup>1</sup> Нанесение делений соответственно логарифмам величины зерна производится для того, чтобы увеличить интервалы между зернами более мелкого порядка.

из равновеликих зерен, и с водопропускной способностью, равной водопропускной способности грунта, состоящего из зерен неодинаковой формы (естественного грунта). Это определение понятия „эффективная крупность“ чисто эмпирического происхождения и отнюдь не безупречно.

Коэффициент неравномерности представляет собой отношение между диаметрами, отвечающими на рис. 12 ординатам в 60 и 10%, он служит мерою степени неоднородности материала.

Механический анализ связанных грунтов имеет цену лишь в том случае, если он доводится до выделения частиц ила (Schlamm) (частиц грунта  $< 0,002$  мм). В этом случае он занимает однако очень много времени.

Успешное проведение анализа ила требует предварительной физической или химической обработки грунтовой пробы (кипячения, промы-

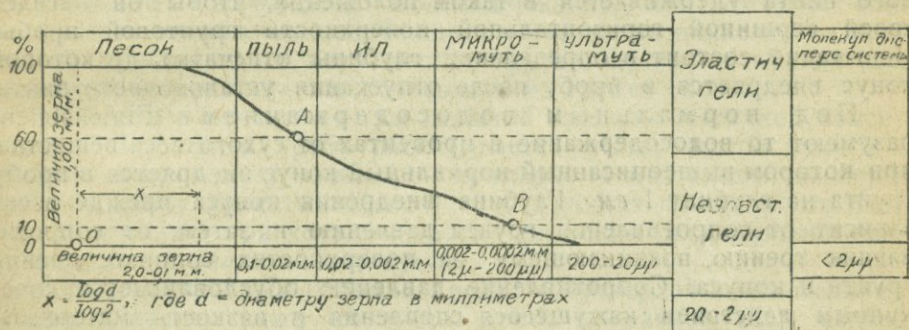


Рис. 12. Графическое изображение результатов механического анализа грунтов (кривая распределения отдельных фракций).

вания дистиллированной водой или обработки аммиаком), и взгляды на способы обработки грунта, обуславливающие возможность его безукоризненного дисперсирования, в настоящее время еще различны. Грунты с почти тождественными кривыми распределения могут проявлять весьма различные физические свойства, откуда можно вывести заключение, что в процессе образования общего физического характера грунта, наряду с крупностью, неравномерностью и формой зерна, выдающуюся роль играют также и другие факторы. При этих условиях механический анализ нельзя рассматривать как идеальный метод испытания. Результаты микроскопического определения формы зерна поддаются выражению цифрами лишь неудовлетворительно и грубо приближенно.

10. *Определение удельного веса.* Оно основано на измерении количества жидкости, вытесняемого твердыми зернами (способ пикнометра). Кипячение пробы в целях удаления пузырьков воздуха, в случае тонкозернистых разновидностей грунта, представляется неизбежным. Определение удельного веса мельчайших частиц может быть произведено лишь грубо приближенно, так как частички как в воздухе, так и в жидкости, покрыты адсорбированным слоем постороннего материала. Чем больше удельная поверхность грунта, тем значительнее ошибка, вызываемая явлениями адсорбции. Это проявляется между прочим в том, что для удельного веса тонко-

зернистых разновидностей грунта получают различные значения в зависимости от рода жидкости, примененной для его определения.

11. *Испытание прокаливанием.* Количество углерода, содержащегося в органических составных частях грунта, определяется после предварительного разложения неорганических карбонатов соляной кислотой, исходя из количества углекислоты, развивающейся при прокаливании.

Присутствие органической субстанции имеет несомненно большое влияние на физические свойства грунта, но сущность этого влияния в отдельных случаях до настоящего времени неизвестна.

12. *Нормализованное испытание конусом* (Шведская геотехническая комиссия). Для производства этого испытания служит латунный конус (нормальный конус) с углом конусности в  $60^\circ$  и весом в 60 г. До начала испытания конус при помощи установочного винта удерживается в таком положении, чтобы он касался своей вершиной горизонтальной поверхности грунтовой пробы. Испытание состоит в определении глубины отпечатка, до которой конус внедряется в пробу после отпускания установочного винта.

Под нормальным водосодержанием (Finlekstalen) разумеют то водосодержание в процентах от сухого веса вещества, при котором вышеописанный нормальный конус внедряется в пробу грунта на глубину 1 см. Глубина внедрения конуса прежде всего зависит от сопротивления грунта давлению и затем, от сопротивления трению, возникающему на поверхностях соприкосновения грунта и конуса. Сопротивление давлению обусловливается совокупным действием кажущегося сцепления и вязкости материала. Измеренная величина таким образом в физическом отношении отнюдь не проста по своему происхождению. Несмотря на это, результат испытания дает нам точку опоры для суждения о том водосодержании, при котором сцепление материала приобретает определенное значение. Это водосодержание в общем увеличивается с уменьшением крупности зерна. Поэтому шведские исследователи сначала принимали нормальное водосодержание за меру тонкозернистости грунта; впоследствии они отказались от этой мысли.

13. *Определение Аттербергских пределов* (А. Аттерберг, Колмар). Если густая смесь из воды и разновидности связанного грунта путем постепенного высыхания переходит из текучей в более твердую форму консистенции, то физические свойства грунта меняются заметным на-глаз образом. Прежде всего грунт теряет способность течь под влиянием собственного веса, и его становится возможным разминать, но он прилипает при этом к шпателью, которым производится размешивание (липкость). При дальнейшем высыхании грунт утрачивает свою липкость, затем также и разминаемость и переходит в полутвердое состояние. Наконец, цвет грунта переходит из темного в светлый (поворотный пункт Бемелена), и материал становится хрупким. До поворотного пункта процесс усыхания связан с уменьшением объема (усадка). Далее объем пробы остается неизменным, несмотря на то, что вес ее продолжает уменьшаться и дальше вплоть до удаления содержащейся в порах воды, могущей испаряться при комнатной температуре. Аттербергские пределы консистенции дают в процентах от сухого веса те содержания воды, при которых в грунте наблюдаются границы

отдельных переходов его из одной консистенции в другую, иными словами, те водосодержания, при которых в процессе высыхания грунта его физические свойства меняются видимыми скачками. Аттерберг определяет пределы консистенции следующим образом.

Верхний предел текучести. На горизонтальной поверхности кашицеобразного грунта округленным концом стеклянной палочки проводится бороздка. В фазе „верхний предел“ эта бороздка в течении полминуты должна почти исчезнуть.

Нижний предел текучести (верхний предел пластичной консистенции). В фарфоровой чашке готовится коровай из грунта примерно 4 см диаметром и 1 см толщиной и разделяется бороздой на две половины, нижние края которых едва соприкасаются между собой. В фазе „нижний предел текучести“ обе половинки должны при повторном встряхивании слиться между собой по линии раздела на высоте до 1 мм.

Предел липкости. Водосодержание, при котором еще оказывается возможным освободить поверхность никкелевого шпателя от приставших к нему частиц грунта, путем обтирания его о гладкую поверхность изготовленного из грунта коровай<sup>1</sup>.

Предел пластичности (нижний предел пластичной консистенции). Грунтовая проба раскатывается между листом бумаги и ладонью в проволоку диаметром примерно 4 мм; проволока перегибается, снова раскатывается, и т. д. Граница пластичности дает водосодержание, при котором проба при таком раскатывании разламывается на более мелкие куски.

Предел усадки (нижний предел полутвердой консистенции). Водосодержание, ниже которого проба сохраняет свой объем, несмотря на продолжающееся высыхание. Предел усадки примерно соответствует водосодержанию, при котором меняется окраска.

Физическое значение пределов консистенции можно уяснить себе приблизительно следующим образом.

Верхний предел текучести по видимому соответствует примерно тому максимальному количеству воды, которое может удерживаться тонким слоем грунта без того, чтобы последний давал с течением времени осадку под влиянием своего собственного веса.

При этом пределе сложение связанного грунта соответствует примерно сложению чистого, не связанного сцеплением песка в его наиболее рыхлом состоянии. Величина этого предела явно зависит от крупности зерна, формы его и степени слипания частиц грунта между собой.

Нижний предел текучести соответствует примерно тому наиболее плотному сложению песка, которое может быть ему придано простой утряской, без оказания на него статического давления.

Физическое значение предела липкости пока еще не выяснено.

Наличие предела пластичности определяется способностью грунта разминаться, а эта последняя, другими словами способность грунта выкатываться в проволоку, по Аттербергу, проявляется лишь в том случае, если в грунте имеются чешуеобразные составные части. Показатель пластичности (разница между нижним пре-

<sup>1</sup> Прим. ред. Испытание липкости у нас производится в приборе Охотина (см. Иванова „Грунтовые дороги“).

Делом текучести и пределом пластичности) для микроскопических и субмикроскопических песков, совершенно лишенных слюды, равен нулю, другими словами свойство пластичности связано с наличием в грунте чешуеобразных составных частей (см. стр. 54). При равномерной крупности зерна показатель пластичности вообще увеличивается с увеличением содержания в грунте чешуеобразных составных частей. При одинаковом процентном содержании чешуеобразных частиц показатель пластичности возрастает с уменьшением крупности зерна.

Предел усадки представляет собой меру того максимального уплотнения, которое грунт может испытывать под влиянием капиллярного давления (влияние поверхностного натяжения воды).

14. *Определение предела насыщения* (J. v. Krogh, Норвежская комиссия по минеральному сырью). Увеличивают водосодержание смеси глины с водой путем постепенного прибавления воды до тех пор, пока материал станет настолько подвижным, что крутые стороны сделанного в нем вреза в состоянии покоя еще обладают некоторой устойчивостью, но при малейшем встряхивании сосуда сливаются между собой. Предел насыщения дается в форме того водосодержания, выраженного в процентах от сухого веса, которое материал обнаруживает в этом состоянии.

15. *Испытание нормальной консистенции* (J. v. Krogh). Смешанную с водой пробу выкатывают между ладонями в шарик. Нормальная консистенция соответствует тому водосодержанию, выраженному в процентах от сухого веса, которое присуще шарiku в тот момент, когда он перестает оставлять на ладони следы глины.

16. *Опыт Меллора* (И. В. Меллор). Измеряют то давление, которое необходимо произвести, чтобы вызвать образование трещин в пластичных грунтовых шариках с различным водосодержанием, а также ту величину сжатия, которую обнаруживают шарики в момент появления первой трещины.

Величина пластичности определяется наибольшим из произведенных давления на сжатие, получающихся для различных шариков (наибольшая величина деформационной работы, затрачиваемой до появления трещины). Эта наибольшая величина, по Меллору, представляет собой меру степени пластичности грунта.

17. *Испытание пластичности по Бишоффу*. Смешивают одну весовую часть грунта с 1, 2, 3, ... весовыми частями чистого песка, формируют из смеси маленькие цилиндры и после высыхания испытуемых тел проводят по их поверхности взад и вперед 25 раз влажной кистью. Наиболее богатая песком смесь, поверхность которой при этой манипуляции только еще проявляет заметную выпуклость (Сопвех), принимается за меру связности или пластичности. Связность представляет собой явную меру упругости (способность разбухания) грунта и имеет к пластичности лишь косвенное отношение.

18. *Эквивалент влажности* (Moisture Aequivalent). Мягкую пластичную массу, состоящую из 5 г грунта (сухой вес) и воды, подвергают действию центрофуги, число оборотов которой так рассчитывается, чтобы центробежная сила была в тысячу раз больше силы тяжести. Эквивалент влажности определяется водосодержанием пробы, получающимся после пропуска ее через центрофугу в про-

должении одного часа. Для тощих грунтов эквивалент влажности представляет собой меру их проницаемости, для жирных грунтов — меру сжимаемости.

Эквивалент влажности зависит от количества грунта, величины центробежной силы и продолжительности действия ее. Физическое значение этого показателя представляется, поэтому, весьма сложным.

19. *Испытание по Розе* (А. К. Розе, U. S. Bureau of Public Roads). Небольшую пробу высушенного и измельченного в порошок грунта смешивают с водой, выглаживают поверхность пробы и капают на нее каплей воды.

Эквивалент полевой влажности соответствует наименьшему водосодержанию, при котором капля сохраняется на поверхности пробы без того, чтобы в нее постепенно всасываться. Он представляет собой, таким образом, меру наиболее плотного состояния грунта, в котором последний может находиться, не разбухая, при доступе к нему воды.

Испытание по Розе пользуется большим успехом среди инженеров дорожного строительства в западных штатах Америки.

20. *Определение капиллярной влагоемкости* (U. S. Bureau of Public Roads). Капиллярная влагоемкость (Capillary moisture) дается в процентах от сухого веса и представляет то водосодержание, которое обнаруживает высушенная и измельченная в порошок проба грунта, набитая слоем в 10 см в стеклянную трубку диаметром в 25 мм, после того, как эта трубка нижним концом погружается в воду и насыщение достигает своего максимума. Результаты испытания в высокой степени зависят от способа набивки пробы, а также и от других факторов, трудно поддающихся контролю.

21. *Испытание твердости в сухом состоянии*. Твердость в сухом состоянии соответствует сопротивлению давлению в килограммах на 1 см<sup>3</sup> цилиндра, изготовленного из грунта в пластическом состоянии, высушенного сначала при комнатной температуре, а затем при температуре 105°C. Твердость в сухом состоянии представляет собой результат совокупного действия сцепления и максимального внутреннего трения, которые развиваются под влиянием капиллярного давления.

22. *Испытание адсорбции* (U. S. Bureau of Public Roads). Через пробу грунта профильтровывают раствор 1 части метилвиолета на 1000 частей воды и определяют то количество воды, которое вышло из пробы до момента появления в воде первого признака окрашивания.

Величина адсорбции представляет собой частное от деления количества обесцвеченной грунтом воды (в кубических сантиметрах) на вес сухой пробы (в граммах). Она зависит от крупности зерна, химических свойств мельчайших частичек грунта, а также от рода и степени адсорбционного насыщения грунта. Так как относительное значение влияния этих факторов неизвестно, то и уяснение физического значения величины адсорбции в настоящее время не представляется возможным.

II ГРУППА (в). 23. *Определение водосодержания* (влажности). Определение водосодержания и связанные с ним измерения имеют целью дать количественную характеристику того состояния грунта, в котором он встречается в природе. Водосодержание дается в про-

центах или от сухого, или от общего веса пробы. Поэтому данные о водосодержании должны всегда сопровождаться указаниями, к какому из этих весов они относятся.

Пористость определяется частным от деления объема пустот на общий объем пробы.

Коэффициент пористости (приведенная пористость) представляет собой частное от деления объема пор на объем, заполненный сухим веществом пробы.

Для определения относительной плотности необходимо знать коэффициент пористости материала в состоянии его наиболее рыхлого сложения ( $e_0$ ), естественного сложения ( $e$ ) и того сложения, которое он принимает после основательной утряски без оказания на него статического давления ( $e_1$ ).

Относительная плотность равна частному от деления разности ( $e_1 - e$ ) на разность ( $e_1 - e_0$ ). Она принимается во внимание исключительно при материалах, не связанных сцеплением, с консервативной структурой (пески). То же самое следует сказать и об относительной влажности, определяемой частным от деления части объема пор, заполненной водой, на общий объем пор.

Для того чтобы вычислить вышеупомянутые показатели, нужно получить непосредственными измерениями следующие данные: величину  $V$  объема занимаемого пробой, потерю в весе  $W$ , испытываемую пробой при высушивании, вес сухой пробы  $G$  и удельный вес  $S$  сухого вещества. Согласно сказанному, объем пор определяется из выражения

$$\frac{V - \frac{G}{S}}{V} = 1 - \frac{G}{V \cdot S},$$

а коэффициент пористости из выражения

$$\frac{V - \frac{G}{S}}{\frac{G}{S}} = \frac{V \cdot S}{G} - 1.$$

24. Испытание конусом (Шведская геотехническая комиссия). Испытание производится способом, указанным в п. 12, причем, однако, испытывается проба грунта с его естественным водосодержанием<sup>1</sup>. Измеряют глубину, до которой конус внедряется в пробу, и из измеренной величины при помощи эмпирически полученных кривых выводят показатель консистенции грунта.

Показатель консистенции определяется одной шестой частью того веса (в граммах), который должен был бы иметь нормальный конус для того, чтобы внедриться в пробу на глубину 1 см.

Показатель консистенции, даже при одинаковом водосодержании, в значительной мере зависит от того, производится ли испытание пробы в состоянии ее первоначального сложения, или же после

<sup>1</sup> Прим. ред. Естественная влажность.

Таблица III.

Константы рунта	Тонкий песок	Пылевид- ный грунт (Schluff)	Ил (пыле- видный грунт с со- держанием органиче- ских веществ)	Песчани- стая глина	Глина
<b>Группа Ia</b>					
Величина разбуха- ния . . . . .	260—130	130— 25	130—25	260—65	70—8
Величина уплотне- ния . . . . .	100—15	20—15	20—5	50—15	20—1
Индекс проницае- мости в см в ми- нуту . . . . .	1 —10 <sup>-5</sup> ]	10 <sup>-4</sup> —10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-4</sup> —10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-4</sup> —10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-5</sup> —10 <sup>-8</sup>
Коэффициент зат- вердевания . . .	500—1	10—0,01	1—0,005	10—0,01	0,02—0,001
Сила сцепления в кг на см <sup>2</sup> . .	очень мала	0,8—5	0,8—5	2,0—5,0	0,8—10
Показатель размо- кания . . . . .	0—5 мин.	5 мин. до 1 часа	1 час до нескольких дней	5 мин до 1 часа	10 мин. до нескольких дней
<b>Группа Ib</b>					
Эффективная круп- ность зерна в мм . . . . .	0,2—0,02	0,02—0,002	0,02—0,002	0,02—0,002	0,002
Коэффициент не- однородности .	1,5—5 в ис- ключит. слу- чае выше	21—10	2—10	10—200	10—100
Содержание орга- нического угле- рода . . . . .	0	0	0,5—3,0	0	0
Нормальное водо- содержание (нор- мальная влаж- ность) . . . . .	30	30—38	90	?	38—90
Нижний предел те- кучести . . . . .	12—25	23—40	25—80	20—35	30—150
Предел раскаты- ваемости . . . .	нет	18—25	20—65	20—25	20—50
Предел усадки . .	12—25	10—25	10—25	10—20	8—25
Показатель пла- стичности . . . .	0	5—15	5—15	0—10	10—100
Эквивалент влаж- ности . . . . .	5—20	15—25	20—50	12—25	20—100
Твердость в сухом состоянии . . . .	0—5	5—30	5—30	20—40	30—100
Величина адсорб- ции . . . . .	0—5	5—30	5—30	10—50	30—250

частичного или основательного нарушения этого сложения (см. рис. 3).

Наряду с вышеприведенными методами испытаний в специальной литературе имеются указания еще на много других методов, основанных на тех же или сходных с ними принципах.

Табл. III дает приблизительное представление о тех значениях, которые могут принимать некоторые из приведенных в таблице II показателей для главных типов разновидностей грунта, имеющих значение при подземном строительстве. Помеченные в каждом столбце цифры относятся к грунту, характеризованному буровым мастером тем названием его, которое указано в заголовке соответственного столбца. Разница между свойствами различных разновидностей грунта гораздо яснее еще выделяется на рис. 16, с пояснениями к нему, приводимыми на стр. 63.

**Сущность характера глины и физическое значение чешуеобразных составных частей грунта.** Различия между песком и глиной, иллюстрируемые табл. III и рис. 5, настолько общеизвестны, что прямо-таки напрашивается вопрос о физических причинах, лежащих в основе этих различий. Представления, которые мы в настоящее время имеем об этих причинах, являются результатом исследований последних двадцати лет и создавались лишь медленно.

В более старых сочинениях придерживались того взгляда, что характерные для глины свойства следует приписать содержащемуся в глине коллоидальному веществу. Другие авторы пытались привести характерные свойства глинистых грунтов в причинную связь со свойствами каолина (водный силикат алюминия).

В противоположность этому уже Фогт (1897), Ортон (1901) и Ле-Шателье (1909) принимали, что глинистый характер обуславливается чешуеобразной формой глинистых частиц. В обоих случаях, однако, дело сводилось лишь к чистым гипотезам. Первое экспериментальное подтверждение теории чешуйчатости дали опыты Аттерберга<sup>1</sup>, которому удалось, путем размалывания окристаллизованных минералов с листоватой структурой, получить порошки со свойствами, во всех отношениях отвечающими свойствам типичных глин. Наибольшую пластичность проявили приготовленные из мусковита и талька коллоидальные шламмы. Несмотря на это, исследователи многих стран, в особенности Соединенных Штатов, продолжали придерживаться „коллоидальной теории“, согласно которой грунтовые коллоиды глины должны коренным образом отличаться от более грубых составных элементов горной породы.

В 1921 г. Терзаги, на основании экспериментальных данных, указал на огромную разницу, существующую между свойствами (сжимаемость, упругость), обуславливающими сопротивление давлению, с одной стороны, песка, с другой — глины, и приписал эту разницу чешуеобразной форме глинистых частиц<sup>2</sup>. В 1923 г. Круг опубликовал результаты своих исследований об отношении глины к производимому на нее высокому давлению в условиях,

<sup>1</sup> A. Atterberg. Die Plastizität und Bindigkeit liefernden Bestandteile der Tone. Intern. Mitt. für Bodenkunde, 1919.

<sup>2</sup> Terzaghi. Die physikalischen Grundlagen des geologischen Gutachtens. Zeitschr. d. österr. Ing. und Arch. Ver., 1921.



Второй комплекс вопросов касался отношений между глиной и водой. В 1920 г. Терцаги опубликовал результаты наблюдений, из которых явствовало, что заключенная между двумя стеклянными пластинками пленка воды при комнатной температуре не испаряется, если толщина этой пленки меньше 100  $\mu$ <sup>1</sup>.

В 1921 г. тот же автор на основании результатов испытаний проницаемости пришел к заключению, что вязкость воды, заключенной в порах глины, должна быть значительно больше, чем вязкость воды, находящейся в микроскопических пустотах<sup>2</sup>. В том же году Боюкос (Boyoucos), в Мичигане, указал на то, что часть заключенной в порах глины воды не замерзает даже при температуре  $-78^{\circ}$ <sup>3</sup>, а В. Д. Гаркинсу, в Чикаго, удалось доказать, что плотность воды, заключенной в очень малых пустотах, значительно выше единицы<sup>4</sup>. Гаркинс высказал мнение, что большая плотность объясняется огромным развивающимся в ней давлением (величина этого давления порядка 20 000 атм.). Терцаги возражал против этого взгляда на основании того факта, что высокое давление вызывает повышение относительной упругости пара и уменьшение вязкости, между тем как свойства содержащейся в глине воды отступают от ее нормальных свойств в противоположном направлении. Чтобы согласовать между собой наблюденные факты, Терцаги пришлось допустить, что вода в соседстве с твердыми частицами, поверхность которых она смачивает, находится в полутвердом состоянии<sup>5</sup>. Это затвердевание можно объяснить подавлением колебаний молекул жидкости под влиянием обоюдного воздействия движений молекул жидкой и твердой фаз на поверхности их раздела. Энергия, освобождающаяся при переходе воды из ее нормального в полутвердое состояние, проявляется в форме тепла, развивающегося при смачивании и разбухании.

Согласно этому представлению глину можно рассматривать как смесь из более грубых зерен и чешуеобразных минеральных частиц, пустоты которой наполнены полутвердевшей водой, обладающей способностью сопротивления давлению, растяжению и скалыванию. Вопрос об отдельных моментах молекулярно-физического процесса и о минералогическом характере чешуеобразных составных частей остался открытым.

Третий вопрос, оставшийся без ответа, касался малой величины коэффициента внутреннего трения глин. Коэффициент внутреннего трения грубозернистой смеси из песка и слюды примерно равен тому же показателю для песка (0,65 и выше). Так как показатель внутреннего трения для жирной глины не превышает 0,25, то содержащаяся в глине вода должна повидимому выполнять роль

<sup>1</sup> Terzaghi. New facts about surface friction. Physicol Review, 1920.

<sup>2</sup> Цифровые данные имеются у Terzaghi. Versuche über die Viskosität des Wassers in sehr engen Durchgangsquerschnitten. Zeitschr. für angew. Math. und Mechanik, 1924.

<sup>3</sup> G. I. Boyoucos. The amount of unfree water in soils at different moisture contents. Soil Science, vol. XI, № 4, 255—259, 1921.

<sup>4</sup> W. D. Harkins and D. G. Ewing. A high pressure due to Adsorption and the density and the volume relations of Charcoal. Journal Am. Chemical Society, vol. XLIII, S. 17-7—1802, 1921.

<sup>5</sup> Terzaghi. The Mechanics of Adsorption and the Swelling of Gels. Fourth Colloid Symposium Monograph, 1926.

„смазки“; согласно же опытам В. В. Гарди (W. V. Heardy), произведенным над трением в микроскопических телах, вода, наоборот, играет роль „противосмазки“, т. е. влияет в сторону увеличения трения. Явление уменьшения трения смазывающими веществами Терцаги объяснял тем, что молекулы смазочных веществ биполярны и располагаются своими осями в направлении, перпендикулярном к плоскостям трения<sup>1</sup>. Однако причина, по которой молекулы воды в порах глины стали бы располагаться подобным образом, осталась невыясненной.

Перечисленные пробелы были недавно заполнены благодаря исследованиям, произведенным под руководством Гольдшмидта в Минералогическом институте Университета города Осло<sup>2</sup>. Гольдшмидт исходил из того факта, что чешуеобразные минеральные составные части имеют пластинчато-решетчатую форму слоения (Schichtgitterstruktur). Плоскости спайности состоят из особенно активных положительных или отрицательных ионов и образуют сильное электрическое поле. Как только жидкость с биполярными молекулами (вода, SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> и др.) попадает в сферу действия поля, молекулы располагаются своими осями в направлении, перпендикулярном к плоскостям спайности. Если сухой порошок глины смешивают с жидкостью, молекулы которой не имеют явно выраженной полярности (например тетрахлоруглерод), то и характерные свойства глины не проявляются. Закономерным расположением молекул воды объясняются как низкая величина коэффициента внутреннего трения, так и связанное с увеличением вязкости состояние, названное Терцаги состоянием „затвердения“.

Вопрос о минералогическом составе глин также был выяснен норвежскими исследователями в отношении глин, находившихся в районе их работ. На основании оптико-химических исследований удалось доказать, что норвежские глины состоят из следующих минеральных частей.

Чешуеобразные минеральные составные части (хлорит, тальк, мусковит, биотит) 12,00—27,68%.

Столбчатые минеральные составные части (роговая обманка, эпидот и др.) 4,53—13,83%.

Грубые минеральные составные части (полевои шпат, кварц, апатит, ильменит, рутил, лимонит) 60,74—72,67%.

Максимальное содержание в норвежских глинах чешуеобразных минеральных составных частей поразительно согласуется с тем, упомянутым на стр. 55, количеством слюды, которое нужно смешать с песком, чтобы получить смесь, по своей объемной упругости (Raumelastizität) соответствующую наиболее жирным американским глинам.

Норвежские исследователи кроме того установили, что содержание чешуеобразных минеральных составных частей повышается с увеличением степени тонкости тех шламмовых продуктов, которые извлекаются из глины механическим анализом, между тем как

<sup>1</sup> Terzaghi. Erdbaumechanik. Wien, Deutike, 1925.

<sup>2</sup> V. M. Goldschmidt. Undersokelser over lersedimenter. Beretning om Nordiske Jordbrugs forskeres Kongres i Oslo, 1926. Nordisk Jordbrugs forskning, 4—7. Hefte.

содержание кварца в этих продуктах с увеличением тонкости их уменьшается.

В том же году Росс и Шаннон, в Вашингтоне, выработали способ минералогического определения составных частей глины и оптического анализа ее сложения<sup>1</sup>. Из их исследований выяснилось, что бентонит и бентонитоподобные глины Соединенных Штатов состоят из следующих минералов: 1) монмориллонит, 2) бейделлит, 3) слюдообразный галлоизит, 4) галлоизит и 5) каолинит. Из этих 5 минералов 1-й, 2-й и 3-й проявляются в форме слюдообразных чешуй, 5-й образует листоватые агрегаты, и только составная часть 4-го или аморфна или субмикрористаллична<sup>2</sup>.

Исследование расположения листочков слюды в осадочных глинах производилось в Осло над тонкими шлифами из проб, предварительно-обожженных при температуре от 500 до 550°. Оказалось, что листочки слюды расположены параллельно друг другу. Тот же факт был недавно доказан экспериментально путем прекрасного опыта, проделанного русскими исследователями в Москве: вертикально поставленная стеклянная трубка, закрытая снизу проницаемой пленкой, была осторожно наполнена глиной, после чего трубку наклонили и нижним концом погрузили в воду. Всаиваемая глиной капиллярная вода поднималась по столбу глины так, что уровень воды все время составлял прямой угол с осью наклоненной трубки, между тем как в приготовленном подобном же образом песчаном столбе уровень капиллярной воды все время оставался горизонтальным, образуя с осью трубки косой угол<sup>3</sup>.

В результате только что приведенных исследований мы в настоящее время имеем уже довольно ясную картину, характеризующую природу глин. Свойство пластичности и незначительное внутренне трение глин связаны с двумя условиями: наличием твердой фазы с значительным процентным содержанием минеральных частиц, обладающих пластинчато-решетчатым сложением (минеральные чешуйки), и жидкой фазы с биполярными молекулами.

Большая сжимаемость глин, их упругость и значительная влагоемкость зависят только от одной причины, а именно от преобладания в них чешуеобразных минеральных частей, так как это свойство безусловно обще как глинам, так и грубозернистым смесям из песка и слюды. То же самое относится и к „разбуханию“, ибо разбухание есть не что иное, как связанное с поглощением воды упругое растяжение поддающегося деформации тела; его можно сравнить с растягиванием мелкопористой предварительно сжатой губки, после устранения под водой производимого на нее давления.

<sup>1</sup> C. S. Ross and E. V. Shannon. The minerals of bentonite and related clays and their physical properties. Journ. American Ceramic Society, 9, S. 77 bic, 96, 1926.

<sup>2</sup> Бентонит представляет собой повидимому продукт отмучивания вулканического пепла. Он почти полностью состоит из коллоидальных частиц, и пределы его консистенции во много раз шире пределов для наиболее жирных нормальных глин Соединенных Штатов.

<sup>3</sup> D. T. Krynin. Elementary proof of scale likeness of clay particles. Public Roads, vol. 8, № 11, 1928. Washington D. C.

Усадка, согласно данным, сообщенным на стр. 29—30, есть также чисто механический процесс, представляющий собой результат совокупного действия капиллярных свойств глины (малый диаметр пор) и большой сжимаемости материала, обусловленной содержанием в нем чешуйчатых частиц. Влиянию на процесс усадки пластинчато-решетчатого строения можно придавать известное значение лишь постольку, поскольку эта структура косвенно обуславливает повышение поверхностного натяжения воды и тем самым повышает максимальную величину капиллярного давления. То же самое относится и к влиянию пластинчато-решетчатого строения на вязкость заключенной в порах воды, а следовательно и на проницаемость глины.

В 1924 г. Терцаги вывел формулы, которые устанавливают влияние малой проницаемости глин на скорость изменения их водосодержания и внутреннего трения, связанных с изменением давления<sup>1</sup>. Тем самым было создано основание для числовой оценки нашего представления о природе глин.

Можно пожелать, чтобы в геологии и геоморфологии несколько мистическое и часто приводящее к недоразумениям выражение „влияние коллоидов“ также было заменено результатами физико-механического анализа, и чтобы всегда правильно оценивался тот простой механизм, путем которого осуществляется столь непонятное на первый взгляд действие коллоидов. Этим могли бы быть устранены многие предубеждения, господствующие в области указанных двух наук.

## 6. ВЫБОР ЦИФРОВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДЛЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ЦЕЛЕЙ.

Само собой разумеется, что при исследовании грунтов для технических целей может приниматься во внимание лишь ограниченное число простых испытаний. Чем больше времени затрачивается на испытание каждой отдельной пробы грунта, тем меньшее число проб может быть исследовано для данного места предполагаемой постройки. Для того чтобы составить себе представление о числе проб, которые необходимо подвергнуть испытанию для суждения о среднем качестве какого-либо пласта, необходимо прежде всего уяснить себе степень неравномерности слоев грунта в его естественном состоянии.

Опыт указывает повидимому на то, что грунтов с совершенно однородным строением слоев в природе не существует. Свойства каждого грунтового слоя меняются как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях. Это справедливо как для грунтов, образовавшихся на месте путем выветривания коренных пород, так и для осадочных слоев, состоящих из несцементированного, связанного или не связанного сцеплением материала. Этот факт проявляется в результатах всех испытаний, которым подвергается исследуемый материал.

В табл. IV сведены результаты испытаний грунтовых проб,

---

<sup>1</sup> Terzaghi. Die Berechnung der Durchlässigkeitsziffer des Tones aus dem Verlaufe der hydrodynamischen Spannungsercheinungen. Sitzber. der Akademie der Wiss., math.-nat. Klasse. Bd. II. Wien, 1924.

которые были добыты в Пенсильвании на участке земли в 8 га из пробных шурфов с глубины от 0 до 3,5 м. Материал предназначался для сооружения намывной плотины, причем результаты испытаний показали, что качество его, несмотря на кажущуюся однородность сложения, в высшей степени изменчиво.

Колебания в составе мощных осадочных пластов грунта находятся в явной связи с историей их происхождения, в виду того, что на составе отдельных слоев отражается изменение как характера, так и направления несущего взвешенный материал водного потока. Наиболее очевидным образом это изменение проявляется

Таблица IV.

№ пробного шурфа	Глубина в метрах	Нижний предел текучести	Предел раскатываемости (предел пластичности)	Показатель пластичности	Эффективная крупность зерна	Коэффициент неравномерности
1	0,6	0,99	0,79	0,20	—	—
1	1,4	—	—	—	—	—
1	1,8	1,00	0,69	0,31	—	—
2	1,2	1,14	0,77	0,37	—	—
2	0,6	0,90	0,75	0,15	—	—
3	—	1,16	0,66	0,50	0,0018	6,1
3	1,8	1,51	0,87	0,64	0,00061	10,7
4	—	0,86	0,54	0,32	0,0027	10,4
5	—	1,12	0,60	0,52	0,00095	11,5
6	—	1,11	0,57	0,54	0,00196	6,1
7	0,3	0,99	0,69	0,30	—	—
7	1,2	0,84	0,58	0,26	—	—
7	2,1	1,19	0,69	0,50	—	—
7	3,0	1,12	0,65	0,47	—	—
8	0,3	0,95	0,64	0,31	—	—
8	1,2	0,95	0,64	0,31	—	—
8	2,1	1,09	0,68	0,41	—	—
8	3,0	0,91	0,62	0,29	—	—
9	0,3	0,88	0,65	0,23	—	—
9	1,2	0,95	0,66	0,98	—	—
9	2,1	0,84	0,58	0,26	—	—
9	3,0	0,89	0,62	0,27	—	—

на одновременно образовавшихся ленточных глинах (varved clays), в которых тонкие прослойки слабopластичной минеральной пыли чередуются с прослойками типичных глин. Для того чтобы дать описание таких пород, необходимо песчанистые и глинистые прослойки испытывать отдельно, так как испытание их смеси в целом привело бы к ошибочным выводам.

Однако, даже в однородных навид глинистых и песчаных грунтах состав и структура их обнаруживают большие колебания.

На рис. 3 изображены изменения нормального водосодержания, естественного водосодержания и консистенции одного последнедикового отложения, выведенные на основании результатов испытаний грунтовых проб, взятых одна от другой в расстоянии 50 см по вертикали. Но даже в пределах расстояния в 50 см состав грунта может обнаружить значительные колебания, как это явствует

из рис. 14 (последнедниковые залежи глины в Гартфорде, Коннектикут).

Рис. 15 показывает изменчивость состава одной залежи глины у озера Эри с места постройки (Gross Pointe яхт-клуба в Детруа, Мичиган). Несмотря на то, что буровой мастер считал эту залежь глины однородной по своему сложению, результаты испытания грунта показали, что состав и консистенция его колеблется в значительных пределах.

Для песчанистых пластов грунта колебания его состава в техническом отношении имеют второстепенное значение. Тем важнее зато местные колебания относительной плотности песка вследствие влияния этих колебаний на сопротивление песка нагрузке и его подвижность.

При 8 испытаниях сопротивления нагрузке поверхности одного довольно однородного на вид песчаного пласта в С.-Франциско в Калифорнии осадка штампа под влиянием груза в 4 кг на 1 см<sup>2</sup> изменялась в пределах от 0,1 до 0,43 см, в среднем составляя 0,25 см. В Чикаго (Иллинойс), при заложении основания на опуск-

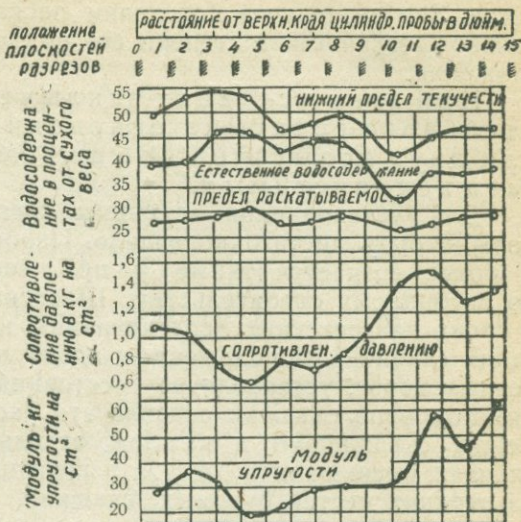


Рис. 14. Изменение прочности грунта на протяжении 40 см мощности пласта ледниковой глины (глина из буровой скважины № 1, глубиной 16 м, в Гартфорде, испытанная Терцаги).

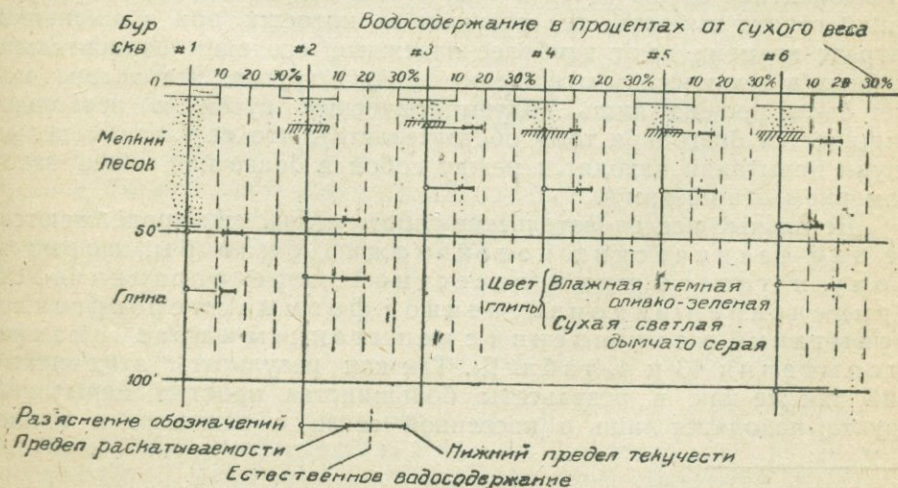


Рис. 15. Показатели для грунтовых проб, взятых с различной глубины под основанием яхт-клуба в Детруа, в Мичигане (по Терцаги).

ных колодцах в довольно однородном водоносном пласте песка, в некоторых случаях не наблюдалось никаких затруднений, между тем как в других происходили трудно преодолеваемые завалы песка. Это различие в поведении песка можно было бы объяснить только различием в степени его подвижности, т. е. плотности его сложения.

При этих условиях заключение о свойствах строительного грунта на основании результатов одного или двух испытаний по каждому пласту следует считать недопустимым.

Для установления величины средних значений число проб должно быть достаточно велико. Необходимость этого все более и более сознается также и при составлении программ работ по глубинному строительству. Шведская геотехническая комиссия в своих классических исследованиях, касающихся опасности оползания склонов, расположенных вдоль линии государственных железных дорог, устанавливая расстояния между отдельными профилями буровых скважин, снизила эти расстояния до 20 м. Расстояния между скважинами в каждом отдельном профиле в некоторых случаях уменьшались до 5 м, а грунтовые пробы, по крайней мере из верхних частей буровых скважин, брались через промежутки в 50 см по вертикали<sup>1</sup>. Равным образом и в случаях пробного бурения при закладке фундаментов можно рекомендовать придерживаться интервалов между отдельными местами взятия проб примерно в 50 см. Исключить часть взятых проб всегда имеется возможность еще и впоследствии.

При том объеме материала, который получается при буровых работах, длительные испытания, вроде испытания (1), приводимого в табл. II, не имеют практического значения. Приходится ограничиваться самое большее тремя или четырьмя испытаниями простейшего рода. Соответственно с этим ближайшая задача технического грунтоведения заключается в том, чтобы из числа простых испытаний грунта выбрать те, результаты которых при наименьшей затрате времени дают наиболее надежные сведения относительно важных в техническом отношении свойств грунта. Эта задача может быть решена лишь полуэмпирическим путем и несколько упрощается благодаря тому обстоятельству, что результаты целых групп испытаний находятся между собой в более или менее закономерном отношении<sup>2</sup>.

Детальные исследовательские работы сейчас еще продолжают, но для технических целей можно было бы, повидимому, и теперь уже в известной мере ограничиться применением видоизмененной формы Аттербергских испытаний в соединении с испытанием на размокание (испытания 13 и 4, табл. II). Так как результаты этих испытаний, так же как и результаты большинства простых испытаний грунта, находятся лишь в косвенной связи с важными в техни-

<sup>1</sup> Statens Järnvägars Geotekniska Commission, 1914—1922, Slutbetänkande, 31 Maj, 1922, Stockholm.

<sup>2</sup> Terzaghi, Hogentogler and Wintermeyer. The Present Status of Subgrade Testing Public Roads, Vol. 8, № 9, November, 1927.

ческом отношении свойствами грунта (сжимаемость, упругость, проницаемость), то представляется необходимым калибровать результаты нормальных испытаний, т. е. создать эмпирическим путем диаграммы, при помощи которых можно из результатов испытаний выводить заключения о важных в техническом отношении свойствах грунта.

На дальнейшее упрощение приемов исследования можно надеяться, исходя из того обстоятельства, что пробы грунта, взятые из геологически однородного пласта, несмотря на значительные колебания в крупности зерна и водосодержании, тем не менее проявляют, повидимому, тесное сродство между собой в физическом отношении.

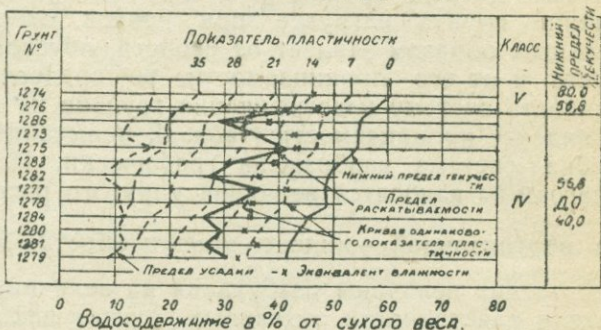
Подобное же, хотя и более отдаленное, сродство наблюдается даже между грунтами обширных областей, поскольку эти области отличаются более или менее однородным геологическим и географическим характером. Рис. 16 дает представление о разнице между средними характеристиками грунтов из трех климатически и геологически различных частей Соединенных Штатов.

Вследствие этого сродства было бы возможно еще более сократить число испытаний, необходимых для сравнения грунтов, если при обработке результатов бурения, прежде всего путем исследования небольшого числа грунтовых проб, установить групповой характер главных типов пробуренных разновидностей грунта,

### Грунты из Новы.



### Грунты из Южной Дакоты.



### Грунты из Техаса.



Рис. 16. Грунты из трех различных по климатическим и геологическим условиям областей САСШ.

а затем, при помощи одного или двух добавочных испытаний, определить колебания свойств грунта в пределах различных отдельных групп. К такому упрощению способов исследования возможно будет, однако, прибегнуть лишь тогда, когда мы будем иметь в своем распоряжении исчерпывающие сведения о физических свойствах отложений целых штатов или континентов.

## 7. КЛАССИФИКАЦИЯ НЕСЦЕМЕНТИРОВАННЫХ РАЗНОВИДНОСТЕЙ ГРУНТА ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ЦЕЛЕЙ.

Практически приемлемое описание грунтов по необходимости должно обнимать две группы данных: а) данные, при помощи которых определено устанавливаются разновидности грунта и его физический характер, и б) данные, выясняющие нам состояние грунта в той части его, которая служит основанием для сооружения.

Классификация грунтов имеет исключительной целью выявление данных группы „а“. Так как устойчивость и сопротивление грунта нагрузке при равной относительной плотности главным образом зависят от свойств, обусловливающих его прочность, и от его проницаемости, то представляется естественным основать систему классификации грунтов на показателях прочности и индексе проницаемости (табл. II, испытание 1). На рис. 17 подобная система изображена графически. На горизонтальной оси диаграммы наносятся величина упругого расширения (разбухания),

на вертикальной — индекс проницаемости. Значения  $\frac{C_1}{C_2}$  (частное от деления величины разбухания на величину уплотнения) и показатели пластичности отдельных грунтов находятся из приложенной к диаграмме таблицы. Наверху каждого вертикального столбца помещена диаграмма, изображающая средние сжимаемость и упругость (способность к разбуханию) соответствующих данному столбцу грунтов, при условии, что отношение  $\frac{C_1}{C_2}$  достигает значения 3.

Из диаграммы видно, с какой скоростью сжимаемость и упругость грунтов возрастают в направлении слева направо.

Площади A, B, C, и т. д., ограниченные пунктирными линиями, охватывают те пункты, которые на диаграмме соответствуют группам, указанным в таблице под названиями: мелкий песок, песчанистый суглинок, чистый пылевидный суглинок (Reine Schluffe) и т. д. Само собой разумеется, что отдельные группы не отделяются друг от друга резкими линиями, но переходят одна в другую постепенно или же взаимно пересекаются. Правый нижний квадрант общей площади представляет собой область грунтов, сложенных преимущественно из органических составных частей (Schluffe mit organischen Beimengungen).

К сожалению испытание, имеющее целью отнесение грунта к тому или иному классу (испытание 1), занимает очень много времени. Поэтому в настоящее время стремятся собрать те эмпирические данные, которые необходимы для того, чтобы произвести распределение по классам косвенным путем на основании результатов более простых испытаний грунта.

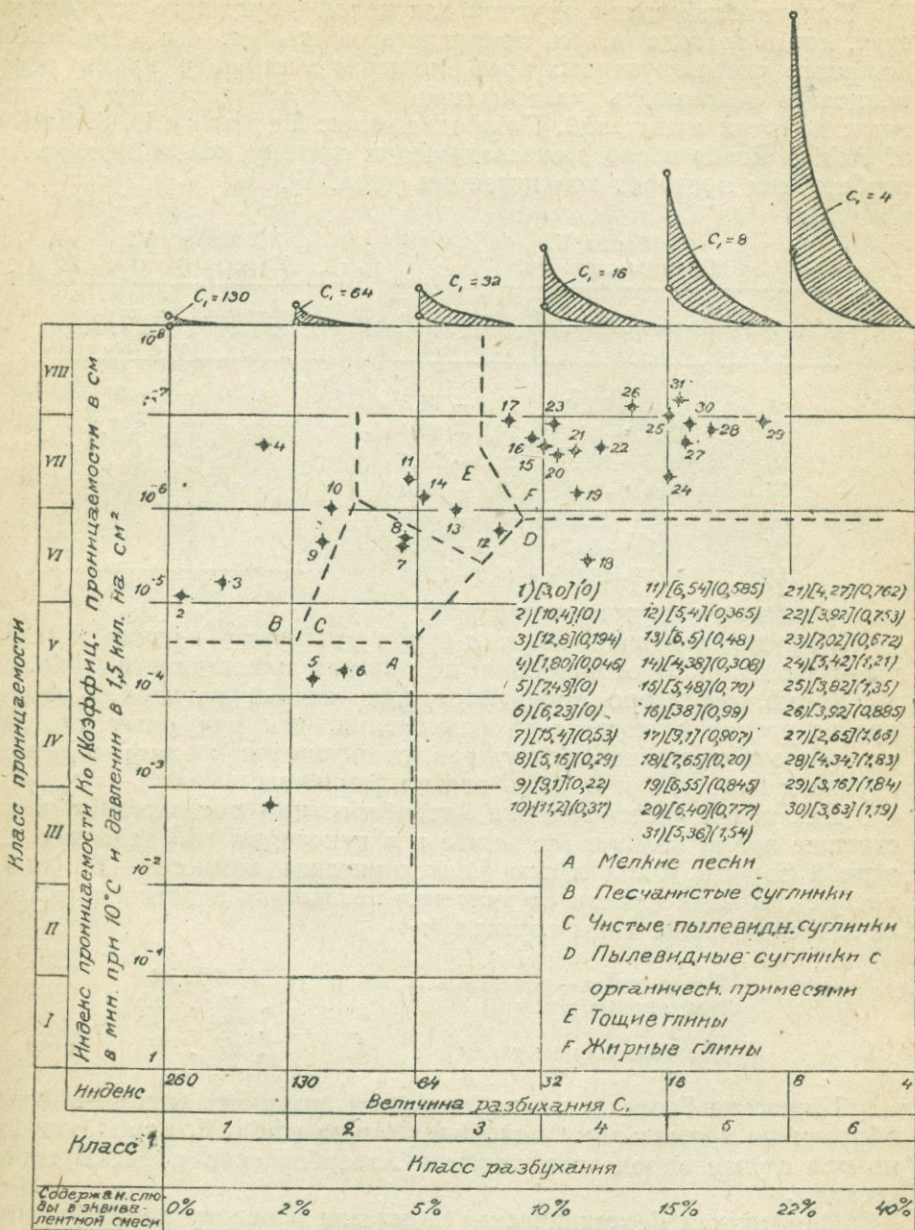


Рис. 17. Система классификации грунтов по Терцаги, основанная на показателях прочности и индексах проницаемости. Кривые в верхней части диаграммы изображают „сжимаемость“ и „упругость (способность к разбуханию) грунтов“ при условии  $C_1 = 3C_2$ .

$$\text{Величина уплотнения } C_2 = \frac{\text{величина разбухания } C_1}{\text{цифры в прямоугольных скобках}}$$

Показатели пластичности, выраженные в коэффициентах пористости, равны цифрам в круглых скобках.

При классификации грунтов для целей дорожного строительства, когда из года в год приходится иметь дело с обработкой большого числа грунтовых проб, можно в настоящее время рекомендовать основывать классификацию исключительно на результатах простых испытаний. По предложению Терцаги U. S. Bureau of Public Roads ввело нижеследующую систему, основанную на Аттербергских пределах консистенции (табл. V).

Таблица V.  
Группы грунтов.

Группа	Обозначения	Предел текучести (в процентах от сухого веса)
0	10—10.2 <sup>1/2</sup>	10,0— 14,2
I	10.2 <sup>3/4</sup> —10.2 <sup>1</sup>	14,2— 20,0
II	10.2 <sup>1</sup> —10.2 <sup>3/2</sup>	20,0— 28,4
III	10.2 <sup>3/2</sup> —10.2 <sup>2</sup>	28,4— 40,0
IV	10.2 <sup>2</sup> —10.2 <sup>5/2</sup>	40,0— 56,8
V	10.2 <sup>5/2</sup> —10.2 <sup>3</sup>	56,8— 80,0
VI	10.2 <sup>3</sup> —10.2 <sup>7/2</sup>	80,0—113,6

Таблица VI.  
Классы грунтов.

Обозначения классов	Показатель пластичности (в процентах от сухого веса)
0	0
1	0— 7
2	7—14
3	14—21
.	.
.	.
.	.

В пределах каждой из этих групп различают несколько классов в зависимости от значения показателя пластичности (табл. VI).

Кроме того Бюро определяет для каждой грунтовой пробы предел усадки и показатель размокания, так как опыт показал, что оба эти значения для грунтов, относящихся к одним и тем же группе и классу, могут быть весьма различны.

Для целей классификации Аттербергскими показателями в настоящее время пользуются также и в некоторых государствах Северной Европы. Финляндская Геотехническая комиссия (Б. Фростерус), в зависимости от значения показателя пластичности, различает следующие типы грунтов <sup>1</sup>:

Тощие глины	—	показатель пластичности от	6	до	11
Полужирные глины	"	"	16	"	19
Жирные глины	"	"	20	"	26
Особенно жирные глины	"	"	27	"	37

Шведская Геотехническая комиссия различает грунты главным образом по нормальному водосодержанию (табл. II, испытание 12), но при случае определяет также и Аттербергские пределы консистенции.

Норвежская Геотехническая комиссия в основу классификации норвежских глин приняла разницу между верхним пределом насыщения глины водою и содержанием воды в глине нормальной консистенции (испытания 14 и 15). Разница между содержаниями воды в обоих указанных случаях принимается за показатель пластичности. Смотря по значению показателя пластичности, Комиссия различает:

<sup>1</sup> J. Krogh, van. J: Undersokelser over Norske Lerer. Statens Raastofkomite I, II и II. Kristiania, 1923.

Особенно жирные глины — показатель пластичности	>	35
Жирные глины	"	30 — 35
Средне-жирные глины	"	20 — 29
Тощие глины	"	10 — 19
Особенно тощие глины	"	5 — 9
Песчанистые глины	<	5

Недостаток единства в приемах классификации доказывает, что эта область знания находится еще в начальной стадии развития. В некоторых только что приведенных системах классификации проявляется стремление определять разновидности глин лишь одним показателем, например показателем пластичности. Для классификации глин сходного геологического происхождения это можно признать допустимым. Но для того чтобы объединить в одну систему разновидности нецементированных связанных и не связанных сцеплением грунтов целого континента, необходимо прибегнуть к нескольким показателям, так как опыт показывает, что два грунта могут быть весьма различны даже и в том случае, если они имеют один общий одинаковый для обоих показателей, например, показатель пластичности или нормальное водосодержание.

Окончательное суждение о роде и числе показателей, необходимых для единообразной классификации нецементированных грунтов, можно будет высказать лишь тогда, когда в нашем распоряжении будет находиться более обширный эмпирический материал.

## 1. ДВИЖЕНИЯ ЗЕМЛЯНЫХ МАСС И РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЭТОГО ЯВЛЕНИЯ НА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ.

Медленные, а также и быстро развивающиеся движения земляных масс происходят не только на откосах искусственных выемок, но и на не затронутых никаким строительством естественных склонах. Геоморфология, связанная с именами А. и W. Пенск, Davis, Göttinger, Passarge, Sapper, Behrman и многими другими, придает движениям земляных масс руководящее значение в ряде факторов, способствующих образованию форм земной поверхности. Исследования геоморфологов, производящиеся на всех континентах, показали, что движения земляных масс почти всегда и везде принимают деятельное участие в изменениях рельефа земной поверхности.

Под тропиками при влажном от дождей климате почва сползает вниз по склону между дерновым покровом и выветрелой поверхностью подстилающей горной породы. В пустынных зонах сухие наносы продвигаются медленно, но безостановочно, исходя радиально из центров денудации, проходя многие сотни километров по плоским предгорьям и останавливаясь лишь тогда, когда угол их естественного откоса уменьшится до величины 2—3°. В зонах влажного умеренного климата поверхность горных склонов, лежащих выше границы древесной растительности, под действием изменения температуры и мороза постепенно разрыхляется, и, как следствие такого разрыхления, происходят осыпи и обвалы, обращаящие эти горы в руины с резко расчлененным рельефом.

Ниже границы древесной растительности наносы медленно сползают вниз к долинам, склоны которых имеют падение больше чем 4—5°. Такое движение наносов сходно с движением ледников. Валуну покрываются шрамами, окатываются и перемешиваются. Это движение производит также загибание голов пластов более круто залегающих коренных пород (рис. 18). В таких легко подвижных породах опасно закладывать водонапорные штольни, водопроводные трубы и пр., так как в них легко могут происходить разрывы, как на это указывает Lugeon для Лозаннского водопровода, где постоянно происходили разрывы труб, хотя последние и были проложены на бетонных опорах. Как только трубопровод углубили ниже подвижных слоев флиша, разрыв труб прекратился.

Тальвеги ручьев запруживаются медленно, но непрерывно двигающимися с обоих склонов наносами, если только постоянная эрозийная работа текучих вод не будет в состоянии их размывать. Такие потоки наносов бороздят породы, по которым они двигаются, образуют на границах между движущимися наносами и неподвижной породой углубления, сходные с образуемыми текучими водами,

углубляют долины и отодвигают выходы источников в глубину гор (коррозионные долины). По этим причинам характер ландшафтов определяется почти исключительно движениями земляных масс. В полярных странах в качестве главного фактора, вызывающего движение земляных масс, является увеличение объема воды при ее замерзании, обуславливающее явление, известное под названием пучения грунта (Solifluktion). Даже на дне океанов проявляются следы обширных движений земляных масс, происходящих вследствие нарушения равновесия, вызываемого тяжестью отлагающихся осадков.

Большая часть этих движений происходит чрезвычайно медленно, настолько, что W. Penck предлагает принять год за единицу времени при оценке продолжительности этих движений<sup>1</sup>. В противоположность широкому повсеместному распространению незаметных для глаза медленных движений земляных масс происходят более заметные быстрые движения отдельных ограниченных участков поверхности. Их характер и частота связаны между прочим со стадией развития ландшафта, среди которого эти движения происходят.

По Дэвису, каждый ландшафт проходит известный „цикл“ развития, причем из стадии юности он переходит в зрелую и, наконец, в стадию старости<sup>2</sup>. В зависимости от главных факторов, которым обязан своим образованием данный ландшафт, Дэвис различает циклы обыкновенной эрозии, гляциальной эрозии, пустынный цикл и т. д. (см. Morphologie der Erdoberfläche).

По мере увеличения зрелости ландшафта внезапные движения отступают все более и более на задний план и заменяются незаметными, но ни в коем случае не имеющими меньшее значение, движениями земляных масс.

Движения земляных масс, происходящие при строительных работах вследствие выемки или насыпки земли, поэтому являются, собственно говоря, одним из проявлений тех естественных процессов, которые и без нашего влияния происходят повсюду в необозримо-разнообразных формах.

Указанными выше исследовательскими работами наши познания в области морфологии движений земляных масс были чрезвычайно расширены, и наше понимание геоморфологического значения этого фактора значительно углублено. Тем не менее, как только мы попытаемся приложить к технике достижения этих исследовательских работ, мы сталкиваемся с такими же затруднениями, как при постройке туннелей или при закладке фундаментов, именно с отсутствием четкости в установлении физических определений. Несмотря на то, что геоморфология за последние 20 лет в значительной степени использовала успехи физических наук, все же основные понятия еще на сегодняшний день не настолько точно и ясно формулированы, как это необходимо для техники<sup>3</sup>.



Рис. 18. Загибание голов крутопадающих пластов под влиянием сползания верхнего покрова.

<sup>1</sup> Penck, Morphologische Analyse, Stuttgart, 1924.

<sup>2</sup> Davis, A Erklärende Beschreibung der Landformen.

<sup>3</sup> Pollack, Versuch einer Übersicht der Massen- oder Bodenbewegungen. Jahrb. d. geol. Bundesanstalt, 75, Bd. H. 1 u 2 Wien 1925.

Вследствие этого при техническом исследовании движений земляных масс не приходится ограничиваться только данными геоморфологической науки, но, так же как и в главе о физической классификации сыпучих грунтов, приходится выдвигать на первый план физико-механический подход.

## 2. УСЛОВИЯ РАВНОВЕСИЯ ЗЕМЛЯНЫХ МАСС.

При исследовании действия силы тяжести на состояние равновесия грунтов необходимо различать, во-первых, грунты лишенные сцепления, от грунтов связных и, во-вторых, сухие грунты от влажных. Показателями физических свойств, обуславливающими равновесие масс, как указано в главе I, являются величины  $\varphi$  (угол внутреннего трения) и  $P_0$  (сцепление или сопротивление грунта на срезывание).

Лишенный связности грунт будет находиться в состоянии равновесия при расположении как выше, так и ниже уровня воды,

если только угол откоса его не превышает угла  $\varphi$ , и если в нем кроме того не происходит самопроизвольной осадки (перегруппировки зерен). При отсутствии воды, находящейся в состоянии покоя, совершенно не оказывает влияния на значение  $\varphi$  лишенных связности песков. Если угол откоса  $> \varphi$ ,

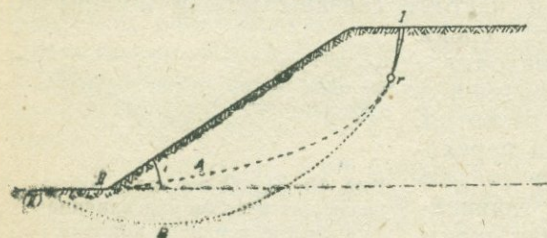


Рис. 19. Оползание откоса, угол падения которого  $i$  больше угла внутреннего трения  $\varphi$ .

то с точки зрения статики откос неустойчив. Связный грунт может быть устойчивым при крутом или вертикальном откосе, пока высота последнего не превышает известной „предельной высоты“  $h$ . Чем меньше угол откоса  $i$ , тем больше  $h$ , при  $i = \varphi$  величина  $h = \infty$ . При уклоне  $i \leq \varphi$  во всех частях откоса господствуют только напряжения, вызываемые силой тяжести. В этих случаях образование трещин усадки или усыхания не оказывало бы влияния на равновесие, если бы в этих трещинах не собиралась вода. При более крутых откосах в земляных массах образуются напряжения от растяжения, т. е. равновесие поддерживается отчасти вследствие сопротивления материала на разрыв. Поэтому образующиеся в таких случаях трещины усыхания оказывают влияние на устойчивость грунта даже оставаясь сухими.

На рис. 19 эти соотношения изображены графически для откоса, угол падения которого  $i > \varphi$ , причем I—II представляет кривую теоретической поверхности скольжения. Если бы не было трещин от усадки или от растяжения, то сила сцепления действовала бы на всем протяжении I—II. Вследствие образования трещин величина общего сопротивления откоса оползанию уменьшается на величину сцепления, действующую на участке I—r. Связные земляные массы, находящиеся ниже уровня воды, отличаются от расположенных выше уровня воды только отсутствием кажущегося сцепления и отсутствием возможности образования трещин усадки.

Напряжения, действующие в откосах связных масс, были изучены Rézal<sup>1</sup> при помощи основных уравнений теории давления земляных масс Rankin и на основании принятого Coulomb положения, что сопротивление скольжению каждого элемента площади составляет из двух частей: сцепления  $P_0$  (сопротивление на растяжение) и произведения коэффициента внутреннего трения ( $\operatorname{tg} \varphi$ ) на давление  $P$ . Скольжение происходит по той поверхности, на которой тенденция к скольжению максимальная. Rézal ограничился лишь изучением положений, близких к критическим, и выводами дифференциального уравнения поверхностей скольжения. Frontard решил уравнения Rézal и доказал в соответствии с фактическими наблюдениями, что скольжение должно происходить по некоторой кривой<sup>2</sup>. При  $i > \varphi$  эта кривая представляет деформированную циклоиду, нижняя часть которой пересекает откос под углом  $\frac{90^\circ - \varphi}{2}$ . К сожалению, выводы теории Frontard в связи

с принятыми им основными положениями заключают в себе значительные внутренние противоречия<sup>3</sup>.

Для определения степени устойчивости определенного участка склона уравнения Rézal и Frontard мало применимы. Более подходящим представляется принять, согласно К. Е. Petterson<sup>4</sup>, поверхность скольжения за цилиндрическую и сравнить между собой силы, которые с одной стороны стремятся произвести скольжение (сила тяжести), с другой — противодействуют скольжению. Последние складываются из сил сцепления  $P_0$  и из суммы всех сил трения  $\Sigma P \cdot \Delta F \cdot \operatorname{tg} \varphi$ .

При полутвердой глине можно пренебречь силами трения, и остается одна сила сцепления. Последняя ( $P_0$ ) в простейшем случае может быть вычислена следующим образом. Рис. 20 представляет схематическое изображение оползня, при котором скольжение шло по цилиндрической поверхности. Радиус кривизны цилиндра  $r$ , вес массы сползшей полосы шириной  $1 \text{ м}$  —  $G$  и центр тяжести  $S$  этой последней могут быть легко определены. В момент начала сползания все силы, т. е. моменты вращения, должны быть в равновесии. Производящий сползание момент

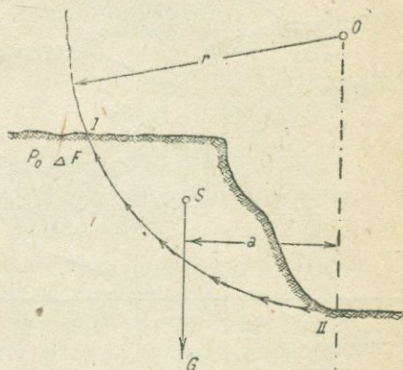


Рис. 20. Схема оползня.

<sup>1</sup> J. Rézal. Poussée des terres. 2 Partie. Théorie des terres cohérentes. Paris, 1910.

<sup>2</sup> Frontard. Cycloides de glissement des terres Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des Sciences, p. 526—529. 1922. — Frontard. Logoides de glissement des terres, p. 740—742. — Frontard. Loi de la hauteur dangereuse des talus argileux p. 930—933.

<sup>3</sup> Terzaghi. The mechanics of structural clay slides and of retaining wall movements. Public Roads, 1929.

<sup>4</sup> Fellenius. Erdstatische Berechnungen. Literaturangaben und kurzgefasste, Darstellung in Krey, H. Erddruck, Erdwiderstand und Tragfähigkeit des Baugrundes 3 Aufl. Berlin, 1926.

вращения равен  $G \cdot a$ . Противодействуют сползанию равномерно распределенные по поверхности скольжения (цилиндрической поверхности) силы сцепления  $P_0$ ; их сумма равна  $P_0 F$ , и их момент вращения  $P_0 F \cdot r$ . Равновесие требует, чтобы  $G \cdot a = P_0 F \cdot r$ , откуда  $P_0 = \frac{G \cdot a}{F \cdot r}$ . Рис. 21 а и б представляет поперечные разрезы двух оползней в выемках, происшедших (а) в 1916 и (б) в 1915 гг. при работах по уширению канала в Седерталье в Швеции.

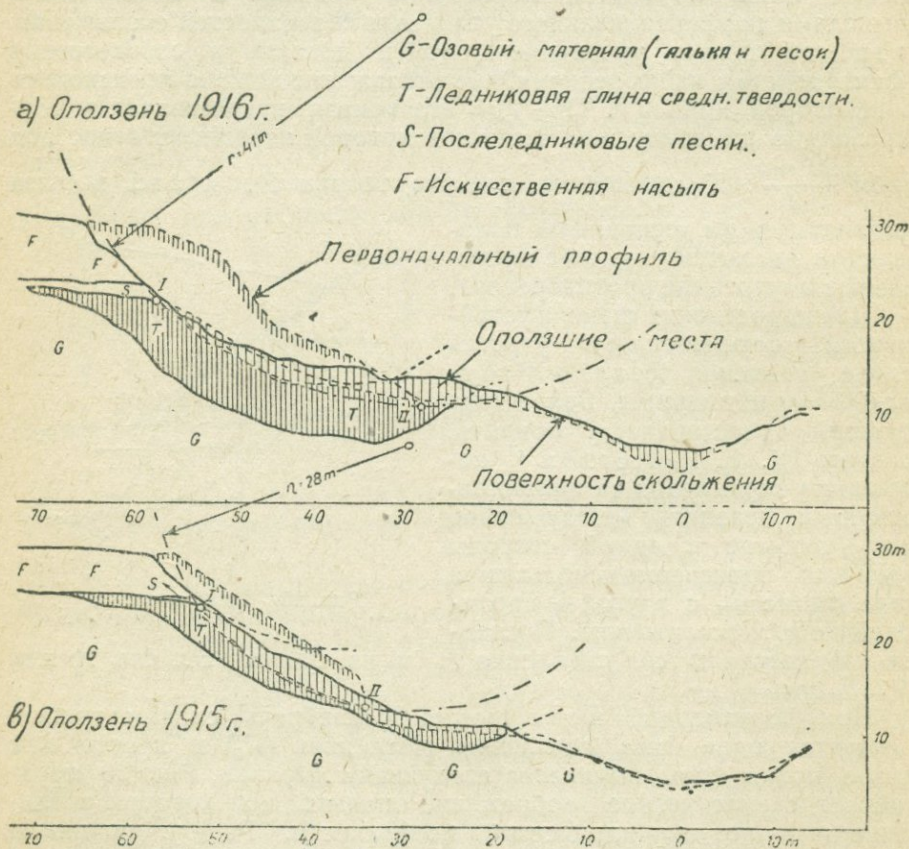


Рис. 21. Оползни в Седертальском канале в Швеции.

В обоих случаях оползание произошло полностью в пределах линзы плотной валунной глины, окруженной песчано-галечниковыми отложениями. Для определения величины сцепления фактически наблюдавшиеся кривые скольжения были приняты за круговые. Сила сцепления оказалась разной, в первом случае  $4,1 \text{ т}$  на  $1 \text{ м}^2$ , во втором случае —  $4,5 \text{ т}$  на  $1 \text{ м}^2$ .

Рис. 22 изображает разрез оползня в Вита Сикуддене (1 октября 1918 г.), вызвавшего сход поезда с рельс, причем погибло 41 человек. В почве склона залегает слабо наклоненная толща плотных ледниковых песков и галечников. На этом плотном основании залегают тонкослоистые ледниковые и последниковые глины,

пески и галечники, мощность которых у подошвы оползня около 7 м; в головной же его части мощность оползшей массы уменьшается почти до нуля. В основании этой клинообразной толщи залегал тонкий слой ледниковых глин с нормальным содержанием воды от 56 до 68%, консистенция которых по направлению к берегу моря становилась более твердой. Путь проходил по верху низкой,

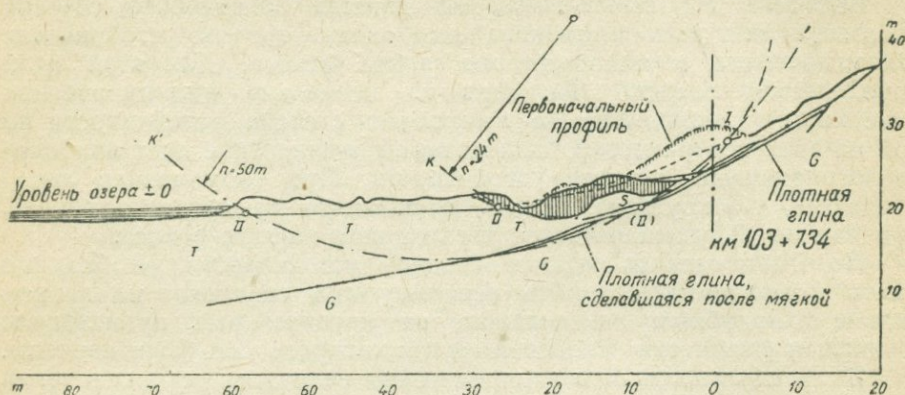


Рис. 22. Оползни в Вита Сиккудене.

Г—плотно залегающий ледниковый песок и щебень, Т—ледниковые и послеледниковые пылеватые суглинки (Schluff) и глина, S—песок и щебень.

идущей вдоль склона насыпи. В данном случае можно было говорить о зоне скольжения, ограниченной двумя кривыми сползания  $k$  и  $k^1$ . Пренебрегая трением, получим для кривой  $k$  на участке I—II величину силы сцепления  $P_0 = 2,2 \text{ т}$  на  $1 \text{ м}^2$ , для кривой  $k^1$  на участке I—II— $1,4 \text{ т}$  на  $1 \text{ м}^2$ . Трудно было предположить, чтобы сцепление по поверхности скольжения  $k^1$  было настолько меньше такового

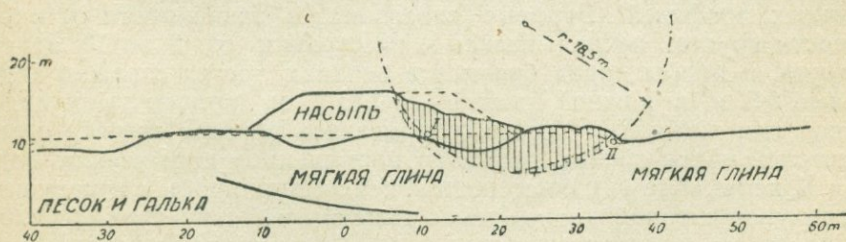


Рис. 23. Оползень насыпи в Иерна.

по  $k$ . Из этого почти что вытекает, что движение по  $k^1$  наступило после того, как сцепление на общей для  $k$  и  $k^1$  части I—(II) было уже преодолено, и масса пришла в движение. Оползень произошел после периода сплошных дождей, промочивших все тело насыпи.

Подобно оползням в выемках могут происходить и оползания насыпей, только в этих случаях кривая поверхности скольжения как будто больше отклоняется от дуги круга.

Рис. 23 дает разрез оползня насыпи, возведенной на мягкой глине в Иерна.

Нормальное содержание воды в глине было 47—74%, содержа-

ние воды в глине ниже более твердого верхнего пласта мощностью 2—5 м было 38—42% веса сырой пробы, и показатель консистенции пробы с нарушенным строением из того же горизонта от 3,9 до 6,5. Необходимая для поддержания равновесия на протяжении I—II сила сцепления высчитывается, пренебрегая величиной трения в насыпи, и получается  $P=2\text{ т}$  на  $1\text{ м}^2$ .

Величина  $P_0$ , вычисленная из данных поперечного сечения оползня, может быть применена для оценки степени устойчивости закладываемого в подобном же грунте откоса. Для этой цели определяют, согласно Petterson, несколько цилиндрических поверхностей скольжения и вычисляют степень устойчивости по той из этих поверхностей, для которой вычисление дает наиболее неблагоприятные условия устойчивости. При этом можно легко убедиться, что крутизна откоса, сложенного из связного грунта, при данном  $P_0$  уменьшается с увеличением высоты откоса.

Но чтобы сделать подсчет степени устойчивости, необходимо иметь возможность сравнить величину сил сцепления на данном склоне с подобным же склоном, на котором уже происходили оползни и физические свойства грунта которого уже были изучены.

Были сделаны попытки определения величины силы сцепления лабораторным путем, но достаточно хороших результатов еще не получено. Это показывает, что центр тяжести вопроса лежит не только в исследовании физических свойств пород склона (глава I), но и в сравнении оцениваемого участка с уже изученным участком, сходным по геологическому строению и по физическим свойствам слагающих его горных пород.

Первая попытка решения вопроса об оползневой опасности в крупном масштабе на основе изучения физических свойств горных пород и путем сравнительной оценки была произведена Геотехнической комиссией шведских жел. дор.<sup>1</sup> Исследованием были охвачены 333 участка, на которых было пробурено 2366 поперечных профилей. Буровые скважины, в зависимости от однородности грунта, закладывались в расстоянии от 2 до 10 м друг от друга, и пробы пород брались в верхних частях скважин через каждые 0,5 м, в нижних частях — через 1 м, причем вынимались ложкой или желонкой. Классифицировались породы сначала с геологической точки зрения, затем по нормальному содержанию воды (табл. II, испытание 12), по степени консистенции пробы с ненарушенной, полунарушенной и совершенно разрушенной структурой (стр. 31) и наконец по содержанию воды в пробе в природных условиях. Иногда исследования дополнялись определением границ консистенции по Atterberg или определением относительной консистенции при помощи нагрузок в скважинах, из которых брались образцы грунта. С последней целью на буровые штанги накладывался груз в 5, 15, 25, 50, 75 и 100 кг, и относительная величина консистенции получалась из величины погружения бура при указанных нагрузках. При помощи этих исследований была получена, по крайней мере, приблизительная картина свойств грунтов, и можно было гораздо точнее проводить сравнение устойчивости испытываемых

<sup>1</sup> Statens. Järnvägars Geotekniska Commission 1914 — 1922 Slutbetänkande, 31 Maj 1922. Stockholm, 1922.

откосов с оползшими участками, чем это можно было делать при наличии одних лишь обычных буровых журналов. Тем не менее шведская методика исследований еще далека от удовлетворительного решения вопроса. Так, нормальное содержание воды ни в коем случае не достаточно для идентификации сортов грунта. Далее, способ взятия проб нуждается в улучшении, и, наконец, способ определения относительной консистенции при помощи нагрузок на штанги с физической точки зрения представляется неясным. Тем не менее опыт шведов является крупным шагом вперед, и можно ожидать, что принятый шведами путь приведет к более рациональным методам изучения оползневых районов. Из шведских исследований как бы вытекает, что степень надежности откосов многих из наших насыпей и выемок далеко ниже степени надежности наших искусственных сооружений. С другой стороны, по экономическим причинам все же нельзя значительно увеличивать степень надежности уполаживанием откосов. Поэтому шведская Комиссия ограничивалась упорядочением или же обходом тех склонов, на которых оползни происходили раньше или должны были неизбежно произойти (36 пункт). В других пунктах было предложено уменьшать скорость движения, или устанавливалась автоматическая блокировка, которая в случае начинающегося движения оползней автоматически подавала бы сигнал остановки.

### 3. КЛАССИФИКАЦИЯ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМЛЯНЫХ МАСС.

Движения земляных масс могут происходить или вследствие изменения баланса действующих сил (величины нагрузки или гидростатических условий) при неизменившемся балансе сопротивлений (структуры, силы сцепления и трения), или же вследствие изменения баланса сопротивлений при неизменившихся действующих силах. Во многих случаях все же очень трудно решить, который из двух элементов равновесия изменился в более значительной степени. Такая трудность решения особенно неприятно дает себя знать при судебных спорах.

Как различные причины, так и возможные поводы к движению земляных масс связаны между собою такими многочисленными переходами, что всякая попытка классифицирования этих движений оказывается неизбежно искусственной. Вследствие этого многочисленным системам классификаций движения земляных масс не достает единства, и они являются недостаточно убедительными. А. Heim<sup>1</sup> различает 6 главных типов движений земляных масс: 1) оползание наносов, 2) обвал наносов, 3) сползание коренных пород (разлом), 4) движение скатывающихся или обваливающихся коренных пород (обвал коренных пород), 5) смешанное движение коренных пород, 6) особые случаи обвалов коренных пород. Это подразделение является слишком узко приноровленным к условиям, развитым в небольших отдельных районах, именно в Альпах. G. Braun<sup>2</sup> принимает за критерий для классификации те скорости, при которых происходит движение масс.

<sup>1</sup> A. Heim. Über Bergstürze. Zürich, 1882.

<sup>2</sup> G. Braun. Über Bodenbewegungen, XI Jahresbericht d. Geogr. Gesellschaft. Creifswald, 1907—1908, S. 17—37.

W. Penck (Morphologische Analyse. Stuttgart, 1924) выдвигает на первый план структуру движущихся масс и различает: 1) движение отдельных несвязных зерен и 2) отдельных аккумулятивных масс. Ко 2-й группе он относит: а) свободное движение, б) несвободное движение масс и коррозию. Terzaghi (Erdbaumechanik. 1925) в основу своей классификации поставил физические свойства, играющие главнейшую роль при возникновении движений земляных масс.

V. Pollack (Versuch einer Uebersicht etc.) сопоставил все известные, происходящие в природе движения земляных масс и дал таким образом несколько трудную для обозрения картину, которая тем не менее дает хорошее представление о чрезвычайном разнообразии этих движений.

Шведская Геотехническая комиссия классифицировала изучавшиеся ею движения земляных масс с трех различных точек зрения: по характеру самого разлома, по причинам, производящим движение, и по различию в ходе самого движения.

При указанных условиях представляется более правильным отказаться от попытки установления какой-либо классификации и ограничиться анализом физических факторов, могущих оказывать влияние при образовании и во время движения земляных масс. Согласно с таким взглядом, описание движения земляных масс может производиться в произвольном порядке по морфологическому характеру оползней, по действующим факторам и по характеру хода движения. Только таким путем можно было бы сколько-нибудь правильно подойти к выяснению исключительного разнообразия в проявлении этих движений.

#### 4. ПРОЦЕССЫ, ВЫЗЫВАЮЩИЕ ДВИЖЕНИЯ ЗЕМЛЯНЫХ МАСС, И МЕРЫ БОРЬБЫ С НИМИ.

Здесь должны быть рассмотрены разнообразные механические и физические процессы, могущие вызвать местное нарушение равновесия земляных масс, видимые последствия от этих процессов и мероприятия для борьбы с ними.

**Изменение статических условий.** Кроме изменений статических соотношений, вызываемых производством выемок (подрезывание) или прибавлением искусственной нагрузки (насыпи или иное прибавление веса), должны быть указаны еще следующие случаи изменения условий. Увеличение веса мелкозернистых горных пород вследствие насыщения водой во время продолжительных дождей. При пористости в 50% объемный вес мелкого глинистого песка увеличивается с 1,33 до 1,83, т. е. на 0,5 т на 1 м<sup>3</sup>. Также происходит кажущееся увеличение веса породы при понижении открытой водной поверхности. Если, при понижении уровня воды в озере из-под воды выступает откос, сложенный из мелкозернистого грунта, то вес массы этого грунта получает кажущееся увеличение, причем это увеличение веса равно гидростатическому давлению снизу вверх, которое действовало на зерна осушенной части породы до понижения уровня воды. Это давление легко вычислить, зная удельный вес зерен грунта и объем пор. К этому добавляется еще увеличение веса за счет остающейся в порах после понижения

уровня капиллярной воды. При понижении уровня подземных вод со свободной поверхностью понижается и верхняя граница капиллярных вод, но не одновременно, а запаздывая, и тем более, чем мельче поры породы. Вследствие этого при понижении уровня воды увеличивается мощность толщи капиллярнонасыщенной породы, причем при прочих одинаковых условиях эта мощность увеличивается вместе с увеличением скорости понижения уровня. При объеме пор в 50% вес породы в пределах понижения уровня увеличивается вследствие уничтожения гидростатического давления снизу вверх на величину около 0,5 т на 1 м<sup>3</sup> и в пределах временного добавочного капиллярного смачивания даже на 1 т на 1 м<sup>3</sup>.

**Гидростатическое боковое давление.** Если вода внутри песчаного или галечного слоя находится в состоянии покоя, то ее действие ограничивается гидростатическим давлением, направленным вертикально вверх. Если же вода движется, то она кроме того оказывает на породы, по которым протекает, давление, действующее в направлении движения воды и величина которого определяется гидравлическим градиентом. По Терцаги, это давление можно рассматривать как массовую силу, действующую в каждой точке породы, по которой протекает вода, по направлению касательной к линии потока, проходящей через данную точку. Величина этой массовой силы на 1 единицу объема породы, по которой протекает

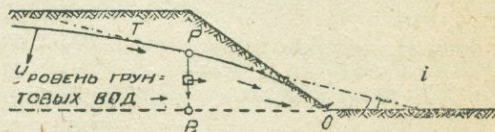


Рис. 24. Влияние гидростатического давления подземного потока на оползание откоса.

вода, равна произведению веса воды в единице объема на гидравлический градиент в данном пункте <sup>1</sup>. При гидравлическом градиенте, равном единице, давление потока составляет 1 т на 1 м<sup>3</sup>. Но так как вес 1 м<sup>3</sup> песка составляет также около 1 т, то текущая вода в данном случае при горизонтальном направлении потока произведет такой же эффект, как если бы действующая на 1 м<sup>3</sup> породы сила тяжести (исключая гидростатическое давление снизу вверх) была повернута на 45° вниз по течению и увеличена с 1 т на  $1\sqrt{2} = 1,41$  т на 1 м<sup>3</sup>. Это обстоятельство играет значительную роль при образовании оползней в откосах выемок в мелком песке. Рис. 24 представляет поперечный разрез такого откоса. Буква *i* обозначает гидравлический градиент (тангенс угла наклона касательной *PT* к поверхности воды). Согласно изложенному выше, на каждый м<sup>3</sup> породы, расположенный по вертикали *PP*<sub>1</sub>, действует горизонтальная сила величиной в *i* тонн. С приближением к подошве откоса *O* величина *i* быстро возрастает. Вследствие этого давление потока вытесняет породу наружу. После обильных дождей поверхность воды становится более крутой, а потому и увеличивается опасность оползания выемки. В тонких песках может случиться, что откос вследствие вытекания воды под давлением потока будет размываться, образуя пустоты, и наконец произойдет обвал и

<sup>1</sup> Гидравлический градиент равен потере высоты напора воды на единицу длины пути потока.

сползание песка. Также может иметь значение гидростатическое давление, образующееся при заполнении водой трещин в горных породах. На рис. 25 изображены трещины *a*, *b*, *c* в породе вблизи крутого склона. Если трещины очень узкие, то при сухой погоде обломок будет вследствие поверхностного натяжения воды придавливаться с очень небольшой силой к своему месту, т. е. присутствие воды не будет оказывать на него никакого действия. Если при дождливой погоде вода переполнит верхнюю часть трещины, то она будет вытекать из трещины *bc*, и производимое ею давление может быть также ничтожным (рис. 25 А). Если же часть *bc*

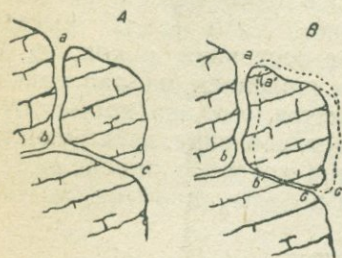


Рис. 25. Действие гидростатического давления в трещиноватых породах.

трещины значительно уже, чем *ab*, то вода оказывает на поверхность куска породы *ab* почти полное гидростатическое давление, которое при глубине трещины в 3 м составит в среднем 1,5 т на 1 м<sup>2</sup>. Поэтому давление, производимое заполняющими трещины водами, зависит в значительной степени не только от количества атмосферных осадков, но и от размеров и характера самых трещин.

**Разрыхление горных пород под действием перемены температуры, мороза и влажности.** Ch. Davison<sup>1</sup>

доказал опытным путем, что кусок песчаника, положенный на наклонную под углом в 17° поверхность и попеременно то освещаемый солнцем, то затеняемый, двигался вниз по склону со скоростью около 1 см в год. Эти наблюдения дают объяснение некоторым каменным потокам (Анды, Фалькландские острова), движущимся по очень слабо наклонным склонам, а также указывают на разрыхляющее действие периодического солнечного освещения. Если кусок породы на рис. 25 будет освещаться солнцем, то он расширится (причем край *b* вследствие большого уклона поверхности *bc* останется почти на месте, тогда как *c* передвинется в точку *c*<sub>1</sub>. При последующем охлаждении *c*<sub>1</sub> останется на своем месте, тогда как *b* перейдет в *b*<sub>1</sub>. Подобное же, но еще более сильное действие производит замерзающая в трещинах и расширяющаяся при этом вода (замерзание трещин). Также и корни деревьев и кустарников могут расширять трещины в горных породах. Наконец, следует отметить еще попеременное увлажнение и высыхание горных пород и связанное с этим изменение их объема. То обстоятельство, что такое изменение связано с изменением устойчивости пород, как бы показывает, что это явление с физической точки зрения родственно усадке и разбуханию глин.

Совокупное действие указанных выше факторов производит как небольшие разрушения породы на ее поверхности (осыпание, раскрашивание, распадение на чешуи, листочки), так и более глубоко идущее разрыхление, происходящее вследствие уширения и углубления трещин в породе.

<sup>1</sup> Ch. Davison. Note on the movement of scree material. Quarterly Journal of the geological Society of London, vol. 44, p. 232, 1888.

**Соскальзывание** (по Heim). Простейшая форма нарушения равновесия на склонах состоит в том, что отдельный участок склона соскальзывает как более или менее связанное тело по существовавшей ранее поверхности скольжения (плоскости напластования или по трещине). Этот род движения в наиболее чистом виде проявляется в слоистых породах, у которых падение слоев направлено в сторону склона. Такое движение проявлялось, например, в известняках Готенна на Летчской горной жел. дор.<sup>1</sup>, в гнейсах долины Тессино на Готардской жел. дор. (Piottinen)<sup>2</sup>. Гигантского масштаба соскальзывание произошло в 1806 г. в местечке Гольдау в Швейцарии. Соскальзывавшая масса представляла огромную плиту нагельфлю, длиной 1500 м шириной 300 м и мощностью 32 м, что дает объем 15 000 000 м<sup>3</sup>. Эта плита залежала на поверхности напластования породы, имеющей угол падения 30°. Движение происходило также и по плоскости напластования с углом падения 20°, и на своем пути движущаяся масса разрушила 111 строений и убила 451 человек<sup>3</sup>.

Также и некоторые оползни в глинистых массах обыкновенно объяснялись существованием ранее образовавшихся поверхностей скольжения, но обычно в этих случаях смешивали причину со следствием.

Даже тогда, когда глина прорезана старыми поверхностями скольжения, новые оползни большей частью происходят по новым поверхностям скольжения.

При изучении оползней, происходящих по плоскостям напластования или по границе между двумя разными породами, следует различать, чистые ли это плоскости или они покрыты примазкой суглинка или глиной. При чистых плоскостях напластования соскальзывание как следствие добавочной нагрузки невозможно, так как увеличение нагрузки связано с одновременным увеличением сопротивления от трения. В присутствии пропластка суглинка добавочная нагрузка вызывает, согласно Терцаги, временное уменьшение коэффициента трения (разность фаз между увеличением давления и соответственным увеличением трения) и вследствие этого может вызвать соскальзывание. В числе причин, могущих вызывать скольжение по чистым, лишенным глинистой примазки плоскостям напластования, одной из главных является гидростатическое боковое давление вод, заполняющих трещины в породах. По плоскостям напластования, покрытым прослойкой суглинка, как указано выше, сползания могут происходить как следствие одной только добавочной нагрузки.

К указаниям, что соскальзывание происходит единственно только вследствие „смазки водой“ глинистой прослойки, следует с точки зрения физических свойств пород относиться с большим сомнением. Если соскальзывающая масса перед началом движения

---

<sup>1</sup> Rutschung bei Hohstenn auf der Südrampe der Lötschbergbahn. Schweizer Bauzeitung, Bd. 61, S. 147, 1913, 1.

<sup>2</sup> E. Gerlich. Die Gotthardbahn. Zentralblatt der Bauverw., S. 177, 188, 202, 212, 1882 г.

<sup>3</sup> A. Heim. Über Bergstürze. Zürich, 1882. Ср. также: Dr. Zag. Die lebendige Beschreibung der Katastrophe Goldan und sein Gegend, wie sie war und was sie geworden. Zürich, 1807.

уже близка к границе равновесия, то скольжение может произойти как следствие второстепенных причин, например, в Готенне вследствие взрывов, в Тессинской долине вследствие сотрясения, вызванного снежной лавиной, и т. д.

С физической точки зрения еще недостаточно выяснены явления трения, происходящего на границе между песком и глиной. Нам известно, что коэффициент трения между глиной и кварцевым песком меньше коэффициента трения глины по глине. Сверх того, когда вдоль самой границы соприкосновения поры песка заполняются мягкой вдавленной в них, не испытывающей сколько-нибудь значительного давления глиной, то можно предполагать, что поверхность соприкосновения глины с песком будет представлять ничтожное сопротивление движению.

Но так ли это на самом деле, можно разрешить лишь путем опыта. С точки зрения статики такие „скольжения“ довольно легко поддаются расчету. Непременным условием для определения устойчивости является точное определение положения возможных, т. е. существующих в действительности, поверхностей скольжения и хотя бы наполовину правильная оценка как величины действующих сил, так и коэффициентов трения. В качестве предупредительной меры против соскальзывания следует ненадежные в этом отношении массы укреплять или анкерами, или каменными столбами (контрфорсами).

**Обвал неправильно-трещиноватых горных пород** (обвал откалывающихся масс, по Heim, катящиеся или обваливающиеся движение коренных пород, обвал скал, падение скал). Обвал подготавливается разрыхлением породы и осуществляется действием одной только силы тяжести. Отличительным признаком такого обвала является то, что постепенное уменьшение устойчивости породы подготавливалось заранее. Прототипом может служить выемка ниш в крутых стенках откосов породы, образующихся при горных выработках. Такие откосы могут держаться годами, пока наконец после обильных дождей или после снеготаяния масса породы, имеющая форму сегмента, не отделяется от откоса и не образует осыпь с углом откоса около  $40^\circ$ . Выемка в трещиноватой породе может рассматриваться как стенка сухой кладки, устойчивость которой зависит не столько от свойств породы, сколько от взаимного расположения ее элементов. Постепенное уменьшение связности уменьшает также и степень устойчивости породы, пока наконец не будет достигнута граница устойчивости, и тогда порода теряет форму стены и обращается в осыпь. Естественная связь между отдельными элементами горной породы играет такую же роль в создании равновесия, как сцепление при равновесии глин, и в природных условиях не связана никакими переходами к значительно более рыхлой связности осыпей и отвалов. Вследствии этого обвалы трещиноватых пород в морфологическом отношении сходны с происходящими вследствие преодоления силы сцепления обвалами глиняных масс. Наклонность к обвалам зависит не только от степени (интенсивности) трещиноватости, но и от тектонических условий (направления и расположения трещин наложения, кливажа, расположение сбросов и т. д.).

Глинистые и мергелистые сланцы, разбитые бесчисленными

трещинами отдельности и другими трещинами, ведут себя почти как совершенно лишенные связности кучи мелких обломков породы<sup>1</sup>.

При образовании обвалов большое значение имеют примазки суглинков и глин, которые в некоторых породах, особенно в известняках (остаток от растворения) и в сланцах (продукты выветривания), покрывают стенки трещин. Присутствие таких примазок понижает величину трения в местах соприкосновения пород друг с другом и таким образом содействует образованию обвалов. При определении влияния выпадающих атмосферных осадков на породы, переслаивающиеся с суглинком, необходимо принимать во внимание следующие физические особенности таких пород: размягчение прослой суглинка от прибавления воды может с физической точки зрения произойти только в том случае, если прослой раньше был частью или совершенно высохшим. Высыхание происходит тем медленнее, чем меньше площадь испарения и чем выше относительная влажность воздуха. Уменьшение величины трения может иметь значение лишь в тех случаях, когда сопротивление движению осуществляется трением прослойка суглинка, т. е., когда прослой с обеих сторон ограничен другими породами. Высыхание скольконибудь значительного по площади прослойка суглинка, заключенного между слоями плотных пород и залегающего на глубине более 1 м, потребовало бы не менее нескольких лет, притом совершенно бездождных. Точно также большого промежутка времени потребовало бы и размягчение высохшего прослойка. На основании этого наличие физических условий, необходимых для уменьшения величины трения вследствие размягчения прослоев глины, встречается в природе весьма редко. Дожди большей частью содействуют образованию оползней только тем, что заполняют трещины водой. Вода производит боковое гидростатическое давление и тем способствует нарушению равновесия. Как только начинается движение, так в соприкосновении с мягкими прослоями глины приходят породы, которые не были раньше заключены между другими породами, и начинает происходить „смазка“. Смазку в таких случаях следует рассматривать не как причину движения, а как следствие. Мелкотрещиноватые породы с примазками глины и породы старых обвалов в сланцевых районах представляют все переходы от трещиноватых пород к глинам.

Причинами обвалов являются обычно predisposing к этому характер тектоники и постепенное разрыхление и уменьшение сцепления породы. Поводом, т. е. последним толчком, являются обыкновенно дожди или снеготаяние. В редких случаях обвалы образуются как следствие горных выработок, которые поставили бы породу в положение, близкое к потере равновесия.

Примером может служить обвал в Эльне, образовавшийся вследствие проходки штолен и ломки камня в разработках шифера Ризикопфа.

Сланцевые слои (эоцен) имели падение против склона и были подрезаны в своем основании. Порода описывалась как „чрезвы-

<sup>1</sup> V. Pollack. Über Bewegungen des anstehenden Bodens bei Erd- und Felsarbeiten. Zentralblatt der Bauverw., 47 Jg., H. 37 und 38, S. 474—477, 487—488.   
наются Lupkow—Palota, Unterstein, Monte Piottino.

чайно трещиноватая и разбитая“, и обвал начал проявляться образованием трещин на склонах еще за несколько дней до катастрофы.

О степени устойчивости склонных к обвалам горных массивов можно судить с некоторой уверенностью лишь на основании характера тектоники и по степени трещиноватости буровых колонок, получаемых при вращательном бурении. Каждая трещина в породе дает трещину в керне.

Здоровые, т. е. вполне устойчивые, лишенные трещин породы дают цельные неразбитые керны.

Heim (ibidem) указывает, что как оползни, так и обвалы дают о себе знать за несколько часов или дней до катастрофы треском, падением камней, расширением трещин и пр. Превосходное описание предвестников и самого явления обвалов, связанного с выпучиванием глин (разрушение известняковой скалы в виде башни высотой 200 м в Пульверхерндле, Сандлингская группа в австрийских известняковых Альпах), было не так давно дано Леманом<sup>1</sup>. Объем скалы был около 200 000 м<sup>3</sup>, а приведенные в движение при обвале массы пород достигли объема от 6 до 9 млн. м<sup>3</sup>.

Средства для борьбы с обвалами зависят от свойств самих пород. При сильно трещиноватых породах бывает достаточно освободить при помощи простого лома откосы от отдельных кусков породы и зацементировать выходы открытых трещин, чтобы предупредить возможность расширения трещин корнями растений. При производстве выемок выходы трещин имеют большое значение для выпуска просачивающихся вод и потому должны оставаться открытыми. В породах, претерпевающих более или менее значительное изменение объема вследствие периодического изменения температуры и влажности (некоторые мергели или сланцы), бывает необходимо покрывать крутые откосы каменной одеждой.

Разновидность обвалов мелкого масштаба известна под именем „шелушения“ или „вымерзания“. Вследствие попеременного усыхания и увлажнения, а также вследствие замерзания воды в трещинах, обнаженных на откосах, породы постепенно принимают вид куч щебня, равновесие которых при снеготаянии или продолжительных дождях теряется, как и у обычных рыхлых масс. После оползней остаются на склоне раковистой формы выбоины. Если мелочь состоит из глинистого материала, то получается переход к оплывинам. Для борьбы с этими явлениями склоны укрепляются посадкой на них растительности, причем в случае наличия водяных прожилков устраиваются дренажи.

**Оползни, происходящие по поверхностям скольжения.** Эти оползни происходят строго согласно с теорией равновесия связанных земляных масс при преодолении сопротивления скольжению по резко выраженным цилиндрическим поверхностям разлома, которые после оползня легко различаются по блестящему виду этих поверхностей<sup>2</sup>. Положение поверхности скольжения определяется статически в соответствии с величинами трения и силы сцепления. Если

<sup>1</sup> Lehmann. Die Verheerungen in der Sandlinggruppe (Salzkammergut). Denkschr. der Akad. der Wissensch. in Wien Math.—naturwiss. Klasse. 100. Bd. Wien, 1926.

<sup>2</sup> См. фотографические снимки поверхностей скольжения у K. Backofen. Gleitflächen bei Rutschungen im Ton. Zentralblatt d. Bauverw., 47 Jg., S. 388—390, 404—406, 1927.

породы были ранее рассечены старыми поверхностями скольжения, то новые поверхности зачастую перекрещиваются с направлением старых поверхностей.

В наиболее чистом виде оползни по поверхностям скольжения происходят в однородных ненарушенных глинистых массах (рис. 21). Но такие же оползни в раздробленных глинах отличаются иногда от оползней, как они теоретически должны происходить в однородных массах. „Раздробленные“, т. е. разбитые плоскостями отдельности, глины были прорезаны, например выемкой у Розенгартена, близ Франкфурта-на-Майне<sup>1</sup>. Согласно заключению Кейльгака, разрез этих исключительно трудных для борьбы с оползнями слоистых пород<sup>2</sup> следующий:

а) сравнительно тонкий поверхностный слой, мощностью несколько метров, с неправильной формой включением песка, гравия, песчаной валунной глины и валунного мергеля;

б) под ним залегает очень жирный глинистый мергель мощностью до 20 м;

с) ниже следует масса, состоящая из среднезернистых песков с включениями гравия и песчанистого гравия, ниже переходящего в желтый слабо сцементированный песок;

д) чрезвычайно разнообразное чередование слоев межледниковых отложений, состоящих из светлых пресноводных известняков, лишенной извести или известковистой глины светлого или темного цвета с пропластками частью известковистых, частью лишенных извести песков и гравия (около 3 м);

е) наиболее древний из вскрытых пластов, темный очень жирный глинистый мергель, схожий со слоем б. Но все же он отличается от мергеля б тем, что пронизан бесчисленными поверхностями скольжения, так называемыми чешуйками скольжения, настолько, что распадается на мелкие, ограниченные блестящими поверхностями кусочки, которым Круш дал название линз смятия<sup>3</sup>.

Слой а почти горизонтален. Другие слои нарушены и при почти Е—W простирании падают к N под углом в 45°.

Глинистый мергель б, по Бакофену, в невыветрелом состоянии вязкий и твердый и берется только на кайлу. Свежие поверхности излома в противоположность глинистому мергелю е матовые. Несмотря на различный характер отдельных слагающих пород и на наличие старых поверхностей скольжения, новые поверхности сколь-

<sup>1</sup> Выемка имеет длину 2,5 км и глубину 24 м. Участок железной дороги имеет к югу от Розенгартена широтное направление (почти параллельно простиранию пород). Движение началось сначала на южном откосе выемки. Первый оползень произошел в Лермштангенберге во время постройки в 1911 г. (40 000 м<sup>3</sup>); второй — в 1913 г. у Фихтенберга (60 000 м<sup>3</sup>). А 26 мая 1914 г. с Лермштангенберга оползли в почти готовую выемку, по которой ежедневно проходило до ста поездов, 150 000 м<sup>3</sup> песка и глины. За последние 15 лет объем всех оползших масс составил около 1 000 000 м<sup>3</sup>.

<sup>2</sup> Цитировано по V. Pollack. Über Rutschungen im Glazialen und die Notwendigkeit einer Klassifikation loser Massen. H. der geol. Reichsanstalt, Bd. 67, H. 3 и 4. Wien, 1917.

<sup>3</sup> Согласно V. Pollack, подобные линзы смятия встречаются в большом количестве в Мостицком туннеле (перевал Яблунька) в местных черных третичных и меловых сланцах, причем более мелкие имеют величину чечевичного зерна. Heim, разбирая в своей работе вопрос о их происхождении, приводит схематическое их изображение.

жения во многих местах прорезали толщу пород в направлениях, не зависящих ни от границ между отдельными породами, ни от направления старых поверхностей скольжения.

Тот факт, что поверхности скольжения могут не быть связанными с границами отдельных пластов пород и со старыми поверхностями скольжения, был констатирован и в других оползневых районах, как, например, при Зарубе в местности Гульчинер (линия Аннаберг деп. Краварн), где выемка прорезывает дилuviальные и миоценовые образования, причем границы этих отложений отмечены выходом ряда ключей. Глина прорезана бесчисленным количеством поверхностей отдельности, и новые поверхности скольжения прорезывают глину независимо от имевшихся в ней трещин.

Весьма поучительно сравнить оползни с поверхностями скольжения в разбитых трещинами глинах с такими же поверхностями оползня в однородных глинах. Рис. 21—23 изображают несколько оползней, описанных и изученных шведской Геотехнической комиссией. Подсчет показал, что сила сцепления этих глин, несмотря на их мягкость, достигала в среднем 2—4 *t* на *m*<sup>2</sup>. Тем более изумительным представляется несоответствие высокой твердости при добыче и большой склонности к оползням по плоскостям скольжения, встречающееся у некоторых германских и швейцарских глин. Петрографически эти глины довольно близко родственны со шведскими. Ввиду этого приходится искать причины различной устойчивости в том обстоятельстве, что многие из указанных средне-европейских глин претерпели в прошлом значительные нарушения структуры и смятие. В главе I уже было указано, что нарушения структуры породы при одинаковом содержании воды могут значительно уменьшить силу сцепления (рис. 3). Сверх того такие нарушения могут оставить после себя в глинах остаточное напряжение, которое при вскрытии выемкой может получить возможность разрядиться. Ясную картину действующих причин можно будет получить лишь после подробного изучения большого числа оползней с поверхностями скольжения с точки зрения как статики, так и физических свойств пород. Terzaghi исследовал в Гоустоне (Техас) слой глины около 6 *m* мощностью, безусловно ненарушенной, плотной, ржаво-бурой, несомненно послетретичной, которая также во всех направлениях была пронизана блестящими чешуйчатыми поверхностями и в свою очередь покоилась на лишенной трещиноватости, но прорезанной корнями прослойке беловатых глин. Куски красной глины разбивались на угловатые, ограниченные блестящими плоскостями осколки величиною от волошского ореха до яйца. В этом случае представляется несомненным, что блестящие поверхности произошли не вследствие какого-либо давления, а в результате какой-то другой невыясненной причины, например, какого-либо связанного с изменением объема химического взаимодействия.

В оползнях с поверхностями скольжения мы имеем несомненно чистый вид скалывания (срыва) горной породы, с известной более или менее постоянной устойчивостью. Поэтому склон перед началом движения оползня должен был находиться в условиях, близко граничащих с срывом: повода к скольжению надо искать в ничтожном изменении соотношений между действующими силами и существующим сопротивлением. Изменение в соотношениях сил может

наступить, например, от увеличения веса расположенной на склоне насыпи вследствие насыщения ее водой (рис. 22). Изменение сопротивления вероятнее всего происходит вследствие местного уменьшения величины сцепления из-за образования трещин усыхания или разрыва (уменьшение длины  $I-r$ , рис. 19). Кроме того боковое гидростатическое давление накапливающейся в трещинах воды создает увеличение действующих в направлении отрыва сил. При таких условиях предупредить образование оползня можно только сползанием откоса до величины уклона, определенной на основании статического подсчета. Дренажи, как предупредительная мера борьбы с такими оползнями, в однородных глинах непригодны, так как глины даже в мягко-пластичном состоянии практически водонепроницаемы.

Наблюдающееся часто при оползнях с поверхностями скольжения выпучивание породы у подошвы склона только показывает, что поверхности скольжения в этих случаях проходят не через подошву склона, а пересекая ее. На основании законов статики возможно ожидать пересечения поверхности скольжения с подошвой выемки (образующаяся поверхность скольжения) в том случае, если материал около *B* (рис. 19) был бы мягче, чем около *A*. Так как отложения глин очень часто становятся с глубиной мягче, то частое проявление выпучивания у подошвы склона представляется совершенно понятным. Проявление выпучивания подошвы склона ясно видно на рис. 19 и 22, и оно привлекает наше внимание к тем оползням с поверхностями скольжения, которые образуются вследствие перегрузки пластов глины с горизонтальной поверхностью. От этих оползней уже прямой переход к чистому выдавливанию мягко-пластичных масс, о котором подробнее см. в главе V.

**Выдавливание мягких пластичных масс.** Различие между оползнями по поверхностям скольжения в чистом их виде и выдавливанием масс в чистом его виде заключается в различии физических законов, которым подчинены эти явления. При оползнях по поверхностям скольжения породы являются настолько плотными, что их движение подчиняется законам движения твердых тел. Согласно этим законам преодоление силы сцепления связано с уменьшением сопротивления скольжению. При выдавливании в чистом его виде движение подчиняется законам гидродинамики, по которым сопротивление трения при увеличении скорости скольжения не уменьшается, а увеличивается. Вследствие этого в жидкостях не образуется поверхностей скольжения. Чем больше сходства движущейся массы с жидкостью, тем меньше должно быть при оползнях поверхностей скольжения, пока наконец в очень мягких массах образование плоскостей скольжения совершенно не прекращается.

При так называемом „оползне“ в Рапперсвилль в Швейцарии речь шла о пласте мощностью 15 м мягкой моренной глины, на поверхности которой залегал слой в 2 м синего плотного моренного суглинка с валунами, затем 1 м желтого песчанистого суглинка и наконец 2,5 м песка и гравия. Как только выемка прорезала верхние плотные пласты, так соседние с выемкой полосы плотных покровных слоев рухнули на протяжении 60 м, и мягкая моренная иловатая глина была выжата в выемку (рис. 26). В данном случае дело идет несомненно о пластическом изменении формы

без образования поверхностей скольжения. Нарушенное равновесие было восстановлено устройством в откосе выемки вогнутого обратного свода<sup>1</sup>.

Оползни, обозначаемые Mac Donald как „структурные оползни“ на Панамском канале (близ Кулебра), повидимому представляют собой движение текучих пластичных масс, которое произошло вследствие образования трещин и размягчения материала.

Скольжение раздробленных масс. Терцаги наблюдал при одном крупном оползне во Фракии, что содержание воды в оползшей массе значительно выше, чем в нише срыва в коренных глинах. Он пытался объяснить это явление тем, что в данном случае большие массы воды были накоплены в трещинах ранее образования оползня, и что нарушение равновесия произошло вследствие раздробления пород, обусловленного трещинами и неравномерным

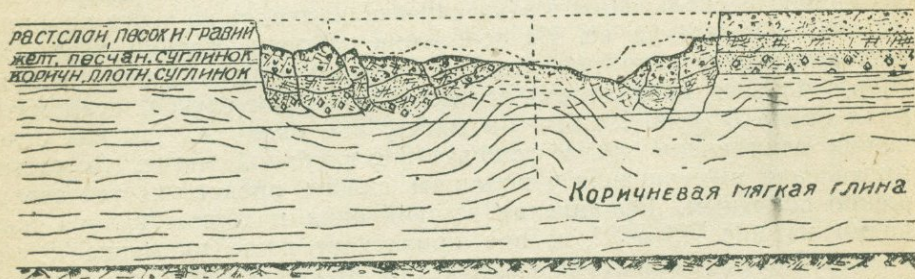


Рис. 26. Поперечный разрез Рапперсвилльского оползня в Швейцарии.

разбуханием. Согласно такому объяснению оползни таких глинистых масс следовало бы обозначать как обвалы трещиноватых пород. Такое объяснение отнюдь не подходит к подобным оползням с поверхностью скольжения как в Седерталье (рис. 21), но с другой стороны его нельзя было обойти молчанием при рассмотрении Фракийского оползня. Образующийся раньше оползня в трещинах почти жидкий глинистый осадок послужил смазкой во время движения оползня.

Оползни в глинах с включениями водоносных песков. Не так легко найти объяснение происхождения оползней в переслаивающихся глинах и песках, залегающих горизонтально или с очень малым падением. Описание многочисленных оползней подобного рода находится в отчетах по постройке первых французских железных дорог, проходящих частью по районам третичных отложений, в холмистых местностях, испытавших многочисленные оползневые движения<sup>2</sup>. Также можно указать на оползни, происшедшие на плато высотой 20 м, которое было прорезано выемкой длиной 300 м и глубиной 6 м<sup>2</sup> между Клумским и Гейербергом близ

<sup>1</sup> Die sogenannten Rutschungen in Rapperswyl. Schweizer Bauzeitung, 1894, II, S. 40.

<sup>2</sup> E. Lallouër. Travaux de consolidation dans les Pyrénées. Annales de Genie Civil, IV, p. 217—224, 1865. Сообщение Bruère и De Sazilly о жел. дор. линиях Paris — Lyon и Paris — Cherbourg. Annales des Ponts et des Chaussées. Paris, 1875.

Частоловица при постройке Австрийской северо-западной жел. дор.<sup>1</sup> Плато сложено мощной толщей песков и галечников в 10 м, залегающей на слабо наклонной поверхности пласта суглинка в 5 м с остатками раковин и растений. Ниже суглинка залегал известняк, и вдоль линии контакта с галечниками при постройке были вскрыты мощные ключи. При прорезывании выемкой галечный покров сделался „пльвучим“, причем вдоль всей площади до края плато стали образовываться бесчисленные зияющие трещины. Постройку водоотводной штольни пришлось вести забивной крепью. Кроме того произошло два провала на дневной поверхности.

При статическом исследовании оползней этого рода оказываются неподходящими соответствующие положения классической теории давления земляных масс. Здесь повидимому происходит внезапное понижение господствующего в песке внутреннего сопротивления. Так как такое понижение сопротивления требует наличия воды, то подобные случаи нарушения равновесия легко могут быть устраняемы обезвоживанием песчаного слоя. Дренаж для обезвоживания описанной выше выемки в Частоловице после его окончания давал относительно очень небольшое количество воды, именно 8,3 м<sup>3</sup> в час.

Еще менее объяснимым представляется это явление в тех случаях, когда глины прорезываются неправильными прожилками или гнездами водоносных песков.

В особенно типичной форме были выражены подобные случаи при постройке Венгерской восточной железной дороги между Шесбургом и Кронштадтом, а также у Кайбаха в Мильоненлохе, при постройке Кислег-Вангенской жел. дор. По линии Шесбург — Кронштадт местность представляла ряд крутых мысов, сложенных из трещиноватых третичных мергелей и отделенных друг от друга мульдами, которые, повидимому, представляли поверхность срыва старых оползней<sup>2</sup>. Грунт в этих мульдах представлял собой желтые суглинки. „Хотя желтые суглинки водонепроницаемы, все же при вскрытии их редко встречались сколько-нибудь значительные сухие участки; суглинок местами на ощупь мягкий и пластичный, местами он содержит воду в виде мелких капель, в виде резко выраженных водяных прожилков, водяных мешков или в виде постоянных или временных, более или менее продолжительно действующих, источников“.

Вода, по Герстелю, проникала до глубины 2—3 м по трещинам усадки или усыхания и попадала в глину. Как эта, содержащая воду, глина впадин, так и соответствующие ей трещиноватые мергели мысов покоятся на массивном синем тегеле<sup>3</sup>. В другой работе те же материалы изложены следующим образом: „Часто встречается промежуточное образование (между сильно известковистым, вообще же чистым, желтым суглинком, мощностью 2—14 м, и массивным тегелем), или же, в местах полного вытесне-

<sup>1</sup> E. Tiefenbacher. Die Rutschungen, S. 205—214. Wien, 1880.

<sup>2</sup> G. Gerstel. Über Entwässerungsanlagen im Lehmgebiet. Allgemeine Bauzeitung, 1874.

<sup>3</sup> *Прим. перев.* Тегелем называются голубоватые или зеленовато-серые глины венского третичного бассейна, содержащие песок, чешуйки слюды и некоторое количество углекислой извести.

ния суглинка, сильно трещиноватая мергелистая глина, частью вследствие этого водопроницаемая, на воздухе быстро распадающаяся, серого цвета, редко могущая быть резко разграниченной от массивного тегеля и часто в него постепенно переходящая<sup>1</sup>. Трещиноватая порода представляется результатом более древних, происходивших естественным путем оползневых движений. Образовавшиеся при постройке оползни никогда не захватывали массивный тегель, почему при разведочных работах всегда старались определить положение поверхности лишенного трещин массивного тегеля. Также и поверхности скольжения не имели никакой связи ни с поверхностью ни с границей соприкосновения тегеля с другими породами.

Когда была закончена выемка, глубиной 3,4 м на километре 28 + 450, то весь пологий горный склон пришел в движение. Разведочные скважины показали, что под 2-метровым слоем сухого суглинка залегал синий, исключительно богатый песком и водой, местами тестообразно размягченный мергель, из которого буровая ложка местами не могла достать пробы, местами же она наткнулась на плотные конкреции или на камни. На глубине от 8 до 20—24 м суглинок содержал меньше песка, а следовательно и воды. С целью стабилизации оползня были устроены дренажные штольни и шахты, причем подошва штольни была заложена на 50—75 см ниже поверхности плотной глины. Через три недели по окончании дренажных работ бывшая почти жидкою порода стала совершенно неподвижной и местами твердой как камень.

В Мильоненлохе Кислег-Вангенской линий жел. дор. оползни произошли по границе между древними сильно выветрелыми и молодыми (свежими) моренами. Выемка была длиною 3 км, глубиной 30 м. Более древняя морена содержала раздавленные и раздробленные участки третичных песков, галечников и слоев глины, сдвинутые напором льда в такое ненормальное положение<sup>1</sup>. Вода выбивалась из многочисленных отверстий в выемку, и вытекавший грунт стекал вниз наподобие глетчера.

Также и в отчетах об оползнях на линии Трейза—Мальсфельд и на линии Гадамар—Вестебург указывалось на присутствие гнезд и прожилок песка. В первом случае (выемка в Леймсфельде) верхняя часть оползшего склона состояла из смеси третичного суглинка и глины с водоносными песчаными прожилками и гнездами. Ниже залегала черная глина<sup>2</sup>. Во втором случае при выемке дренажных канав глинистые участки, прорезанные прожилками песка, оказались наиболее подвижными и проявлявшими известное давление.

Указанные выше и другие подобные им оползни в переслаивающихся песками глинах отличаются тем, что нарушения, как в очень вязких жидкостях, распространяются в обе стороны от выемки. Вязкая жидкость и вязкая глина представляют такие материалы, которые и до и после движения сохраняют почти одинаковую степень устойчивости.

<sup>1</sup> O. Fraas. Briefliche Mitteilung „Glaziales“. Stuttgart, 2. Der., 1879. Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geologie und Paleontologie. Jahrg. 1880, Bd. I, S. 268—273.

<sup>2</sup> Die Rutschungen auf der Teilstrecke Treysa—Malsfeld (Nordhausen—Wetzlar) im Zuge der Berlin—Coblenzer Eisenbahn. Zeitschr. für Bauwesen, S. 209, 1885.

При оползнях в глинах, прорезанных песком, напротив, движение как бы происходит вследствие значительного уменьшения силы сцепления.

Одной из главных причин увеличившейся подвижности является происходящая при этом текучесть песков. К этому добавляются еще следующие обстоятельства:

1. Вследствие происходящего при производстве выемки понижения уровня грунтовых вод увеличиваются силы, благоприятствующие проявлению обвала, тогда как сила сопротивления глины на срезывание, вследствие малой ее проницаемости, не получает значительного увеличения.

2. В виду сложного состава породы и консистенция глин в различных пунктах разреза несомненно различная, причем в пунктах наибольшего местного давления надо ожидать и наиболее твердой консистенции. Но как только в массе, вследствие местной выемки породы, произойдет изменение в распределении давления и места наибольшей нагрузки попадут в пункты с меньшим сопротивлением, масса делается подвижной.

В заключение необходимо еще отметить, что поверхности контакта песков с глинами представляют места наименьшего сопротивления, так как в них поры песка заполнены мягким, находящимся под небольшим давлением глинистым материалом, который в случае движения действует как смазывающий материал.

Борьба с оползнями земляных масс, состоящих из песка и глины, может вестись только полным осушением при помощи дренажных канав или штолен, как это успешно практиковалось на линии Шесбург—Кронштадт и во многих других местах. Осушением песчаных прожилков прежде всего облегчается глинам возможность отдачи части избытка воды. Но главнейшее действие все же заключается в стабилизации песка, так как в обезвоженном состоянии песок дает высокий коэффициент внутреннего трения, и его присутствие увеличивает устойчивость породы. После некоторого опыта, приобретенного на линии Шесбург—Кронштадт, дренажные работы стали производить до начала выемки, что обеспечивало значительную успешность работ. Выемка на километре 28+450 была начата три недели спустя после окончания осушительных выработок. „Полужидкая раньше порода оказывалась неожиданно хотя и несколько влажной, но уже вполне плотной, отвердевшей и в течении последующих нескольких недель сделавшейся даже в более глубоких слоях совершенно твердой как камень“.

Оползни глинисто-щебнистых склонов (оползни в наносах). К наиболее удивительным и в то же время наиболее частым явлениям, с которыми приходится иметь дело инженеру при земляных работах, относятся оползни, образующиеся в пористых, состоящих главным образом из наносов породах, покрывающих горные склоны (продукты выветривания). Такие оползни происходят почти во всех странах (за исключением пустынных зон) при производстве выемок, а также и на находящихся в естественном состоянии склонах, притом в некоторых местностях особенно часто. К таким местностям относятся в САСШ Вост. Огайо, западная часть Зап. Виргинии, Сев. Пенсильвания и в Европе—Швейцария. По Гейму, в 1840 г. таких оползней произошло на участке Утнах—Веезен не менее 30—40.

При прорезывании выемкой таких наносов получается сначала впечатление, что откосы даже при углах  $60-70^\circ$  должны были бы быть стабильными. Тем не менее такие массы приходят в движение весной или после продолжительных дождей и движутся (текут) даже при углах падения в  $10^\circ$  и меньше. Топография горных склонов в таких местностях, в которых наносы имеют склонность



Рис. 27. Оползень глинисто-щебнистых склонов (фотогр. Бюро общ. дорог в Вашингтоне).

к оползанию, представляет волнистую поверхность (оползневый рельеф), а также формы „камов“; местами кажутся происшедшими вследствие расчленения оползающих склонов.

В указанных выше районах САСШ породы представляются в виде очень слабо складчатой, почти ненарушенной свиты мергелей, известняков и песчаников каменноугольной системы,



Рис. 28. Двойной оползень глинисто-щебнистых склонов.

поверхность которых покрыта слоем от 2 до 4 м наносов, образовавшихся на месте или сползших, смешанных с мелким щебнем и суглинком, образовавшимся вследствие выветривания<sup>1</sup>. Рис. 27 дает картину пологих склонов, на которых могут происходить подобные движения, а рис. 28 — продольный профиль через двойной оползень, происшедший на таком склоне без какого-либо внешнего повода. Также и насыпи, сложенные из таких наносов, имеют склонность к движению.

Бетонная дорога, изображенная на рис. 29, вследствие сползания основания, представляет собой нечто вроде моста, который

<sup>1</sup> G. E. Ladd. Landslides and their relations to highways. Public Roads, 1927.

пробовали укрепить при помощи железобетонных свай, но, как это видно из фотографии, и основание этих свай сдвинулось вниз вместе с ними.

Значительное число поучительных примеров оползней наносов было описано Heim. При оползне наносов на склоне Риги, близ Веггиз, первые трещины образовались весной 1795 г., и только 15 июля того же года полоса склона, шириною около 1 км, с сильным шумом пришла в движение и двигалась по направлению к озеру в течении 14 дней<sup>1</sup>. Поучительные примеры таких оползней

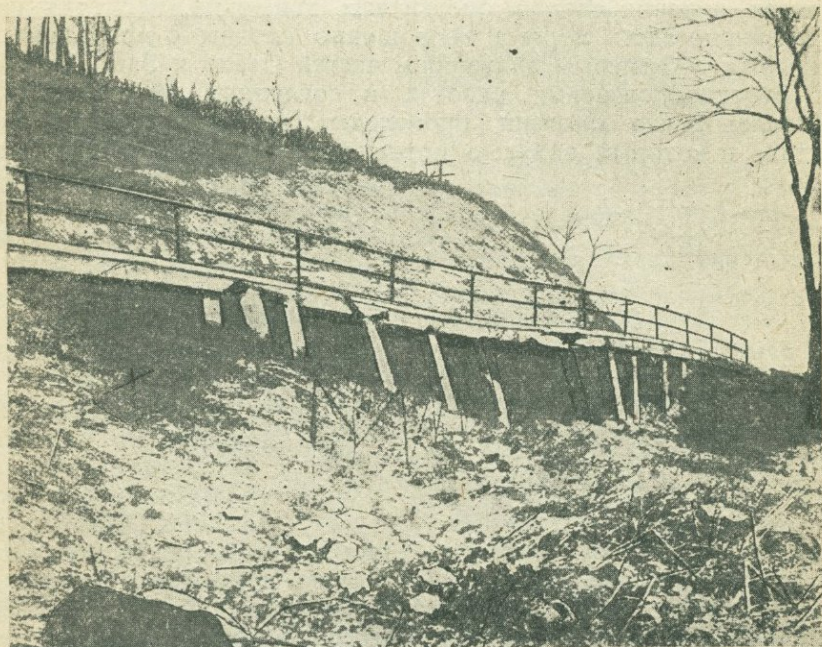


Рис. 29. Просадка бетонного шоссе при оползании глинисто-щебнистого склона (фотогр. Бюро общ. дорог в Вашингтоне).

приводит Pollack<sup>2</sup>, изучавший их при постройке и эксплуатации Арльбергской жел. дор.

Если сравнивать полученные из различных стран сведения, то можно убедиться, что наибольшее число таких оползней происходит в легко выветривающихся сланцевых породах, тогда как породы, распадающиеся при выветривании на твердые остроугольные куски, имеют очень малую или совершенно не имеют склонности к таким движениям. Табл. VII дает сводку некоторых оползней в наносах с указанием затронутых движением пород. Промежуточное положение между оползнями в образовавшихся на месте наносах и оползнями в осадочных глинах, пронизанных песками, зани-

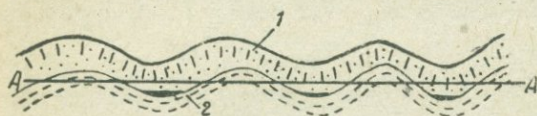
<sup>1</sup> Heim, A. Über Bergstürze. Zürich 1882.

<sup>2</sup> Pollack, V. Über Projektierung und Bau der schwierigeren Strecken Arlbergbahn. Allgemeine Bauzeitung S. 45, 53, 1886.

мают оползни в некоторых водоносных моренных отложениях с заключающимися в них валунами.

Из многочисленных наблюдений следует, что одного только наличия глубокого выветривания сланцев недостаточно для того, чтобы склон начал двигаться. При постройке линии Илянц-Дизентис (Веррукано), роговообманковый гнейс, роговообманковый сланец и слюдястый сланец при производстве выемок не представили сколько-нибудь значительных затруднений, связанных с движением сланцевых наносов.

Терцаги находит, что многие склоны в средней Пенсильвании не несут никаких следов оползневых движений, несмотря на то, что развитые здесь мергели совершенно сходны с мергелями подверженных оползневому движению частей Огайо и Зап. Виргинии. При противооползневых работах в последних местностях было установлено, что оползни происходят преимущественно в тех пунктах, в которых водяные потоки выходят из коренных пород



А-А' бетонированная дорога  
1 — Трещиноватый песчаник  
2 — Тонкоплитчатый мергель

Рис. 30. Продольный разрез дороги, пересекающей границу напластования двух различных пород (по G. E. Ladd, Public Roads, 1927).

и попадают в наносы, а не выходят непосредственно на дневную поверхность. Рис. 30 иллюстрирует продольный разрез по дороге, проходящей примерно вдоль границы между трещиноватыми песчаниками и водонепроницаемыми мергелями. Оползни в боковых насыпных откосах про-

исходили лишь в тех пунктах, где граница между названными выше породами опускалась ниже дна нагорного дорожного кювета.

Эти факты дают ключ к разъяснению оползневых явлений. Отдельные куски породы соприкасаются между собой только в точках или по очень небольшим поверхностям. Остальная часть их поверхностей покрыта слоем глины или суглинка. Если при процессе дальнейшего выветривания тут или там кусок породы растрескивается, то на новых плоскостях соприкосновения влажный слой суглинка действует как смазывающий материал. Если кроме того пустоты породы заполнены водой, то и вода приобретает напор и еще более уменьшает сопротивление внутреннего трения. Толчок, получающийся при разломе кусков породы, производит раскалывание других более рыхлых кусков породы, и нанос обращается в тесто из мягкого мокрого суглинка, смоченного напорной водой. Согласно этому, данное явление может рассматриваться как скольжение раздробленных масс пород, так как оно обусловлено ломкостью и мелкой раздробленностью составляющих наносы пород и вследствие этого происходит преимущественно в областях распространения сланцев и мергелей. Основными факторами следует считать присутствие воды и специфические свойства обломков породы. Установление надежных признаков, по которым могло бы предсказываться появление оползней в наносах, может быть произведено лишь при помощи сравнительного изучения степени

устойчивости и скорости выветривания обломков оползающих и не оползающих наносов. Во многих случаях склонность косогоры

Таблица VII.  
Оползни в наносах.

Название местности	Порода	Характер оползня
Арльберг <sup>1</sup>	Слюдистый сланец	Нанос с гнездами и линзами сырых водонепроницаемых продуктов выветривания. Многочисленные крупные и мелкие оползни. Дренаживание действительно, если дренажи не заиливаются
Бреннер <sup>2</sup>	Хлоритовый сланец, глинистый сланец, выветрелый на значительную глубину	Многочисленные оползни на склонах, несимметричное давление в Мюльтальском туннеле
Зальцбург — Тирольская жел. дор. <sup>3</sup>	Глинистый, хлоритовый и тальковый сланец	Порода после снеготаяния становилась „пльвучей“. Дренаживание дает хорошие результаты
Хур-Ароза <sup>4</sup>	Сильно нарушенный и выветрелый сланец с гнездами глины	Сдвигание подпорных стенок. Дренаж не всегда дает результаты. Обход трудных участков галлереями или мостами. Насыпанный конус, с поверхности сухой, внутри насыщенный водой, через 6 месяцев внезапно пришел в движение
Каленберг близ Вены <sup>5</sup>	Выветрелая сланцевая глина и мергель	Трещиноватый, богатый источниками мергель. Оползень шириной 100 м, глубиной 10—12 м произошел после снеготаяния, подобно движению муров. Из оползшей массы выходит мощный источник
Венецуэла <sup>6</sup>	Выветрелый гнейс и глинистый сланец	Многочисленные оползни наносов (dergumbes)
Огайо, Зап. Виргиния <sup>7</sup>	Тонкоплитчатый мергель и глинистый сланец	Многочисленные оползни наносов на пологих склонах. Дренаж большей частью успешен

<sup>1</sup> V. Pollack. Über Projektierung und Bau der schwierigeren Strecken der Arlbergbahn. Allgemeine Bauzeitung, S. 45, 53, 1886.

<sup>2</sup> Geschichte der Eisenbahnen Österreichs.

<sup>3</sup> C. S. Wagner. Absitzungen und Rutschungen an Schutthalde von Gesteinen älterer Formationen. Allgemeine Bauzeitung, S. 21, 1881.

<sup>4</sup> Vom Bau der Eisenbahn Chur-Arosa. Deutsche Bauzeitung, 1915.

<sup>5</sup> H. Wolf. Die Rutschung am Kahlenberggehänge längs der Donau. Wochenschrift für öff. Baudienst, S. 149, 1876.

<sup>6</sup> Brückenunfall in Venezuela. Zentralblatt der Bauverw. S. 320, 1899.

<sup>7</sup> G. E. Ladd. Landslides and their relations to highways. Public Roads, 1927; также наблюдения Терцаги.

к оползанию может быть установлена даже по одним топографическим особенностям. При борьбе с оползнями в наносах в первую очередь необходимым является перехват и отвод водяных струй. Следующим мероприятием является укрепление подошв оползающих масс с помощью подпорных сооружений. Уже Pollack<sup>1</sup> выяснил, что оползневые движения наносов (конечно, после осушения) могут быть остановлены при помощи сравнительно слабых подпорных стенок. Подобные же заключения были сделаны в САСШ, с той только разницей, что там очень часто вместо сооружения стенок забивают ряд расположенных на более или менее значительных расстояниях друг от друга свай или стальных труб, проходящих через наносы в выветрелые коренные породы. Стальные трубы после их забивки выбуриваются и заполняются бетоном. Если первый ряд свай является недостаточным, то загоняют промежуточные новые свай<sup>2</sup>. На рис. 31 изображено применение этого мероприятия к укреплению оползающего насыпного откоса. Первый ряд свай (видимый на заднем плане) оказался недостаточным и был отжат оползающими массами вниз по склону.

Типичные потоки пород, сопровождающиеся осадкой грунта (Setzungsfliessung). Обвалы и оползни по поверхностям скольжения должны рассматриваться, как явления скалывания в чистом его виде, сходные со скалыванием твердых тел. В оползнях в трещиноватых глинах, пронизанных прожилками водоносных песков, или в наносных образованиях мы имели движения, происходящие вследствие более или менее быстрого уменьшения внутреннего сопротивления. В наиболее чистом виде такое предварительное уменьшение внутреннего сопротивления проявляется в типичных потоках породы, сопровождающихся осадкой грунта. Типичные потоки пород, сопровождающиеся их осадкой, отличаются тем, что лишенный сцепления материал с точно соответствующим ему углом естественного откоса приходит внезапно в движение и при этом ведет себя так, как будто бы коэффициент внутреннего трения сразу снизился от нормальной величины до ничтожной его части.

Для того чтобы правильно понять сущность этого явления, необходимо прежде всего ясно представить себе, каким образом приходят в равновесие грубозернистые массы, например, песок. Каждое зерно опирается на соседние зерна. Оно входит в известную группировку зерен и вследствие этого обладает очень ограниченными возможностями движения.

Вследствие такой ограниченной возможности движения зерна могут только в таких случаях перегруппировываться из данной группировки в новую (потоки песков), когда они временно в достаточной степени разрыхляются. Такое явление было установлено Reynolds<sup>3</sup> еще в 1885 г. Этот исследователь подметил, что форму каучукового мешочка, наполненного сухим песком, можно

<sup>1</sup> V. Pollack. Über Bewegungen des anstehenden Bodens bei Erd- und Felsarbeiten. Zentralblatt der Bauverw., 47 Jg, H. 37 u. 38.

<sup>2</sup> Protecting West Virginia Highways from sliding hill damage, Eng. News-Record, vol. 94, p. 30, 1925.

<sup>3</sup> Phil. Magazin, vol. 20, p. 469, 1885.

изменять без употребления сколько-нибудь значительных усилий. Если же вытеснить водой весь заключающийся в порах песка воздух, не меняя плотности расположения зерен, и запечатать мешочек, то он окажется твердым как камень. Он не изменит своей формы даже при нагрузке в несколько сот фунтов, так как вода совместно с резиновой оболочкой препятствует появлению необходимого для этого временного увеличения объема пор.

Допустим, что изменение структуры мелкозернистого песка может произойти вследствие истечения его, например через проделанное в креплении штольни отверстие. Если песок был сухой, то движение его в штольне прекратится, как только угол откоса достигнет величины около  $32^\circ$ . Прекращение движения связано

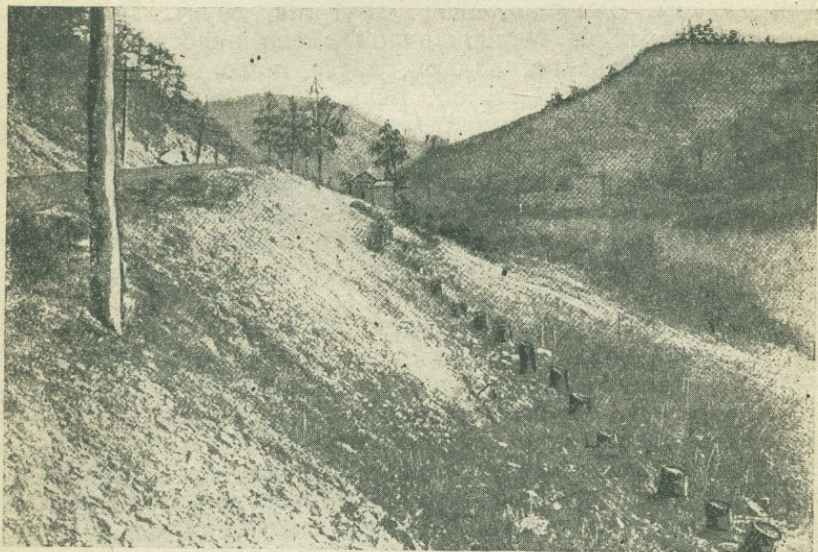


Рис. 31. Борьба с оползанием склонов при помощи свай или стальных труб. (фотогр. Бюро общ. дорог в Вашингтоне).

с уменьшением объема пор, так как, как говорят, материал „сидится“. Если же это явление происходит в сопровождении обильного количества воды, вытекающей вместе с песком, то материал будет течь вдоль подошвы штольни до тех пор, пока угол его откоса не достигнет величины  $10^\circ$  или меньше. В этом случае необходимому для стабилизации уменьшению объема пор препятствует присутствие воды, и материал остается до тех пор текучим, пока угол откоса не снизится до величины угла внутреннего трения этой тестообразной массы.

Подобного рода явления, происходящие в природе в крупном масштабе, известны под названием „мурав“. После сильных ливней или во время снеготаяния в сфере действия горного ручья приходят в движение кучи наносов и перекатываются как вязкая жидкая масса, состоящая из воды, земли, песка, галечника, валунов и деревьев, перепутанных в полном беспорядке, подобно лавовому

потоку вниз по долине. Типичным для приближающихся муров является частичное или полное иссыкание воды в русле ручья; если, при прочих благоприятных для образования муров условиях (и при наличии указанных выше многочисленных признаков), начинается явное уменьшение количества протекающей по руслу ручья воды, то можно безошибочно рассчитывать на скорое появление мур<sup>1</sup>.

Эти наблюдения, в связи с приведенными выше указаниями, выясняют сущность явления. Первая часть явления представляет увеличение объема пор до величины, при которой зерна становятся вполне подвижными. По Стини, увеличение объема пор происходит вследствие того, что высокие воды вымывают в русле горного ручья песок и гравий из промежутков между валунами, оставляя валуны опирающимися друг на друга. При обвалах берегов, сложенных из беспорядочной смеси наносов с валунами, основание их подмывается водами, масса приходит в движение и сваливается в эрозионный жолоб. Если бы поры этой массы были пустыми, то масса при одновременном уменьшении объема пор дала бы осадку, как только угол ее откоса достиг бы величины угла естественного откоса. Если же во время начального явления разрыхления в увеличенные поры внедрится вода, то осадка замедляется, и явление получает характер потока породы, причем материал имеет тестообразный вид и совершенно ничтожное внутреннее трение.

Второй причиной, иногда связанной с образованием потоков породы, дающих осадку, является перегруппировка зерен, происходящая от времени до времени в рыхло отложенных массах песка под влиянием ничтожных внешних причин. Так, в Голландии наблюдались в постройках, расположенных на искусственных песчаных насыпях, внезапные просадки на глубину от 17 до 216 мм<sup>2</sup>. Говорят, что они будто бы вызваны подъемом уровня грунтовых вод выше основания насыпи и что они чаще происходят в песках с округленными зернами, нежели с остроугольными. В мелком масштабе склонность рыхло отложенных песков к внезапным перетолжениям проявляется при лабораторных опытах в виде происходящего толчками сжатия материала под действием постоянного давления<sup>3</sup>. Внезапная осадка показывает, что часть массы находилась в неустойчивом состоянии, и что стабилизация связана с уменьшением объема пор. Если же поры материала заполнены водой, то переход в стабильное состояние задерживается, и находившийся в состоянии осадки материал становится временно текучим.

Типичный пример осадки потока песков изображен на рис. 32 (осадка потока песков у Норд-Бевеланд-Польдера в Голландии). Местность в пострадавшей зоне (берег Зеландии, Голландия) сложена из толщи дилювиальных песков, мощностью от 20 м на юге, увеличивающейся до 40 м на севере. Зерна песка бесцветны,

<sup>1</sup> I. Stiny. Die Muren. Innsbruck, 1910.

<sup>2</sup> Über den Einfluss des Grundwasserstandes auf die Tragfähigkeit von Sandbetonungen. Zeitschr. d. Österr. Ing. u. Arch. Ver., S. 445, 1903.

<sup>3</sup> Terzaghi. Erdbaumechanik. Abschnitt 15 d und Abb. 19a, S. 103.

округлые, диаметром от 0,25 до 0,75 мм. Геологические исследования показали, что песок первоначально осаждался в озерном водоеме, расположенном еще южнее<sup>1</sup>. В течении дилuviальной эпохи уровень воды этого водоема поднялся до самого водораздела, прорезал последний, и вода через образовавшийся эрозионный канал стекла в море, унося вместе с собой и песок. В геологическом отчете отмечено, что все это произошло с катастрофической скоростью, так как окаменелости оказались раздавленными и разломанными. Обвалы песка сопровождался глухим гулом, похожим на раскаты грома. Затем песок устремляется с большой скоростью почти в горизонтальном направлении к морю. Наиболее крупная катастрофа подобного рода произошла в 1874 г. недалеко от Борселе, причем пришло в движение 1 600 000 м<sup>3</sup> песка. В отчетах указывается, что обвалы песка всегда происходят при отливе и большею частью после особенно больших приливов.

Подобного же рода явление произошло по J. D. Justin<sup>2</sup> с искусственной песчаной насыпью в САСШ (без указания пункта).



Рис. 32. Осадка песчаного потока у Норд-Бевеланд Польшер в Голландии (по Мюллеру).

Находящийся в районе затопления будущего водоема железобетонный устой железнодорожного моста был перед первым наполнением водоемов подсыпан до высоты 18 м над уровнем земли грубозернистым песком, причем откосу был придан крайне пологий уклон, 1 : 4. Основание было сложено мелкозернистым плотным песком. Когда наполнение бассейна водой достигло высоты до 6 м ниже самого высокого горизонта, подсыпка песка сделалась внезапно текучей и устремилась всей массой в 20 000 м<sup>3</sup> более чем на 100 м в бассейн.

На рис. 33 показаны поперечные профили нескольких обследованных шведской Геотехнической комиссией оползней, которые очевидно относятся к потокам пород, сопровождающимся внезапной осадкой грунта. Оползень в Сэм (рис. 33а) произошел вследствие заложения боковой выемки глубиной в 3 м. При происшедшем нарушении равновесия масса потекла в виде потока вниз к долине. На оползне (рис. 33б) показана дамба из галечника, насыпанная на дне вычерпанного до глубины 4 м канала, причем дамба поднималась до до высоты 5 м над первоначальным уровнем земли. Откосы имели уклон 1 : 1,5. Вследствие того, что откос вычерпанного канала со стороны моря деформировался, галечник дал внезапную осадку (перегруппировка зерен), и материал, сделавшийся временно те-

<sup>1</sup> Fr. Müller. Das Wasserwesen der Provinz Zeeland. Berlin, 1908.

<sup>2</sup> I. D. Justin. The Design of Earth Dams. Transact. Am. Soc. of Civ. Eng., vol. 87, p. 44. 1924.

кучим, продвинулся по имевшему уклон 1 : 10 морскому дну на 100 м вперед, причем покрывавший дно слой ила в 1 м оказался сдвинутым и образовал вал кругом оползневого языка.

В Sagsjöп (рис. 33с) материал, из которого насыпана дамба, потек почти в горизонтальном направлении в виде языка длиной 70 м и мощностью 4 м, причем он двигался вдоль границы между довольно плотной глиной и лежащим на ней слоем ила и отодвинул ил на 40 м вперед. Прорванный участок дамбы имел длину около 200 м. И здесь причину очевидно следует видеть в внезапной осадке материала насыпанной дамбы.

Если потоки породы, сопровождающиеся внезапной ее осадкой, могут являться только как следствие местной перегруппировки

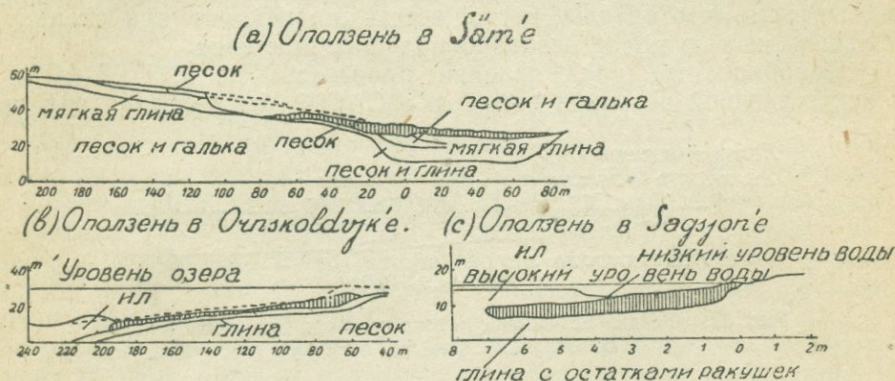


Рис. 33. Оползни, сопровождающиеся осадкой песчаного потока в Швеции.

зерен песка, то склонность песчаной массы к образованию таких потоков при остальных одинаковых условиях должна быстро уменьшаться с увеличением плотности сложения песка. Кроме того образованию потока породы повидимому благоприятствуют округленность зерен и большая однородность (коэффициент неоднородности между 1 и 5). Наконец, подвижность увеличивается с уменьшением крупности зерен (Terzaghi. Erdbaumechanik). Наиболее действительным мероприятием по борьбе с таким явлением является в данном случае обезвоживание при помощи дренажей. Где такие меры невозможны, можно предложить уплотнение массы или перерыв ее сплошности при помощи забивки свай.

Подземные песчаные потоки. Подземные потоки песка представляют нечто среднее между потоками породы, дающими внезапную осадку, и явлениями движения, образующимися в соседстве с туннелями, проходящими в плавучих породах и имеющими следующие признаки: если в пласте песка, залегающем в сфере грунтовых вод, производится выемка, расположенная ниже их уровня, то вытекающая грунтовая вода приводит на выходах песок в движение. Движение будет происходить, как и при потоках пород, дающих осадку, вследствие значительного увеличения объема пор, и текучесть будет поддерживаться движущейся вслед водой. Текучесть распространяется от выхода по направлению против движения, т. е. в гору, и обычно захватывает только узкую канал-или рукаво-

образную полосу. Развитие потока в обратную сторону обусловлено тем обстоятельством, что разжижение требует значительного увеличения объема пор, а такое может произойти во всяком месте только в том случае, когда появится возможность увеличения объема, вследствие оттока части прилегающего материала.

Сопrotивление нагрузке песка, находящегося в состоянии текучести, настолько мало, что залегающие над ним породы должны были бы осесть, если бы они не образовали свода над потоком. Является еще открытым вопрос, заполняют ли песчаные потоки полностью сечение жолоба, по которому они движутся, или не образуется ли постепенно между песчаным потоком и кровлей жолоба промежуток, заполненный водой. Последнее, по крайней мере в некоторых случаях, несомненно имеет место. Если при развитии песчаного потока в обратную сторону разжижение в каком-либо пункте подходит близко к поверхности земли, то лежащая над текучими песками порода оседает или вследствие недостаточного

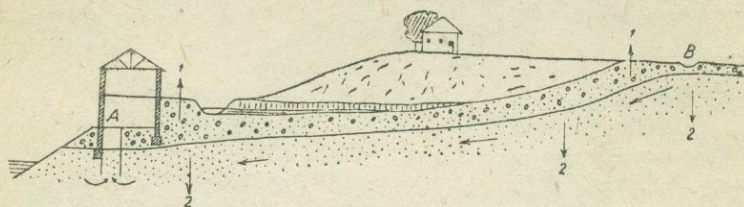


Рис. 34. Провальная воронка В в связи с откачкой воды из пльвуна в колодце А.

1. Грубый песок с пропластками глины и плотно слежавшейся гальки.
2. Тонкий пльвучий песок.

сопротивления ее нагрузке, или вследствие образования пустоты, и на дневной поверхности образуются провалы.

Рис. 34 изображает продольный разрез склона долины среди моренного ландшафта в Фремингэме, Коннектикут. Около пункта А была произведена откачка для осушения строительного котлована, окруженного шпунтовыми стенками. Несмотря на то, что шпунтовая стенка была углублена на 4 м ниже подошвы котлована, песок пришел в движение. Сначала обрушилась часть постройки, ближайшая к зумпфу насоса. Через некоторое время в расстоянии около 100 м от места обрушения на высоте около 20 м выше пониженного уровня воды на дневной поверхности образовалась провальная воронка (В), диаметром около 6 м и глубиной 1 м. Песок, по Terzaghi, состоял из прозрачных угловатых зерен кварца с небольшим количеством слюды. Действующая величина зерна была около 0,02 мм и коэффициент неоднородности около 3. Явление можно объяснить так, что текучесть песка распространилась от зумпфа по направлению вверх по склону узкой полосой, по которой песок двигался в виде потока под более плотными, покрывающими его породами вниз по направлению к месту обрушения. Еще более замечательным был провал на дневной поверхности, изображенный на рис. 35, в Мемфисе, Теннесси, приведший к полному разрушению угольной сортировки 25 июля 1927 г. Представленная на рис. 35 в поперечном разрезе полоса земли (длиной 200 м, шириной в среднем

30 м) начала давать осадку со скоростью 30 см в час, пока эта осадка не достигла величины около 10 м. В этой первой стадии опускания полоса земли с насланной на ней мостовой оставалась почти совершенно цельной и была окружена со всех сторон очень крутыми гладкими поверхностями скольжения (поверхностями срыва (рис. 36). При дальнейшем ходе катастрофы мульда расширилась, и оставшийся между опустившейся площадкой и рекой Миссисипи гребень сделался более пологим, причем постройка опустилась еще на 10 м и придвинулась метров на 15 к реке. Первая просадка произошла при уровне воды около 1,8 м выше нуля рейки. Следующие движения произошли после половодья 1927 г. (горизонт воды 12 м выше нуля рейки), причем уровень воды в реке понижался около 30 см в сутки.

Местое у которого песок вытекал, должно было находиться в расстоянии не меньше 100 м от южного конца опустившейся

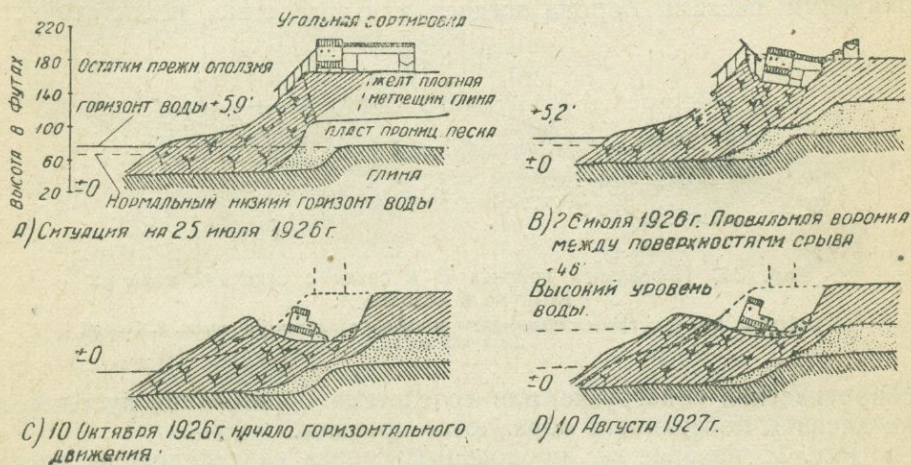


Рис. 35. Оседание поверхности в Мемфисе, Теннесси.

площадки (почти прямоугольной). Просадка была, повидимому, обусловлена тем, что течение вскрыло в этом месте песчаный слой и таким образом захватило собравшуюся в песчаном пласте грунтовую воду, находившуюся под напором столба воды около 10 м. До вскрытия пласта песка грунтовая вода задерживалась от вытекания мощным пластом глины, перекрывавшей склон. После вскрытия песок стал вымываться потоком грунтовой воды и вытекать, причем разжижение песка распространилось от выхода в обратную сторону вдоль линии наименьшего сопротивления, по направлению к угольной сортировке. Водопроницаемый слой состоял из очень чистого однороднозернистого мелкого песка с округленными прозрачными зернами кварца, с действующей величиной около 0,2 мм. Над ним залегал слой плотной пластичной бурой глины (легко выветривающейся).

Несколько сот метров ниже по течению от этого провала Терцаги имел случай наблюдать подобный же провал, но меньшего масштаба, который позволил ближе разобраться в этом явлении: В этом пункте во время разлива 1927 г. в неглубоком мульдооб-

разном жолобе равномерно отложился слой песка мощностью до 4 м. Подошвой песчаного пласта являлась сползшая с высокого берега в январе 1927 г. глинистая масса. Как видно на рис. 37, на поверхности этого песчаного пласта образовался широкий, ограниченный низкими вертикальными ступенями срыв, который по направлению к берегу продолжался в виде узкой неглубокой мульды.

Подземная эрозия была произведена стекавшими в дождливое время года со склонов водами, собиравшимися в виде грунтовой воды в песках, подстилающихся водонепроницаемыми глинами в мульде, и текущими по этим пескам в направлении вниз к реке. Выход этого миниатюрного потока грунтовой воды был отмечен на берегу реки уступом с крутой зубчатой стенкой высотой около

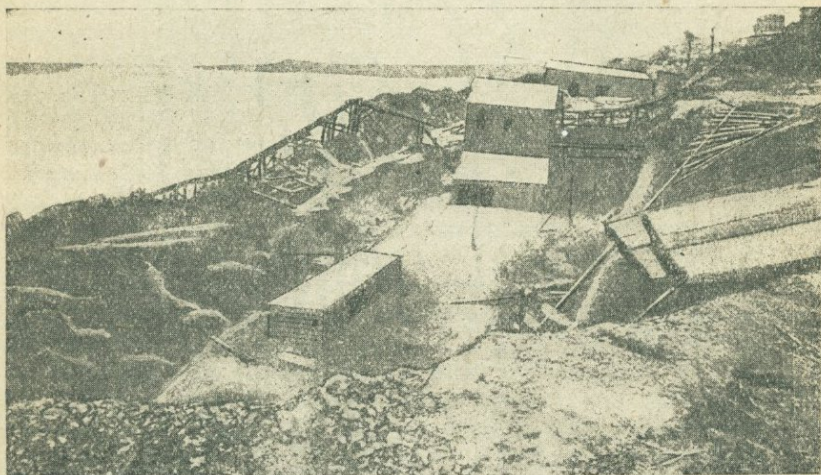


Рис. 36. Вид осевшей поверхности. 27 июля 1926 г.

1,5 м, окружающим конец языка песчаных отложений. От подножия крутого уступа до самого берега реки располагался веерообразно песок (рис. 37). Топография опустившегося участка ясно показывала, что песок с широкой площади залегания двигался под землей по узкой полосе вдоль границы песка и глины по направлению к месту, где он вытекал на поверхность. Так как кроме вертикальных уступов и неглубокой мульдообразной полосы поверхность земли не претерпела никаких других нарушений, то течение песка должно было ограничиваться только более глубокими частями песчаного слоя.

Другой пример распространения текучести песков в виде полосы показали наблюдения при землечерпательных работах на судоходном канале в Хаустоне, Техас. К югу от Хаустона подпочва представлена чрезвычайно мелким беловатым наносным песком, который во многих других местах бассейна Миссисипи и прибрежной равнины был вскрыт при буровых работах и который при сооружении канализации в Хаустоне представил большие затруднения вследствие своей подвижности.

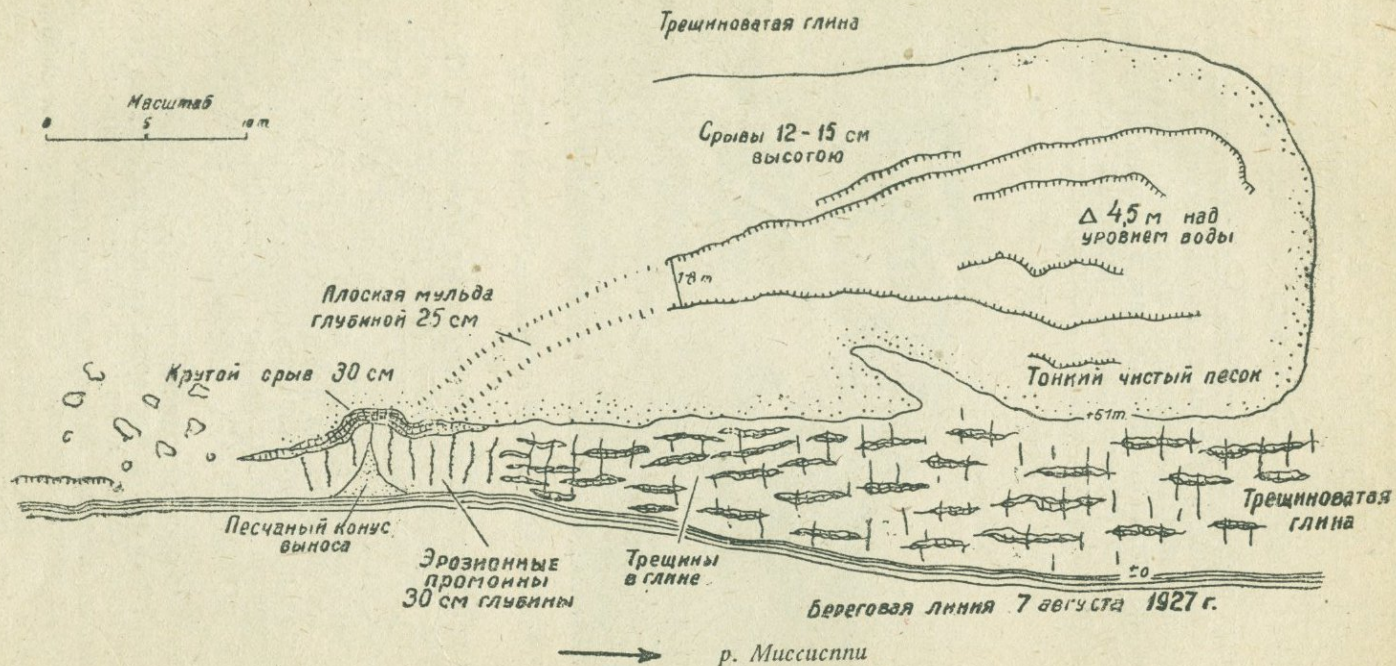


Рис. 37. Оседание поверхности на берегу Миссисипи

В одном пункте этого канала, глубиной 9 м, землесос работал целую неделю и выработал около 50000 м<sup>3</sup>, не произведя сколько-нибудь заметного понижения подошвы канала и не давая поблизости канала никаких признаков осадки земли. Откуда взялась эта крупная масса земли, осталось неизвестным. В другом пункте в расстоянии около 100 м от оси канала находилась стенка набережной. Разность высот между подошвой канала и верхней гранью стенки была около 15 м. Во время работы землечерпалки около оси канала резко ограниченная часть стенки набережной длиной 90 м осела на 3 м (согласно устным данным инж. R. Cummins). В этих местностях хорошо известно, что подвижность песков распространяется отдельными полосами. Петрографическое исследование подвижных и недвижущихся мелких песков из округа Бразос в Техасе показало, что петрографические различия между ними установить повидимому нельзя<sup>1</sup>. Все эти фактические данные, видимо, подтверждают положение Терцаги, что подвижность песка происходит вследствие особенно рыхлой группировки его зерен, являющейся следствием быстрого отложения этого песка.

Подвижность песка проявляется преимущественно вдоль поверхности контакта между песком и другим, значительно от него отличающимся материалом (галечник, суглинок, глина), как это наблюдалось также при образовании прорывов в размываемых основаниях подпорных сооружений. Землетрясение, которое произошло в Новом Мадриде в декабре 1811 г. и которое охватило долину Миссисипи между С.-Луи и Мемфисом, по своей интенсивности превосходило землетрясение в С.-Франциско, сопровождалось образованием многочисленных провалов и местных извержений песка. Площади провалов сохранились еще по сегодня в виде мелких плоских озер и представляют собой несомненно зоны подземного оттока песков<sup>2</sup>. Проф. Shepard пошел еще дальше и объяснил как это, так и другие землетрясения провалами в пустоты, образовавшиеся вследствие вытекания песков<sup>3</sup>. Наконец, могут быть упомянуты еще провалы земной поверхности, называемые Backofen „рукавообразные оползни“. Они напоминают хотя бы только с морфологической точки зрения только что описанные явления. К сожалению, у него не приведено описания вытекавшего материала<sup>4</sup>.

## 5. ХОД ОПОЛЗНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ.

В предыдущей главе речь шла только о первой стадии оползневых явлений, т. е. о процессах, предшествующих и обуславливающих появление оползней. Дальнейшее течение оползневых процессов зависит в значительной степени от физических свойств материалов, принимающих участие в оползневых движениях.

<sup>1</sup> F. G. Burt. The quicksands of Brazos County. Texas. The Journal of Geology, vol. 35, № 7, 1927.

<sup>2</sup> M. L. Fuller. The New Madrid Earthquake U. S. Geol. Survey. Bull. № 494, 1912.

<sup>3</sup> E. M. Shepard. The New Madrid Earthquake Journal of Geology, vol. 13, p. 45—62, 1905.

<sup>4</sup> K. Backofen. Gleitflächen bei Rutschungen im Ton. Zentralblatt der Bauverw., 47 Jg., Heft 31 und 32, S. 388, 404—406.

наиболее благоприятном случае оползающая масса, пройдя небольшое расстояние, останавливается.

Такой оползень в глинах, представляющих продукт выветривания девонских известковистых сланцев, произошел в Паша-Лимане. Он был заснят весной 1923 г., и наблюдения над ним велись в течении 2 лет. Вся его масса оставалась неподвижной даже во время снеготаяния (рис. 38).

От таких медленных спокойных массовых движений имеются все переходы к катастрофическим оползням в глинах, при которых глиняные массы после срыва преобразуются в глетчерообразные потоки и продвигаются по почти горизонтальным поверхностям в направлении к долинам. Причины такого перехода оползших масс в текучее состояние несомненно не являются одинаковыми для всех оползней.

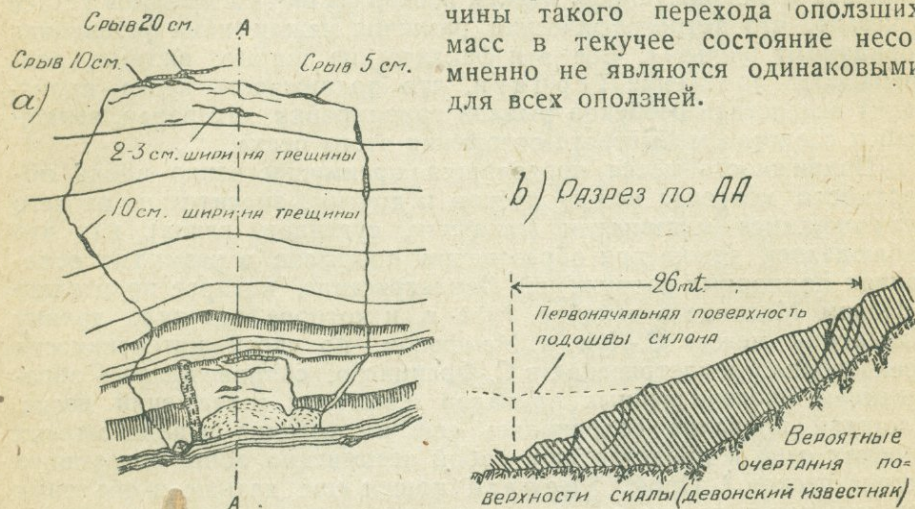


Рис. 38. Оползень в Паша-Лимане.

У многих из северных оползней, происходящих в однородных глинах, значительную роль должно играть уменьшение силы сцепления, связанное с изменением структуры материала (вследствие перемятия), изображенное на рис. 3.

К подобным же массовым движениям относится оползень в Вердалэне, при котором масса около 55 000 000 м<sup>3</sup> продвинулась на 11 км вниз к долине по слабо наклонной поверхности и образовала грязевой поток глубиною в 12 м<sup>1</sup>.

Перемятие (изменение структуры), особенно в начальной стадии подобного движения, не имеет такого большого значения, чтобы ему одному можно было приписать причину образования „текучести“. К нему необходимо добавить еще один фактор, которому до настоящего времени не уделялось должного внимания. Так как поверхности скольжения никогда не являются правильно цилиндрическими, а всегда по направлению к долине становятся более плоскими, то полутвердые глинистые глыбы при скольжении

<sup>1</sup> Die Rutschung in Vaerdalen, Norwegen. Schweizer Bauzeitung, 23, Bd I, S. 17 п. 25. 1894.

вниз разламываются, причем отдельные части их сдвигаются одна относительно другой, и величина поверхности их соприкосновения уменьшается на небольшую долю поперечного сечения глыб. Вследствие такого уменьшения величины сопротивляющихся разрыву поверхностей контакта, уменьшается на небольшую долю первоначальной величины и степень устойчивости всей массы. Характер разлома, который при оползании приобретает глинистая масса, должен поэтому оказывать на ход оползня во многих случаях по меньшей мере такое же влияние, как оказывает изменение структуры отделяющихся масс на уменьшение силы сцепления. При периодических продвижках вперед языка сползших суглинистых или глинистых масс значительную роль играет также изменение структуры породы под влиянием попеременного усыхания и увлажнения, так что механизм таких движений в известном смысле может быть сравниваем с оползнями в наносах.

Оползневая масса в Драйнох (Канада) представляет состоящий из суглинка земляной глетчер, шириною 450 м и длиною 2,5 км, который продвигается вперед на 3,3 м в год. В течении некоторых месяцев масса останавливается и не движется <sup>1</sup>. При постройке участка Цирсдорф-Эггенбург железной дороги Франца-Иосифа сползающая масса двигалась по поверхности с уклоном 1:12 со средней скоростью 0,75 м в месяц. После сильных дождей скорость движения увеличивалась <sup>2</sup>.

Грязевой поток двигался с Пульверхердля (Сандлинг-группа) вниз по долине, покрывая площадь в 40 га и имея на конце языка мощность в 10 м. Язык продвигался со скоростью, уменьшавшейся с 13 сентября по 1 октября с 50 м в час до 1 м в час и 15 октября совсем остановился <sup>3</sup>.

При оползнях в глинах, переслаивающихся с водоносными песками или прорезанных песчаными прожилками, смесь глины с водами, содержащимися в песках, имеет большое значение.

О причинах, много раз отмечавшихся Pollack, особенной подвижности продуктов выветривания основных изверженных пород, в особенности базальтов, ничего определенного нам пока неизвестно.

В Гроспризен-Ауша <sup>4</sup> земляные массы пришли в движение на значительной площади после производства выемки глубиной в 1 м. Также в Бебре-Ганау и на железной дороге Легение-Михали-Гомона базальтовые земли отличались большой подвижностью <sup>5</sup>. С другой стороны, наблюдения Terzaghi к северу от Константинополя и в прилегающих частях Малой Азии пока-

<sup>1</sup> Landslides. Engin. Record, I, S. 737, 1909.

<sup>2</sup> H. Raschka. Die Rutschungen im Abschnitt Ziersdorf—Eggenburg der Kaiser Franz-Josephs-Bahn. Zeitschrift. d. Österr. Ing. und Arch. Verein, S. 561, 1912

<sup>3</sup> Lehmann. Die Verheerungen in der Sandling-Gruppe (Salzkammergut). Denkschriften der Akademie d. Wissenschaften in Wien, Math.-naturwiss. Klasse, Bd. 100, S. 287.

<sup>4</sup> V. Pollack. Über Bewegungen des entstehenden Bodens bei Erd- und Felsarbeiten. Zentralblatt der Bauverw., 47 Jg., S. 474—477 u. 487—488.

<sup>5</sup> V. Pollack. Technische Geologisches über den Durchstich von Wasserscheiden. Zeitschr. d. Österr. Ing. u. Arch. Ver., H. 4 bis 9, 1918. См. также Pollack. Zur Frage der Bogenbewerlichkeit und Druckfestigkeit der Tongesteine und Vervandter Materialien. Kolloid Zeitschrift. 201, 1917. H. 1.

зали, что продукты выветривания развитых там диабазов и андезитов не проявляли сколько-нибудь значительной склонности к оползневым движениям.

До настоящего времени нет еще никаких данных для того, чтобы иметь возможность объяснять подвижность базальтовых земель какими-либо определенными физическими свойствами этого материала. Повидимому скорее всего здесь преобладает значение характера структуры или же обусловленной трещиноватостью базальтов водоносности подстилающих их пород.

## 6. ОПИСАНИЕ НЕКОТОРЫХ СПЕЦИФИЧЕСКИХ СЛУЧАЕВ.

**Движение берегов озер.** Эти особого рода оползневые движения получили значительное развитие за последнее десятилетие, вследствие использования естественных озерных котловин для устройства на них напорных установок. Значительное число случаев таких движений было исследовано в Швейцарии и Северной Италии. Движения происходят преимущественно по краям дельтовых образований, но бывают также и на озерных береговых террасах.

На озере Вольфганг участок дельтовых отложений горного ручья, состоящих из крупнозернистых песков и галечников, с шумом, подобным грому, двинулся в озеро, увлекая с собой часть дороги и железнодорожного полотна<sup>1</sup>. Оползни на берегах озера Изео были подробно описаны и классифицированы в итальянской литературе<sup>2</sup>. Дельтовые отложения Таверноля состоят главным образом из известкового песка и гальки и имеют угол падения склона около  $35^\circ$ . По мере приближения к дну озера уклон откоса уменьшается. Наибольшая высота оползающего сегмента при оползнях этих пород (высота стрелы оползня) колебалась от нескольких метров до 30 м. Движения отличались тем, что ограничивались исключительно местом срыва. Согласно Pollack, причина движений заключалась в нагрузке поверхности дельты строениями, отвалами (мусором) и в насыщении дельтовых отложений талыми водами при низком уровне стояния воды в озере.

Также и на озере Ритом и в Давосе происходили многочисленные оползни в дельтовых отложениях. На озере Ритом они появились, когда нормальный уровень воды в озере понизили на 18 м. Угол падения склона был здесь  $17-20^\circ$ <sup>3</sup>. В Давосе 7 февраля 1923 г. часть дельты ручья Тодальп, сложенной из мелкого серпентинного песка с небольшой примесью гальки, потекла в озеро после того, как уровень воды в нем был понижен на 42 м. Оползший сегмент имел длину 300 м, высоту стрелы оползня 80—90 м, и оползшая масса представляла объем в 900 000 м<sup>3</sup>. Ледяной покров озера, толщиной 80 см, был раздроблен<sup>4</sup>, и оползневая масса продвигала впереди себя слой ила мощностью в 3 м.

<sup>1</sup> Pollack, V. Über Seeuferbewegungen. Österr. Wochenschr. f. öffentl. Bandienst. 1912.

<sup>2</sup> F. Salmoiraghi. L'avvallamento di Tavernola sul lago d'iseo con un cenno sulla instabilità delle rive lacuali 1907 (Estrato degli Atti della Soc. Ital. di Scienze Naturali; vol XLVI).

<sup>3</sup> Roth. Schweizer Bauzeitung, 74 Bd., S. 51. 1919.

<sup>4</sup> R. Moor. Der Uferabbruch am Davoser See. Schweizer Bauzeitung, Bd. 82, 1923. S. 55.

Только что описанные, а также и многие другие движения озерных берегов представляются настоящими потоками пород, сопровождающимися внезапной осадкой грунта, и как таковые трудно поддаются количественному учету, так как внутреннее трение песка в момент его истечения неизвестно. Условия, подготовляющие такие движения, можно указать следующие: обстоятельство, связанное с происхождением самой дельты, именно, что в основании дельтовых отложений очень часто встречается слой ила или грязи, и то обстоятельство, что при понижении уровня воды в озере давление на слой ила увеличивается. Вследствие слабой водопроницаемости ила происходит значительная разница фаз между увеличением нагрузки на ил и соответствующим ей увеличением сопротивления трению. Вследствие этого при понижении уровня воды или увеличении налегающей на слой ила нагрузки могут произойти местная перегруппировка частиц породы и их осадка, которые, как указано выше, производят оседание потоков пород. Подсчитанное Maуer Peter добавочное давление, связанное с понижением уровня воды, также относится к причинам движения, как и вообще добавочная нагрузка или накопление снеговых вод. Центр тяжести всего явления все же следовало бы искать в охватывающем всю массу внезапном уменьшении сопротивления внутреннего трения. Такое объяснение кажется между прочим ближе подходящим, так как фактически подобные оползни могут происходить и при отсутствии слоя ила, а также и без понижения уровня воды.

Рядом с типичной осадкой потоков пород, могут происходить на озерных берегах и все другие роды оползней до срывов по поверхности скольжения. При даче заключений о происшедших оползнях и при обследовании устойчивости берегов озер должны быть приняты в расчет, в качестве оползневых факторов, связанные с понижением уровня воды изменения давления, а также и боковое давление движущихся грунтовых вод. Самый главный фактор, угрожающий устойчивости, — склонность к текучести, до сих пор еще не поддается учету. Способность породы к проявлению свойств пльвунов и к образованию рукавообразных оползней всецело зависит от геологической истории процесса образования самой осадочной породы.

**Оползни насыпей.** Оползни насыпей происходят или вследствие превышения предела устойчивости грунта в основании насыпи, или вследствие недостаточной устойчивости тела насыпи. При превышении предела устойчивости грунта происходит или обыкновенный срыв по поверхности скольжения (рис. 23), или выдавливание без трещин разлома (глава V), или скольжение по поверхности более или менее параллельной поверхности земли или вдоль границы между различного рода осадками. В последнем случае главнейшую роль играет много раз уже повторявшаяся разность фаз между увеличением нагрузки на глину и соответствующим увеличением сопротивления трению (рис. 2). Если принять, что имеем глину с коэффициентом внутреннего трения, равным  $\operatorname{tg} 14^\circ = 0,25$ , перекрытую до производства насыпи слоем в 3 м более или менее проницаемой породы, то вес нагрузки получается  $3 \times 1,6 = 4,8 \text{ т}$  на  $1 \text{ м}^2$ , а сопротивление скольжению на поверхности глины  $0,25 \times 4,8 = 1,2 \text{ т}$  на  $1 \text{ м}^2$ .

Если бы увеличение действующего на глину давления было связано с немедленным же увеличением сопротивления глины скольжению, то скольжение могло бы осуществиться только в том случае, если бы угол падения поверхности глины доходил по меньшей мере до  $14^\circ$  ( $\operatorname{tg} 14^\circ = 0,25$ ) (1:4). Но этого в данном случае нет. Если же на поверхности этой почвы вывести насыпь высотой 12 м, то давление на поверхности глины тотчас же увеличивается до пятикратного против первоначального; сопротивление скольжению грунта по глине только тогда примет свою нормальную величину, именно  $5 \times 1,2 = 6$  т. на  $1$  м<sup>2</sup>, когда соответствующее повышению давления количество воды вытечет из глины в водопроницаемый грунт. Вследствие малой водопроницаемости глины такая отдача воды происходит очень медленно. Тотчас по окончании насыпи пласт глины ведет себя так, как если бы коэффициент трения между грунтом и глиной уменьшился с 0,25 до  $\frac{1}{5} \times 0,25 = 0,05$ . Вследствие этого насыпь вместе с подстилающим ее пластом грунта может начать ползти даже в том случае, когда поверхность глины имеет падение не более  $3^\circ$  (1:20). Чем выше насыпь, тем меньше критический угол падения поверхности глины. Это положение имеет многочисленные доказательства в оползневой литературе.

В долине р. Брент близ Гатвеля в Англии была возведена 15-метровой высоты насыпь на почти горизонтально залегающем слое лондонской глины, мощностью несколько метров<sup>1</sup>. Глина залегала на пласте водоносного гравия, и ось насыпи была заложена в расстоянии около 90 м от берега мелкой, углубленной в лондонской глине долины р. Брент. Вследствие указанных выше физических свойств расположенная со стороны реки половина насыпи сползала и продвинула перед собой всю полосу земли, расположенную между насыпью и рекой, причем поверхность соприкосновения между глиной и хрящем явилась поверхностью скольжения. Берег р. Брент был продвинут на 1,5 м в реку.

Осенью 1875 г. насыпь Зальцбург-Тирольской жел. дор. вместе с подстилающей ее породой сползла на несколько сантиметров вниз по направлению к долине по „взмывленной поверхности скольжения“, угол падения которой был всего  $4^\circ$  ( $\operatorname{tg} 4^\circ = 0,07$ ). В следующую весну движение повторилось, очевидно, вследствие увеличения веса, полученного насыпью от выпавших весенних атмосферных осадков. Из этого наблюдения был сделан неправильный вывод<sup>2</sup>, что нормальный коэффициент трения суглинка по тегелю равен 0,07. Если бы насыпь имела только половину ее высоты, то оползая бы не произошло. Особенно интересен оползень железнодорожной насыпи, который произошел в 1910 г. на Лимбургской насыпи после прокладки второго пути на участке Цирсдорф—Эггенбург (железная дорога Франца-Иосифа, Нижняя Австрия, Рампе, подъем от долины Дуная к Нижне-австрийской Богемской возвышенности). Прокладка второго пути последовала в 1903 г. Грунт состоит из суглинков, глубже залегает глина; а также песок и галька. Эти отложения имеют возраст от современного до тре-

<sup>1</sup> Försters Bauzeitung, X, S. 257, 1845. См. также Kaven. Der Wegebau.

<sup>2</sup> Ballif. Ein Versuch zur Bestimmung des Reibungskoeffizienten von Lehm auf Tegelschichten. Wochenschr. d. Österr. Ing. u. Arch. Ver., S. 289, 1876.

тичного и залегают слоями различной мощности непосредственно на первозданных породах, главным образом граните, который только в немногих местах выходит на поверхность<sup>1</sup>. Насыпь имела в длину 300 м, высоту в среднем 5 м (максимум 7 м) и покоилась на косогоре с уклоном 1:6. Осенью 1910 г., богатою осадками, было установлено, что низовая половина насыпи начала отделяться от нагорной и ползти в сторону долины. Поверхность скольжения залежала на глубине около 5 м ниже поверхности земли, на границе между довольно сухим, „сильно перемятым“ и несколько более плотным, но сырым желтым суглинком и имела уклон 1:12 (tg угла падения равен 0,083). Движение охватило на низовой стороне полосу земли длиной 150 м и шириной 50 м. Эта полоса двигалась глетчерообразно со средней скоростью около 0,75 м в месяц вниз к долине. После сильных дождей скорость движения увеличилась. Явление происходило несомненно следующим образом: косогор, нагруженный насыпанной в 1903 г. землей, был близок к границе равновесия, как это следует из наблюдавшихся здесь многочисленных мелких подвижек. Получившееся в 1910 г. более сильное промачивание тела насыпи увеличило вес ее и повлекло за собой образование обширной поверхности скольжения. Начавшееся при этом движение произвело образование трещин на обращенной к долине части склона, и разбитый трещинами участок после заполнения трещин дождевыми водами оказался подобным раньше сползшей глинистой массе (см. „Ход оползневых процессов“). Ввиду сомнительности, чтобы какие-либо дренажные сооружения могли при данных условиях оказать полезное действие, было решено заменить в этом месте насыпь виадуком.

Оползания насыпей вследствие недостаточной устойчивости материала, из которого они возведены, по своему характеру весьма сходны с оползнями откосов выемок и представляются столь же разнообразными. Чаще всего в подобных случаях происходят срывы по поверхности скольжения, при которых часть откоса оползает по вогнутой поверхности скольжения.

Примером совершенной противоположности, именно образования оседающего потока пород, может служить оползень насыпи в Ронгейде на железнодорожной линии Аахен—Гербесталь<sup>2</sup>. Насыпь была высотой 12 м и состояла главным образом из мелкого песка. Спустя 40 лет после ее сооружения эта насыпь после сильных дождей внезапно потекла как раз в то время, когда по ней шел поезд. В противоположность оползанию наносных образований можно привести пример насыпи, сложенной из глинистого ципридинового сланца у Грассета (линия Эгер—Карлсбад), которая весной потекла в долину в виде грязевого потока<sup>3</sup>.

Многие инженеры предубеждены против глины как материала для насыпей. Против этого предубеждения следовало бы указать, что при известных условиях глина представляет превосходный материал для насыпей.

<sup>1</sup> H. Raschka. Die Rutschungen in dem Abschnitt Ziersdorf—Eggenburg der Kaiser Franz-Josephs-Bahn.

<sup>2</sup> Kaven. Der Wegebau.

<sup>3</sup> Hochstetter. Rektoratsrede.

Около Мемфиса, Теннесси, на западном берегу Миссисипи дамбы, предохраняющие против высоких вод, состоят из чистой жирной глины с пределом текучести 75 и пластичности 35 (Terzaghi). Внутри затопляющейся площади как железнодорожные, так и вообще дорожные насыпи сложены большей частью из того же материала. Насыпи имеют высоту до 12 м, и уклон их откосов от 1:1,5 до 1:2,5. Весной 1927 г. насыпи были покрыты до верха водой. Тем не менее, исключая нескольких поверхностных чешуйчатых подвижек, никаких повреждений в насыпи не произошло.

Устойчивость тела насыпей, так же как и откосов выемок, зависит не только от известной величины силы сцепления, но и от возможности постепенного или внезапного уменьшения силы сцепления или трения. С этой точки зрения легко выветривающиеся породы представляются значительно менее надежными как материалы для насыпей, нежели жирные глины. Многие ошибки при возведении насыпей должны быть отнесены за счет неправильности предположения, что плотная вынутая при землечерпании глина при насыпке ее дает откос, в статическом отношении сходный с откосом песка. Устойчивость таких откосов зависит не только от трения, но и от сцепления. Вследствие этого степень надежности откосов насыпи, сложенной из глины, в противоположность песчаным откосам, уменьшается с увеличением высоты насыпи.

## 7. ПРОВЕДЕНИЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ЛИНИЙ ВДОЛЬ СКЛОНОВ И ПЕРЕСЕЧЕНИЕ ВОДОРАЗДЕЛОВ.

При проведении железнодорожных линий дело сводится к тому, чтобы из указанных в этой главе возможностей остановиться на тех, при которых геологические и морфологические особенности участка позволили бы или предупредить оползневые движения, или обойти критические места. Основание для суждения об этих возможностях вытекает из результатов геологической съемки местности. В горной стране избегают таких склонов, которые сложены породами, имеющими простираение и падение, близкие с направлением и падением склонов. То же относится к зонам тектонических нарушений (сбросовые зоны), так как эти склоны предрасположены к образованию обвалов по трещинам срыва, и породы могут оказываться выветрелыми на значительную глубину. Склонность какого-либо участка к образованию оползней обнаруживается нередко волнистым рельефом местности и наличием сырых мест (выходы подземных ключей). Обильные наносы в устьях горных потоков могут через некоторое время заставить поднять полотно дороги. В области подошв склонов и на равнинах необходимо при прокладке линий принимать во внимание наличие и мощность мягких глин, илов и торфяных залежей. Выяснение этих факторов обычно может быть осуществлено только при помощи бурения. После выяснения технического значения фактических материалов геологической съемки можно перейти к оценке стоимости предлагаемых на обсуждение вариантов трасы, как это изложено в отделе „геология туннелей“.

При трудных условиях местности определение могущих встретиться при постройке случайностей, даже при тщательном изуче-

нии района, сопряжено с некоторой неуверенностью. При составлении проектов эту неуверенность необходимо учесть так, чтобы стоимость была высчитана при наиболее неблагоприятных условиях, т. е. наиболее высокая, которая и должна быть принята в расчет при выполнении постройки. От финансового плана предприятия зависит по возможности снизить границу высшего предела стоимости постройки или при помощи дополнительных шурфов или буровых скважин уточнить и снизить пределы неточностей первого варианта. В некоторых случаях решаются даже учесть при денежных подсчетах возможность некоторых недоделок постройки и в таких случаях пробуют подсчитать вперед повышение расходов вследствие такой задержки и позднейшего довыполнения постройки. Такой прием употребляют, например, при постройке дорог в крупных оползневых районах Огайо и Вест-Виргинии. Ближе ознакомиться с такими приемами можно путем изучения монографий, дающих описание постройки наиболее трудных железнодорожных линий. Ряд поучительных примеров опубликован М. Singer<sup>1</sup>.

Пересечение водораздельных участков отличается от обыкновенных выемочных работ только тем, что, учитывая условия уклона железнодорожных линий, приходится при прохождении водоразделов делать особенно глубокие выемки, в обе стороны от которых местность поднимается; вследствие таких топографических условий получаются иногда более значительные притоки вод, нежели при выемках на склонах при одинаковых прочих условиях. Крупные неудачи, которые происходили при пересечении водоразделов, особенно на Панамском канале, объясняются главным образом тем, что при назначении углов откоса в выемках основывались на данных, полученных при мелких выемках, вместо того чтобы, согласно законам статики, учитывать влияние глубины выемки на степень устойчивости ее откосов.

---

<sup>1</sup> М. Singer. Die Bodenuntersuchungen für Bauzwecke. См. также: H. Wegele. Erdbeben Handbuch der Ingenieurwissenschaften, I Teil, Bd. 2. Leipzig, 1905.

# ГЛАВА ТРЕТЬЯ. ПРЕДЕЛЬНЫЕ НАГРУЗКИ И ЯВЛЕНИЯ ОСЕДАНИЯ ГРУНТА

К. ТЕРЦАГИ

При изучении оснований под фундаменты сооружений необходимо уметь оценить наибольшее давление, какое фундамент может оказывать на грунт, не вызывая вредного для сооружения оседания (предельная допустимая нагрузка). Совершенно равномерное оседание безопасно. Однако, нельзя достигнуть совершенно равномерного оседания грунта, особенно при переменных нагрузках, которые иногда составляют значительную часть полной нагрузки (скопление в зданиях людей, товаров и т. д.). Поэтому наши усилия направлены к тому, чтобы удерживать осадку сооружений в известных пределах, причем предполагают, что разница в осадке отдельных частей сооружения составляет более или менее определенную долю общего его оседания.

## 1. МЕХАНИКА ОСЕДАНИЯ.

Чтобы оценить предполагаемую осадку запроектированного фундамента, нужно прежде всего уяснить себе, от каких факторов зависит величина осадки. Для более отчетливого уяснения себе этих факторов лучше всего начать с простейших случаев, имея в виду вполне однородный грунт и материал или совершенно лишенный сцепления, или же однородно связанный (чистый песок и пластичная глина).

а) Песок. В чистом песке, согласно учению механики грунтов (Erdbaumechanik), предельная нагрузка<sup>1</sup> возрастает в прямом отношении к диаметру нагружаемой поверхности, т. е. чем больше нагруженная поверхность, тем больше нагрузка, которую нужно приложить к единице поверхности, чтобы преодолеть сопротивляемость песка<sup>2</sup>, или, иначе говоря, достигнуть такого состояния, при котором небольшое увеличение нагрузки вызывает значительную добавочную осадку (рис. 39). При умеренных нагрузках<sup>3</sup>, т. е. при таких нагрузках, для которых осадки возрастают почти в прямом отношении к давлению, величина осадки при одинаковых нагрузках на единицу поверхности более или менее не зависит от величины нагруженной поверхности. Влияние размера всей нагруженной поверхности при данной нагрузке  $q$  на единицу поверхности, на осадку и на предельную нагрузку  $q_1$  и соответственно  $q_2$  можно

<sup>1</sup> Прим. ред. Под предельной нагрузкой автор подразумевает нагрузку, соответствующую временному сопротивлению грунта (критическая нагрузка).

<sup>2</sup> На рис. 39 предельной нагрузке соответствует  $t_a$ , при которой кривая осадки становится почти вертикальной.

<sup>3</sup> Прим. ред. Под умеренной нагрузкой подразумевается допустимая нагрузка на грунт.

вывести из схематического рис. 39. Если предположить, что  $C_1$  изображает кривую осадки сыпучего песка для нагруженной поверхности радиусом  $r$ , то кривая осадки для нагруженной поверхности радиусом  $3r$  при таком же грунте изобразится кривой  $C_2$ . Если предельная нагрузка для первой поверхности равна  $q_1$ , то для второй поверхности она равнялась бы примерно  $3q_1$ . Осадки же  $S_1$  и  $S_2$  при одинаковой и умеренной нагрузке  $q$  лишь немного отличались бы друг от друга<sup>1</sup>.

Согласно рис. 4 осадка состоит: а) из оседания вследствие сжатия грунта и в) из оседания вследствие выпирания грунта в стороны (Ausweichen). Самое сильное боковое движение нагруженного грунта получается при замкнутом ленточном фундаменте на глубине, примерно равной половине ширины фундамента. Осадка неглубокого плоского фундамента в песке, способном выдерживать нагрузки (песок средней плотности), при нагрузке в  $1 \text{ кг}$  на  $1 \text{ см}^2$  лежит примерно между пределами  $0,05$  и  $0,5 \text{ см}$ , при условии, что нагрузка неподвижна. При сотрясении фундамента тяжелыми движущимися машинами осадка будет больше. Отношение между осадками при движущейся нагрузке и при нагрузке, находящейся в покое, по мере увеличения плотности песка приближается к значению равному 1.

Приведенные дальше данные относятся к сухому песку. В зоне влияния грунтовых вод по правилам теории давления предельная нагрузка должна была бы быть примерно на  $33\%$  меньше, чем нагрузка для сухого песка. Эти две нагрузки должны относиться друг к другу как вес единицы объема сухого песка к весу того же материала, уменьшенному благодаря гидростатическому давлению (примерно  $1,5:1,0$ ). В действительности же действие грунтовой воды на величину предельной нагрузки значительно больше. Произведенные до сих пор опыты повидимому указывают, что отклонение действительной величины предельной нагрузки от теоретической, выраженное в процентах, увеличивается как с уменьшением диаметра зерен песка, так и при том же диаметре с увеличением скорости, с которой повышается нагрузка<sup>2</sup>.

При увеличении глубины фундамента предельная нагрузка быстро возрастает. Относительный прирост предельной нагрузки зависит, однако, не от абсолютной величины глубины закладки фундамента, а от величины отношения глубины закладки к средней ширине фундамента<sup>3</sup>. Допустимая нагрузка песка, приня-

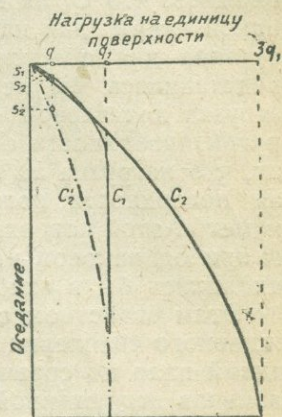


Рис. 39. Влияние сцепления на зависимость между осадкой и величиной нагружаемых поверхностей. Кривые  $C_1$  и  $C_2'$  для грунта со значительным сцеплением. Кривые  $C_1$  и  $C_2$  — для грунта без сцепления.

<sup>1</sup> Terzaghi. Closure of the discussion of the paper „Science of foundations“. Proc. Am. Soc. of Civ. Eng., Febr., 1929.

<sup>2</sup> Неопубликованные до сих пор результаты опытов лаборатории Техн. инст. в Кембридже, Масс. (Mass. Inst. of Techn., Cambridge, Mass.).

<sup>3</sup> Terzaghi. Erdbaumechanik.

тая различными строительными организациями, колеблется в зависимости от плотности залегания и от местных условий в пределах от 1 до 5 кг на см<sup>2</sup>. Для плотных щелнистых грунтов иногда допустимая нагрузка составляет до 7,5 кг на 1 см<sup>2</sup>

в) **Однородная глина.** При совершенно однородном связном грунте предельная нагрузка не зависит от величины нагруженной поверхности, а осадки, вызванные данной нагрузкой на единицу поверхности, возрастают в прямом отношении к диаметру нагруженной поверхности, поскольку в данном случае можно пренебречь сопротивлением внутреннего трения, незначительного по сравнению с силами сцепления.

Это положение вещей можно вывести и из рис. 39. Если предположить, что  $C_1$  на этот раз изображает кривую оседания однородной глины для нагруженной поверхности радиуса  $r$ , то кривая оседания для поверхности с радиусом  $3r$  при таком же грунте представилась бы не кривой  $C_2$ , а кривой  $C'_2$ . Если предельная нагрузка для первой из этих поверхностей равняется  $q_1$ , то и для другой поверхности она примерно равна  $q_1$ , иначе говоря, это значит, что нагрузка на единицу поверхности, при которой нагруженная поверхность погрузилась бы в грунт, почти не зависит от диаметра этой поверхности. Осадки же  $S_1$  и  $S'_2$ , которые получились бы при одинаковой и умеренной нагрузке  $q$  на единицу поверхности, находились бы в отношении 1:3 друг к другу.

Этим свойством однородная глина существенно отличается от лишенного сцепления песка. Чем больше сцепление отстает на задний план по сравнению с трением, тем меньше делается влияние размеров нагруженной поверхности на оседание, т. е. тем больше наша кривая  $C_1$  (рис. 39) приближается к соответствующей кривой оседания  $C_2$  для нагруженной поверхности радиуса  $3r$ , изображенной на чертеже сплошной линией. Однако уже здесь следует ясно подчеркнуть, что осадки, определяемые кривыми  $C_1$  и  $C'_2$ , относятся к моменту времени, когда осадки уже перестали возрастать. Для больших нагруженных поверхностей пластичной глины могут пройти столетия, прежде чем установится такое состояние.

Величину части ( $a$ ) осадки фундаментов можно предсказать с некоторой вероятностью на основании кривых давления, изображенных на рис. 5 и 10 и определяемых из опыта 1 (табл. II, стр. 39). Для чистых песков результаты вычислений более или менее совпадают с наблюдаемыми на практике осадками.

Если же произвести такие же вычисления для глины средней жесткости, то для части осадки ( $a$ ) фундаментов благодаря большой сжимаемости глин получаются цифры, превосходящие во много раз наблюдаемую на практике общую суммарную осадку  $a + b$ . Ключ к разрешению этого кажущегося противоречия лежит в малой проницаемости глин. Данные, необходимые для того, чтобы оценить влияние проницаемости на часть осадки  $a$ , получаются также из опыта 1. (опыт уплотнения, стр. 38).

Предположим, что площадка фундамента размерами 30 на 30 м, покоящаяся на мягкой глине, залегающей на значительной глубине, оказывает на грунт давление в 1 кг на см<sup>2</sup>. Пусть пористость глины мало меняется с глубиной и равна в среднем 1,52. Из диаграммы рис. 10. А получаем, что величина пористости 1,52 отвечает нагрузке

в 2 кг на 1 см<sup>2</sup>. Эта теоретическая сила давления, взятая из диаграммы, является эквивалентом капиллярных сил и сил сцепления, действующих в глине, находящейся в естественном залегании, причем какими причинами, внешними или внутренними, обуславливаются эти силы, не имеет значения. Если теперь к этой уже действующей в грунте „начальной силе“ прибавить новое давление в 1 кг на 1 см<sup>2</sup>, то согласно рис. 10А пористость упадет с 1,52 до 1,39. Давление, оказываемое нагрузкой на грунт, согласно законам механики закономерно убывает по направлению от поверхности вниз, однако теоретически оно будет заметно на бесконечной глубине. Из теории распределения давлений в грунте, находящемся под действием нагрузки, вытекает, что общее сжатие грунта, вызванное нагрузкой, будет примерно такое же по величине, как если бы давление, действующее на поверхность, передавалось вниз без уменьшения интенсивности, но только до глубины, равной примерно диаметру площади нагруженной поверхности, увеличенному в 1,2 раза. Назовем эту глубину „мощностью эквивалентного слоя грунта“. В нашем случае эта толщина равняется  $30 \times 1,2 = 36$  м. Давление, производимое нагрузкой на поверхность, равняется 1 кг на 1 см<sup>2</sup>, и соответствующее этой нагрузке уменьшение пористости грунта будет  $1,52 - 1,39 = 0,13$ . Так как численное значение пористости до момента приложения нагрузки по нашему предположению равнялось 1,52, то для величины сжатия грунта, причиненного фундаментом, получится значение

$$S = \frac{3600 \text{ см}}{1 + 1,52} \times 0,13 = 186 \text{ см}^1.$$

При этом предполагается, что уменьшение объема, соответствующее увеличению давления, наступает медленно. Однако заключенный в порах глины излишек воды может вытекать лишь чрезвычайно медленно, вследствие небольшой величины коэффициента проницаемости, равного по рис. 10А для пористости 1,50 —  $K = 0,000000207$  см в минуту. Поэтому и оседание, полученное выше вычислением, установится очень медленно. Чтобы выяснить

<sup>1</sup> Прим. ред. Для практических целей проф. Н. М. Герсеванов в своей работе „Основы динамики грунтовой массы“ (1931 г.) рекомендует пользоваться следующими — более общими формулами для определения величины осадки грунтов:

1) для полной осадки  $S_{\infty} = \frac{ah(p_1 - p_0)}{1 + A}$ ,

2) для осадки в зависимости от времени  $S_T = \frac{ah(p_1 - p_0)}{1 + \epsilon_0} \left[ 1 - \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{1}{eZT} \right]$ .

В этих формулах приняты следующие обозначения:

$a$  — коэффициент уплотнения в см<sup>2</sup>/кг,

$h$  — мощность грунта в см,

$p_1$  — нагрузка кг/см<sup>2</sup> от фундамента,

$p_0$  — „ „ на поверхности грунта,

$A$  — постоянный коэффициент, равный  $\epsilon_0 + ap_0$ ,

$\epsilon_0$  — коэффициент пористости,

$e$  — основание неперовых логарифмов, равное 2,78,

$T$  — время, протекающее от постройки фундамента в годах,

$Z = \frac{K(1+A)}{a\Delta} \cdot 0,75 \cdot 10^8$ , где в свою очередь

$\Delta$  — вес 1 куб. см воды в кг,

$k$  — коэффициент фильтрации грунта в см/сек.

ход явления сжатия грунта в зависимости от времени и коэффициента уплотнения материала следует поступать подобно тому, как указано на стр. 38 (опыт 1), определяя коэффициент проницаемости в зависимости от времени сжатия при постоянном давлении<sup>1</sup>. Теория приводит к выводу, что время  $t_1$  и  $t_2$ , выраженное в годах, которое потребуется, чтобы установилось 0,05 или соответственно 0,1 общего оседания  $S=186$  см, определяется соотношениями:

$$t_1 = 0,40 \times 10^{-8} \times \frac{h^2}{c(1+e)^2}$$

и соответственно

$$t_2 = 1,55 \times 10^{-8} \times \frac{h^2}{c(1+e)^2}$$

где  $h$  обозначает толщину эквивалентного слоя грунта в сантиметрах (в нашем случае 3600 см),  $c$  — коэффициент уплотнения в сантиметрах в минуту и  $e$  — средний коэффициент пористости, равный  $\frac{1,52+1,39}{2} = 1,455$ . Коэффициент уплотнения равен (рис. 10 E)

$$c = 0,00053.$$

Если ввести эти величины в наши уравнения, то получится:

$$t_1 = 0,40 \times 10^{-8} \frac{3600^2}{0,00053 \times 2,455^2} = 0,40 \times 40,6 = 16,2 \text{ года,}$$

$$t_2 = 1,55 \times 10^{-8} \frac{3600^2}{0,00053 \times 2,455^2} = 1,55 \times 40,6 = 63,0 \text{ года.}$$

Из этих данных вытекает, что должно было бы пройти 16,2 года, пока оседание станет равным 0,05.  $S=0,05 \times 186 = 9,3$  см и 63 года, прежде чем осадка достигнет величины 0,10  $S=18,6$  см.

Небольшое количество воды, соответствующее осадке, выжимается наверх через бетонированную площадку фундамента и испаряется, оставаясь совершенно незаметным.

Правый нижний угол диаграммы (рис. 17) соответствует тонкопылеватым грунтам, смешанным с большим процентом органических составных частей. Эти грунты так же легко сжимаются, как и глина, но зато гораздо легче пропускают воду. Благодаря соединению этих двух свойств на таких грунтах тоже нельзя возводить тяжелых сооружений. Рис. 40 изображает сжатие в 2,5 м тощего, главным образом мелкозернистого грунта, мощностью в 11 м, вызванное весом сооруженной из него дамбы высотой в 5 м.

Маленькими кружками обозначены места, где были взяты пробы грунта. Уплотнение нагруженной части почвенного слоя выражается консистенцией материала, определенной по методу 24 (стр. 52) и изображенной штриховкой. Из вида кривых одинаковой консистенции можно вывести, что большая часть воды ушла наверх, а меньшая часть вниз. Нормальное содержание воды грунтов рав-

<sup>1</sup> Terzaghi. Erdbaumechanik.

нялось от 40 до 50% (табл. II, опыт 12), естественное содержание воды (в процентах общего веса) от 30 до 39%. Верхние 2,5 м почвенного слоя уже до насыпки дамбы образовали более твердую корку, получившуюся благодаря поверхностному испарению; содержание воды в ней было значительно меньше указанного выше.

Жирная глина сжимается значительно больше, чем изображенный на рис. 40 почвенный слой, однако она в то же время и

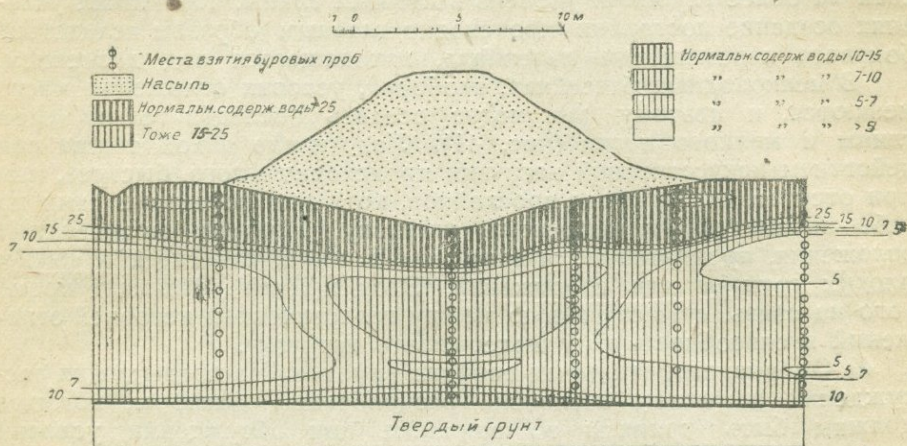


Рис. 40. Уплотнение тонкозернистого грунта под основанием земляной дамбы (по заключительному отчету шведской Геотехнической комиссии. Стокгольм, 1922).

гораздо менее проницаема. Действие обоих этих свойств до некоторой степени уничтожает друг друга, так что при достаточно жесткой консистенции глину можно считать хорошим грунтом для построек.

Нагрузка, допускаемая законами для самых жестких глин, равняется 8 кг на 1 см<sup>2</sup> и падает для мягких глин до 1 кг на 1 см<sup>2</sup> и меньше.

### с) Глина с прослойками песка.

В изложенных выше рассуждениях предполагалось, что глина залегает на большую глубину и имеет однородный состав. Предположим теперь, что толща глин прорезана тремя тонкими горизонтальными прослойками плотно слежавшегося песка (рис. 41), выходящими где-то на поверхность или простирающимися до более мощного пласта песка. В этом случае вместо одной единственной поверхности, через которую может уходить лишняя вода, мы будем иметь семь таких поверхностей. Благодаря этому осадка, вызванная уменьшением объема, будет в семь раз больше, чем при тех же условиях для однородной глины, хотя слои песка сами по себе почти не сжимаемы. Эти соображения приводят нас к чрезвычайно важному в геологии

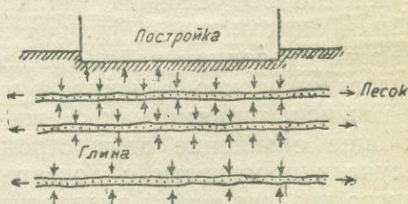


Рис. 41. Уплотнение глинистой толщи, пересеченной прослойками песка.

оснований фундаментов выводу: наличие чередования более или менее проницаемых пластов много важнее для условий закладки фундамента, чем свойства каждого слоя в отдельности. При почти однородных глинах, отложившихся в глубоких и широких водоемах, мы имеем дело с одной поверхностью, через которую может быть удален излишек воды, и даже эту поверхность можно избежать, если перенести место приложения нагрузки при помощи свай на более глубокий уровень залегания глины. При таких условиях оседание постройки происходит главным образом вследствие бокового перемещения материала, находящегося под давлением.

В мелководных бассейнах, наоборот, условия отложения часто меняются, и поэтому там могут оседать последовательно слои глины и мелкого песка (рис. 41). Уплотнение такой толщи под действием искусственной нагрузки происходит много быстрее, чем при отсутствии песчаных прослоек, хотя эти последние сами по себе вполне могут выдержать нагрузку. Поэтому мелководные отложения, пронизанные линзами ила и песка, относятся к самым плохим грунтам для сооружений. Этот пример указывает кроме того на связь, существующую между геологической историей отложений и способностью их выдерживать нагрузку.

**д) Оценка строительных свойств грунтов.** Из предыдущих рассуждений вытекает, насколько разнообразны факторы, которые должны быть приняты во внимание при обсуждении условий закладки фундаментов. Опытные данные относительно допустимой нагрузки грунта были бы совершенно недостаточны даже тогда, если бы обозначения различных грунтов были петрографически и физически совершенно однозначны. Попытка решить задачу при помощи „нормированных“ опытных нагрузок, произведенных в малом масштабе на дне строительной выемки, едва скользит по поверхности вопроса, потому что корень зла может лежать на глубине 20 или 30 м ниже основания фундамента. Правильное суждение об условиях закладки можно составить лишь на основании знакомства с физическими свойствами грунта, с геологическим строением района и с механикой явлений оседания. Условия залегания нужно выяснять бурением, а свойства грунта лабораторными испытаниями над свежими мало деформированными пробами. Общее сравнение двух строительных участков можно во многих случаях произвести с достаточной точностью на основании лишь чисто геологической экспертизы местности.

## 2. ГЛАВНЫЕ ТИПЫ СТРОИТЕЛЬНЫХ ГРУНТОВ.

Законы, управляющие сопротивляемостью нагрузкам несвязанных и сильно связанных сортов грунта, настолько существенно различны, что прежде всего нужно разграничить эти два главных типа. Среди связанных сцеплением грунтов следует различать глубоководные глины от мелководных глинистых отложений, пронизанных песчаными прослойками и линзами, потому что осадка первых обусловлена главным образом выжиманием грунта в стороны, тогда как при осадке последних важную роль играет и уменьшение объема.

**а) Строительный грунт преимущественно без сцепления.** Отложения, лишенные сцепления, с которыми приходится иметь дело

на практике, можно разделить на четыре группы: речные отложения, дельтовые образования, морские береговые образования и, наконец, песчаные и щебневые отложения в области отступления ледника (пересортированный моренный материал).

При технико-геологической оценке отдельных членов этой группы нужно обращать внимание на следующие факторы: относительная плотность, степень однородности, форма зерен, действующая величина зерна и условия напластования. Значение относительной плотности было выяснено рис. 6 и 7. Степень однородности, форма зерен и действующая величина зерна при одинаковой относительной плотности определяют степень подвижности грунта.

Действующая величина зерна и условия напластования имеют значение для степени проницаемости комплекса пластов.

*Речные отложения.* Плотность и условия залегания отложенных текущими водами наносов зависят в большой степени от гидрографического характера реки, отложившей этот материал; они отражают в своем составе всякое изменение гидрографических условий, при которых происходило осаждение. Чем скорее меняется уровень воды в реке, тем быстрее отлагаются осадки и тем меньше будет их относительная плотность.

Массы песка, отложенные быстрыми, богатыми донными наносами, потоками Техаса и Новой Мексики настолько рыхлы, что в них можно забить сваи до глубины 17 м без промывки водой, тогда как в плотно залегающих песках того же качества сопротивление вбиванию уже на глубине нескольких метров становится больше, чем предел прочности дерева. Плотное залегание древне-аллювиальных долинных песков берлинского грунта заставляет предполагать, что они были отложены в очень медленно текущей воде.

Вообще говоря, величина зерен в наносах уменьшается по направлению от истоков к устью реки. Больше всего можно встретить перекаточного материала в верхнем течении. Опыт учит, что заполнения этих участков долин, состоящие из нагромождения глыб, щебня и ила, очень мало водонепроницаемы. В горах, сложенных известняками, отложение наносов происходит путем образования ила из мелкого материала, остающегося после растворения извести; к этому могут еще прибавиться приносимые глетчерными ручьями пылеватые грунты и продукты сортировки ледниковых отложений. Подобным же образом идет и уплотнение образующихся в устье боковых долин конусов выноса (Schwemm-Kegel). Только молодой грубообломочный материал, залегающий в высокогорных долинах в основании склонов, обладает большой способностью поглощать воду.

По М. Singer<sup>1</sup>, заполнения долин во внутренних Восточных Альпах почти водонепроницаемы. То же самое справедливо и для наносов верхнего и среднего течения многих рек в западной части Соединенных Штатов. Воду, притекавшую в строительный котлован площадью в 1000 м<sup>2</sup> и глубиной в 15 м, выкопанный в грубообло-

<sup>1</sup> М. Singer. Über Flussregime und Talsperrenbau. Zeitschr. d. Österr. Ing. u. Arch. Ver., S. 803, 1909.

мочном материале, содержащем песок и ил (отложения долины р. Rio Grande, Новая Мексика), без труда можно было откачивать при помощи одновременной работы трех центробежных насосов размером в 10", 6" и 4". Таким же простым оказался режим грунтовой воды в строительном котловане плотины Arrowgock в Idaho. Относительная плотность этих грубообломочных наносов повидимому очень невелика, потому что составные части их отлагаются самым неправильным образом при катастрофических паводках.

В средних течениях рек преобладает галечник. Галька состоит из более или менее плоского округленного перекатного материала, смешанного с гравием и песком.

Данные механического анализа указывают на большую неоднородность материала. Коэффициент неоднородности по величине порядка 100. Более плоский перекатный материал ложится как черепицы, так что получающиеся таким образом отложения обладают значительной плотностью и сваи вколачиваются в них с большим трудом. Однако это правило имеет исключения. Проницаемость наносов в области отложений галечника бывает максимальной (величина проницаемости порядка от 0,05 до 5,0 см в секунду).

Дальше, вниз по течению реки, находится область отложения песков. Речной песок также отличается неодинаковой величиной зерен и годится потому для изготовления бетона (порядок величины коэффициента неоднородности равен 20). Коэффициент проницаемости меняется скачками благодаря меняющемуся содержанию ила. Зерна речных песков, в противоположность речным галькам и дюнным пескам, бывают большою частью угловатыми. При оценке предполагаемой относительной плотности и условий залегания несцементированного или слабо сцементированного речного наноса следует помнить, что характер течения и условия осаждения меняются от места к месту даже в том же сечении и при данном разрезе. Лишь некоторая часть отложена в русле реки в узком смысле, потому что отложения русла в некотором роде осаждались только по пути и во время высокой воды снова переносились рекой. Остальная часть наноса отложена высокой водой на дне долины по обе стороны от русла. Вследствие этого эта часть наносов плотнее, зерно ее мельче. Благодаря такой истории возникновения наносы, заполняющие долины рек, состоят из неправильно ограниченных массивов с различной относительной плотностью и различной величиной зерен.

Рис. 42 изображает разрез отложений долины р. Вейксель около Грауденца. Грунт состоит в более высоких слоях главным образом из мелкого песка, более или менее пронизанного илом (Schlick), внутри песка встречаются гнезда гравия, а в русле вблизи правого берега довольно большие массы валунов (Feldstein)<sup>1</sup>. Примерно на глубине 9 м проходит слой гравия небольшой мощности, переходящий постепенно снова в мелкий материал, который подстилается пластинами голубого глинистого мергеля. Этот мергель был достигнут буровой примерно на глубине 12,5 м. Из наблюдений,

<sup>1</sup> Die Eisenbahnbrücke über die Weichsel bei Graudenz. Zeitschr. f. Bauwesen. Jg. XXXII S. 243, 1882.

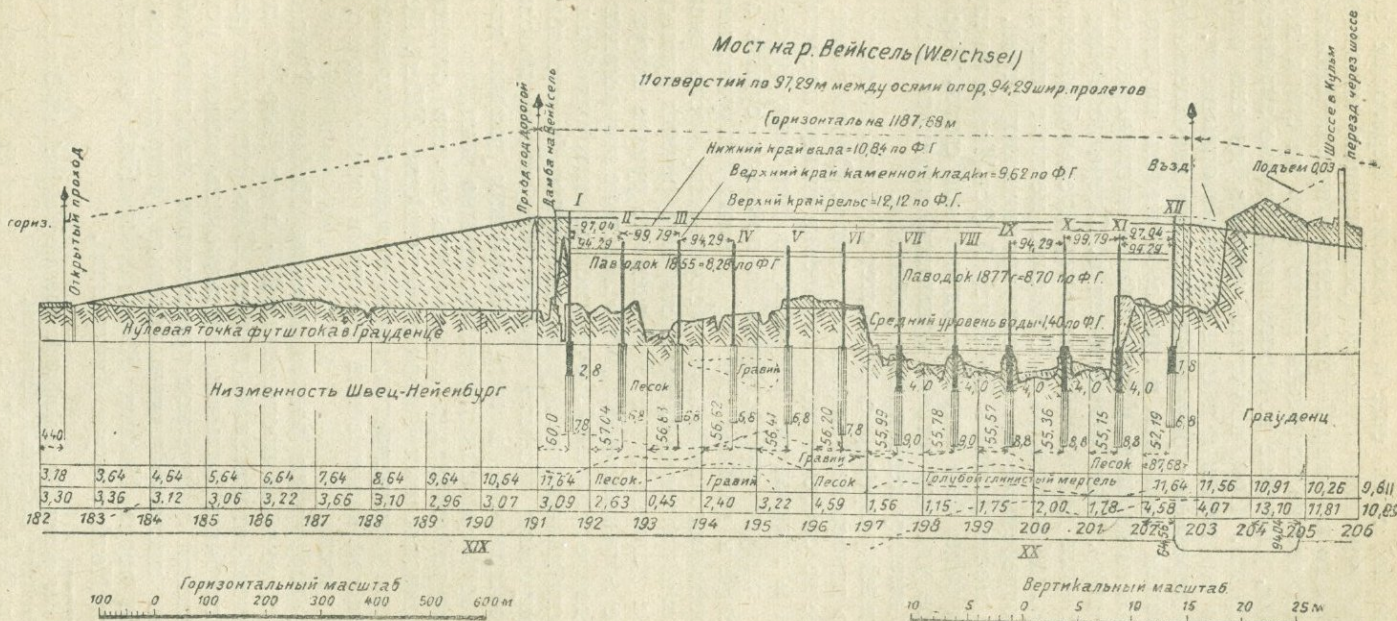


Рис. 42. Поперечный разрез через аллювиальные песчаные отложения.

произведенных при вбивании свай, получается, повидимому, что в области русла реки песок залегает уже на глубине 4 м сравнительно плотно, хотя еще и не вполне. Береговые устои были заложены при помощи опускных (Senkbrunnen) колодцев, которые были опущены до глубины 7—8 м в легком, пропитанном водой песке. При рытье одного из колодцев наткнулись на ствол дерева 60 см в поперечнике, удаление которого потребовало значительного времени и издержек. При попытках удалить дерево оказалось, что песок „легко подвижен и постоянно снова оплывает“.

Стволы деревьев причиняют нередко значительные затруднения при копании колодцев и при сооружении шпунтовых стенок (стволы дубов на площади устоев нового моста через реку Вейксель около Dirschau) <sup>1</sup>. При канализации р. Одера во время устройства шпунтовой стенки для одной только строительной выемки натолкнулись на двенадцать стволов <sup>2</sup>. Особенно мешают твердые породы деревьев, погребенные в наносах тропических стран. При рытье колодца для моста Джиппа в Британской Ост-Индии на глубине 10 м ниже уровня воды был встречен один такой ствол. После длительных попыток удалить ствол пришлось изменить метод работ и продолжать выемку кессонными работами.

Поперечный разрез (рис. 42) может служить примером довольно однородного наноса, заполняющего долину. Образование некоторых наносов еще не совсем ясно. Углубление наших представлений облегчило был и толкование результатов пробных бурений. Во всяком случае следует предостеречь от попыток судить о характере всех отложений в долинах рек по данным полудюжины пробных бурений. Особенного внимания заслуживают часто очень мягкие, богатые илом заполнения слепых (старицы) речных рукавов. За время поднятия дна долины такие заполненные рукава могут быть перекрыты более прочными пластами; вследствие этого может произойти местное оседание строений, фундаменты которых были заложены в толще таких наносов на грунте, как будто бы способном выдерживать нагрузку. Как правило, присутствие таких прослоев сказывается на поверхности в виде неглубоких впадин, имеющих вид мурды с очертаниями погребенного рукава реки.

Особенно разнообразен может быть состав отложений, накопленных в затопленных долинах (ertrunkene Täler). Действующая величина зерна увеличивается, грубо говоря, сверху вниз и меняется в горизонтальном направлении скачками точно так же, как и степень однородности.

Рис. 43 изображает разрез долины Hudson River около New Hamburg. Эта река на протяжении 210 м от Нью-Йорка до Albany имеет характер затопленной долины. Так как русло реки до значительной глубины большею частью очень мягкое, устои мостов в таких долинах сооружают при помощи открытых работ или же при помощи пневматических кессонов (открытые кессоны: мост Roughkeepsie через Hudson River, мост Firth of Forth в Шотландии, мост Hawkesbury в Австралии).

<sup>1</sup> Der Bau der neuen Eisenbahnbrücke über die Weichsel bei Dirschau und über die Nogat bei Marienburg. Zeitschr. f. Bauwesen, 1895.

<sup>2</sup> E. Mohr. Die Kanalisierung der Oder von Kosel bis zur Neissemündung Zeitschr. f. Bauwesen, S. 361. 1896.

**Дельтовые образования.** Относительная плотность отложений дельты должна была бы в большой мере зависеть от скорости, с которой отлагается материал.

Галечниковые косы, нанесенные горными ручьями в альпийских озерах, залегают повидимому более рыхло, чем галечниковые наносы в русле рек. Это вытекает из того, что часто в таких дельтах случаются обвалы берегов озера, и эти обвалы объясняются тем, что расположение материала, слагающего берега дельты, при крутых откосах менее закономерно, чем в русле реки. Однако песчаные дельтовые образования часто отличаются очень плотным залеганием.

Такой случай встретился, например, при исследованиях Terzaghi послеледниковых различной крупности зерна отложений

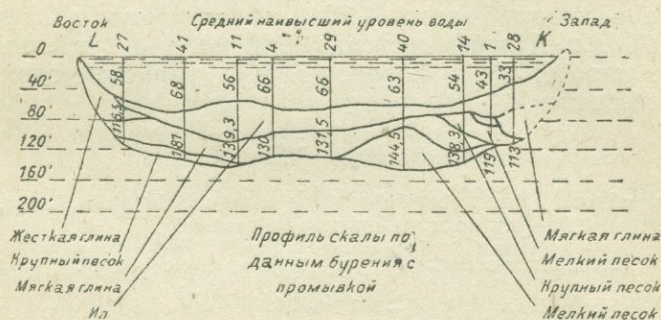


Рис. 43. Поперечный разрез русла реки Гудзон у Нью-Гамбурга (по проф. Ch. P. Verkey).

дельты Chicopee Mass., к югу от водохранилища Kensington в New York и в White Mountains, New Hamburg. Veitmaier встретил в Müggelsee песок с удивительно незначительным объемом пор, равным 26,6%<sup>1</sup>. В русле р. Миссисипи и около Нового Орлеана находятся два слоя песка (мелкий белый песок), которые на глубине 50 м разделены слоем твердой синей глины (Gumbo) мощностью в несколько метров. Верхний слой песка представляет собой речные отложения настолько рыхлые, что они совсем не годятся в качестве грунта для устоев моста. Нижний слой песка был отложен в стоячей воде и залегает плотно.

Так как материал, отложенный в стоячей воде, претерпевает значительную сортировку, то массы, слагающие песчаные дельты, отличаются большой однородностью (коэффициент неоднородности от 1,5 до 5). Промежутки между грубым перекатным материалом дельтовых галечников заполнены более мелкими составными частями, как это бывает и в речных галечниках. Механический анализ проб галечника из различных частей галечниковой дельты внес бы ценный вклад в наши познания об устойчивости этих отложений.

**Морские береговые образования.** Несцементированные морские береговые отложения, как правило, залегают плотно. Это справедливо

<sup>1</sup> Veitmaier. Vorarbeiten zur Wasserversorgung der Stadt Berlin, 1871.

как относительно песчаных отмелей, так и относительно береговых валов и прилегающего к ним берега. Опыт учит, что в такие отложения можно вбивать длинные сваи с промывкой водой. Тем не менее случается, что, особенно с береговой стороны песчаных отмелей, встречаются иногда рыхлые места. Неустойчивые массы песка, образующие берега Зеландии, нельзя назвать береговыми образованиями. Они представляют собой массы песка, отложенные быстро текущими водами. Из этого песка лишь позднее образовалась береговая полоса.

Коэффициент неоднородности песчаных береговых образований такой же низкий, как и для дельтовых песков. Зерна преимущественно гладкие и круглые. Табл. VIII представляет собою результаты пробных бурений через типичный береговой вал. Проба, взятая близко от поверхности, дала, согласно Terzaghi, коэффициент неоднородности равный 1,72 и действующую величину зерна равную 0,076 мм. Проба состояла из смеси округленных зерен кварца и из перетертых раковин, причем кварцевые зерна значительно преобладали.

Таблица VIII.

Результаты пробного бурения на береговом валу в Galveston, Texas, недалеко от восточного конца гавани.

(Правительственное бурение, начальник Shley).

Сверху вниз:

5,1 м	мелкий песок
0,6 "	твердый синий морской ил,
4,5 "	мелкий чистый песок,
0,6 "	мелкозернистый мергель,
9,0 "	мелкий песок и мягкий синий морской ил.
3,0 "	мягкая желтая глина.
<u>22,8 м</u>	

1 км к востоку:

5,1 м	мелкий чистый песок,
0,9 "	твердый синий морской ил,
7,5 "	мелкий чистый песок,
0,6 "	крупный чистый песок с перетертыми раковинами,
4,5 "	мелкий песок и мягкий синий морской ил.
<u>18,6 м</u>	

*Ледниковые отложения.* Во всех отношениях меньше всего поддаются расчетам образования, отложенные во время отступления ледника и представляющие собою по большей части продукты сортировки донной морены. При образовании этих отложений материал откладывался в течении всего периода образования долин, причем условия отложения менялись с большой быстротой, вследствие чего в массах отложенного песка можно встретить все степени относительной плотности и неоднородности. Кроме того во многих случаях с песками переслаивался самым сложным образом материал главных морен и флювио-гляциальных отложений, что часто лишает возможности провести резкую границу между этими отложениями.

в) Плывуны. Слово „плывуны“, согласно обычному разговорному языку технической практики, применяется ко всем пескам,

которые приходят в движение при попытках работать землечерпательными машинами (Bagger) или при осушке котлована при помощи откачки насосами. При этом часто не обращают внимания, вызвано ли движение свойствами песка, или условиями залегания, или же характером строительных мероприятий. Плывучесть песков всегда связана с состоянием полного их насыщения и исчезает при удалении воды.

Чтобы резче определить понятие о плывучем песке, следует прежде всего установить различие между песками, склонными к плывучести, и песками более устойчивого характера. Кроме того нужно еще уяснить себе, что один и тот же песок может быть очень устойчивым или очень неустойчивым в зависимости от способа залегания.

Рис. 44 *a—e* изображает результаты механического анализа песков, при выемки которых возникли необычайные технические затруднения (выборка из примерно двадцати исследованных случаев). Общей особенностью этих и других подобных песков является небольшая величина зерна (действующий диаметр зерна от 0,01 до 0,06 мм), коэффициент неоднородности от 2 до 5 (см. табл. II, стр. 46, опыт 9). Содержание слюды повидимому не играет роли, поскольку оно держится в скромных границах. Важнее форма зерна; так, кварцевые пески с круглыми зернами подвижнее песков таких же размеров, имеющих зерна с острыми краями.

Однако гораздо более важным фактором является относительная плотность (табл. II, опыт 23). Песок, по своему характеру и составу зерен легко подвижный, но залегающий плотно, легче поддается выемке, чем менее подвижный, но залегающий рыхло. Многие авторы поддерживают мнение, что рыхлое залегание может возникнуть только под влиянием напора грунтовой воды. Другие говорят о перенасыщении водой („supersaturated sand“) или о „толстых водяных пленках“, окружающих зерна песка. Первое представление не разрешает вопроса, а второе и третье с точки зрения физических свойств песка неприемлемо. Физически разница между опасным для основания сооружений и безопасным мелкозернистым песком не больше, чем выясненная на рис. 6 и 7 разница между рыхлым и плотным сухим песком. Разница между обоими способами залегания сказывается почти при всякой технической работе, особенно же при вбивании свай. Сопротивление плотных масс песка вбиванию свай очень велико, и после окончания забивки поверхность массы песка между сваями немного выше чем прежде. В противоположность этому в рыхлый песок можно забить сваи до глубины 20 м, причем поверхность песка, пробитая сваями, опустится. Если песчаная масса находится в пределах грунтовых вод, то во время работ по вбиванию свай она разрыхляется (сотрясающие движения).

При вбивании свай длиной в 14 м в ледниковый мелкий песок во Framingham, Mass. (рис. 44 *a*) поверхность в районе забивки опустилась примерно на 90 см. Квадратная пробная площадка в 900 см<sup>2</sup> опустилась при нагрузке в 1 кг на 1 см<sup>2</sup> на 0,7 до 2,4 см, из чего можно вывести заключение о чрезвычайно рыхлом залегании песка. Подобная же площадка осела при равной нагрузке и подобном же, но довольно плотно залегающем мелком песке

в Lynn, Mass. на 0,23 (верхние слои) и 0,13 см (более глубокие слои) <sup>1</sup>.

В Providence, Rhode Island, основанный на сваях средний устой моста Point-Street осел с одной стороны на 15 см, при вколачивании дополнительных свай в рыхлый мелкопесчаный грунт (рис. 44 в), так что мост пришлось закрыть для движения. Исследование грунта показало, что объем пор мелкого песка (обозначенного в первоначальном буровом разрезе как глинистый ил) равнялся от 39 до 42%, тогда как в лаборатории путем встряхивания песка можно было довести объем его пор до 31 или 34% <sup>2</sup>. В Чикаго опускали открытые кессоны в районе последнеледникового берегового вала, состоящего из мелкого песка. Большинство колодцев можно было во время работ без труда осушить насосами. Однако в одном колодце песок плыл на дне уже на небольшой глубине, и попытка продолжать рытье потерпела неудачу. Так как свойства песка и гидростатические условия были во всех колодцах одинаковы, то разница могла состоять в относительной плотности песка.

Значение восходящих токов грунтовой воды состоит исключительно в том, что такие токи могут совершенно разрыхлить первоначально плотно залегавший песок. Малая способность выдерживать нагрузку песков, через которые протекают грунтовые воды, обладающие напором, легко объясняется кажущимся уменьшением удельного веса, обусловленным давлением воды <sup>3</sup>. Как только течение прекращается, способность выдерживать нагрузку снова делается больше. Залегание же песка все-таки остается рыхлым. В практике этот факт сказывается в рыхлости песка у подошвы открытых кессонов, опущенных в плотно залегавший материал.

Единственный способ, которым мы в настоящее время располагаем для того, чтобы судить о том, залегают ли данный песок плотно или рыхло (способен выдержать нагрузку или оседает, устойчивый или подвижный), состоит в пробной нагрузке и в вколачивании пробных свай. Оба способа требуют издержек, но их нельзя избежать, пока у нас нет инструментов для выемки ненарушенных проб песка. Песок, носящий при рытье котлована для фундамента характер опасного пльвуна, при постройке туннеля показался бы нам пльвущей лавиной (schwimmendes Gebirge), а в открытом разрезе представлял бы неустойчивый склон.

При борьбе с пльвунами применяют или искусственное понижение грунтовой воды, или же замораживание содержащейся в песке воды, а также цементацию путем нагнетения цементного раствора <sup>4</sup>.

**с) Искусственное понижение грунтовой воды.** Значение этого способа основано на том, что общим понижением уровня грунтовой воды даже самый неустойчивый песок можно сделать на время постройки безвредным, мало сжимаемым материалом. Кроме того при применении этого способа исключается разрыхление дна

<sup>1</sup> Неопубликованная экспертиза K. Terzaghi.

<sup>2</sup> G. W. Maker Foundation Problems in Enlarging Center Pier of Swing-Bridge at Providence. По экспертизе K. Terzaghi. Eng. News-Rec., Dez. 8, 1927.

<sup>3</sup> Terzaghi. Erdbaumechanik.

<sup>4</sup> W. Gross Schachtabteufen durch Schwimmsandschichten mit Hilfe eines neuen Versteinerungsverfahrens, Glückauf 60 Jg., S. 559, 1924.

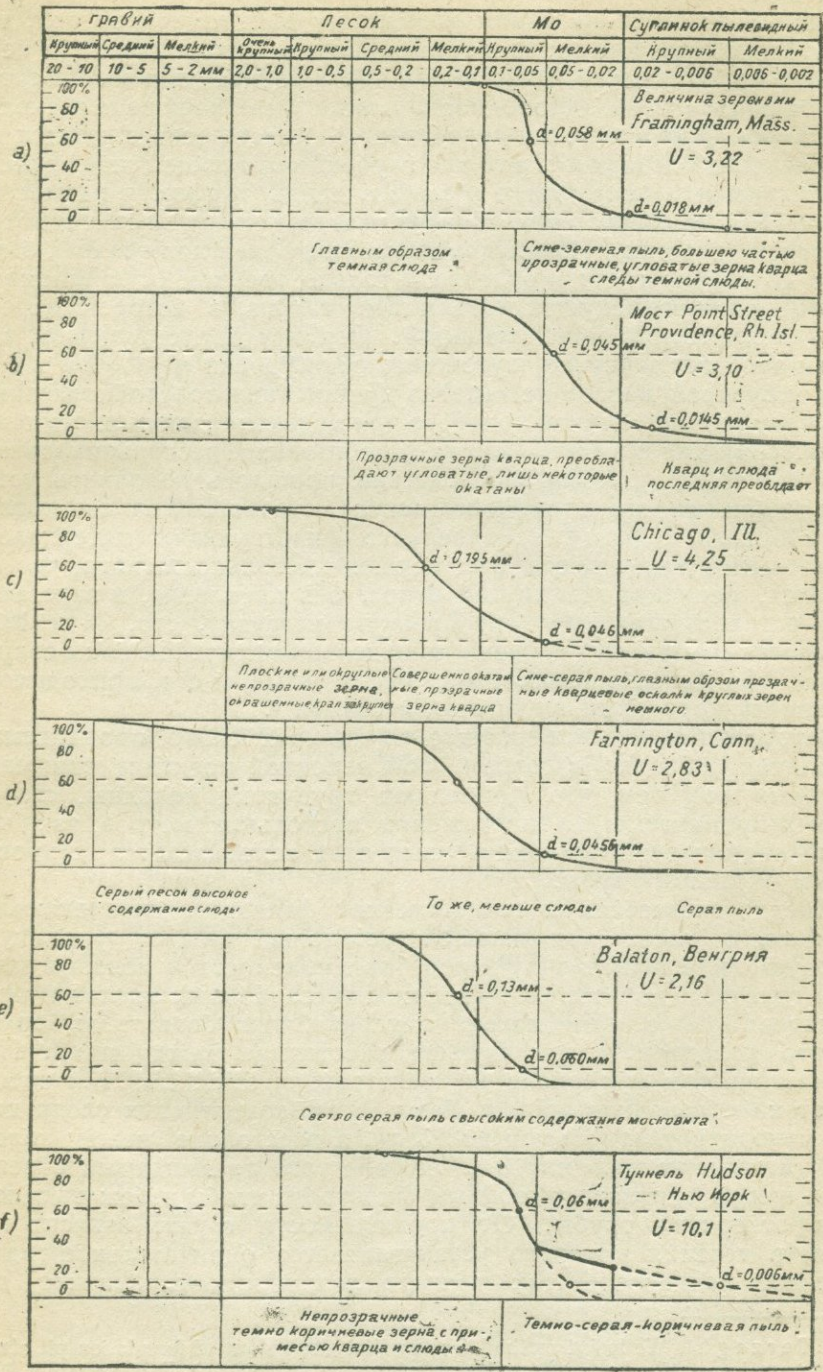


Рис. 44. Механические анализы типичных песков-пльвунов.

котлована, неизбежно связанное с существующим режимом грунтовых вод.

Рис. 45 является примером снижения уровня грунтовых вод, достигнутого примитивными средствами. Грунт состоял из пласта ледникового мелкого песка, залегавшего почти горизонтально. В вертикальном направлении однородность пласта была нарушена несколькими тонкими прослойками серой глины. Пласт песка покоился на горизонтальной поверхности толщи глубоко залегающей синей ледниковой глины и перекрывался в свою очередь торфом и насыпным грунтом. При прежних работах песок оказался подвижным, несмотря на плотное залегание. Проектированный котлован должен был быть вырыт до глубины 9 м и отделялся только гребнем 12 м шириной от конца выемки, ведущей в открытую гавань, в которой работа велась землечерпательной машиной. Поэтому представлялось выгодным произвести осушку путем снижения уровня грунтовой воды. Так как буровой мастер не заметил присутствия прослоек глины при бурении с промывкой водой, то при проектировании оборудования постройки не рассчитывали на существование нескольких этажей грунтовой воды; поэтому впоследствии пришлось дополнить установку трубчатых колодцев (Rohrbrunnen) устройством на дне котлована сборного колодца, заполненного фильтрующим материалом. Тем не менее пласт песка был осушен настолько хорошо, что он держался, несмотря на крутой откос, без крепления, и залегание песка осталось плотным (см. пробную нагрузку, стр. 44 и 126). В немногих местах, где уровень пониженной грунтовой воды соприкасался со стенками котлована, песок плыл, и его приходилось сдерживать короткими шпунтовыми сваями <sup>1</sup>.

Затруднения, проистекающие от наличия слабо проницаемых прослоек, обходят в современной немецкой практике снижения грунтовых вод тем, что применяют трубчатые колодцы, стенки которых проницаемы на протяжении нескольких метров, так что всякий проницаемый промежуточный слой соприкасается с проницаемым отрезком трубы.

Среди физических и геологических факторов, определяющих стоимость и успех понижающей установки, следует упомянуть в первую очередь величину зерен, проницаемость и условия залегания грунта, а во вторую — содержание свободных кислот и газов в грунтовой воде. Чем мельче материал, тем больше выбирают диаметр колодцев и тем меньше расстояние между ними. При крупнозернистом материале на расстояниях от 10 до 14 м располагают колодцы диаметром в 15 см. В мелкозернистых слоях диаметр колодцев увеличивают до 25 см, а расстояние между колодцами уменьшают до 5 или 8 м <sup>2</sup>. Кроме того проницаемый отрезок трубы нужно окружить песочным фильтром, чтобы избежать заполнения отверстий трубы. От проницаемости грунта зависит как время, в течении которого устанавливается окончательное гидравлическое равновесие, так и число лошадиных сил, нужное для

<sup>1</sup> Terzaghi. Wellpoint method for handling excavation of foundation pit at new sewage pumping station Lynn, Mass. Journal of Boston Soc. of Civ. Eng., vol. XIV, 1927.  
<sup>2</sup> J. Schultze. Die Grundwasserabsenkung in Theorie und Praxis. Berlin, J. Springer, 1924.

того, чтобы справиться с водой. Первые приближенные сведения для того, чтобы судить о проницаемости, можно получить при помощи испытаний проницаемости. Опытные специалисты могут оценить с некоторой точностью проницаемость и без опытов, на основании вида буровых проб. Но так как проницаемость системы пластов, подлежащей осушке, зависит не только от проницаемости отдельных слоев, но и от их взаимного расположения, то точные данные, необходимые для составления окончательного проекта осушки, можно получить лишь из результатов опытов откачки из пробных колодцев. При снижении грунтовых вод под дном открытых водоемов приток воды зависит также и от степени уплотнения этого дна.

Содержание кислоты в грунтовой воде влияет на продолжительность жизни фильтров и при длительной стройке может привести даже к разрушению колодезных труб. Если грунтовая вода содержит растворимые вещества, выпадающие при соприкосновении

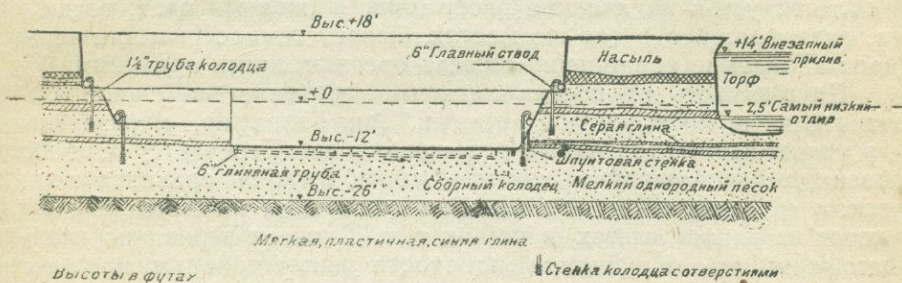


Рис. 45. Осушка котлована в Зупп, Mass. с помощью понижения уровня грунтовых вод (по Терцаги).

с воздухом, то является опасность, что отверстия фильтра заполнятся этими осадками. Возможность наличия значительных количеств газа следует принимать в расчет при проектировании установки для удаления этих газов.

При общей геологической экспертизе проектов осушки имеют следовательно значение общий характер грунтовых вод, приблизительный размер зерен, и проницаемость отдельных слоев, условия залегания, а особенно положение слабо проницаемых слоев, и, наконец, химические свойства грунтовой воды. Свойства материала отдельных слоев грунта лучше всего рисуются диаграммами и характерными цифрами (табл. II, стр. 39), как это сделано на рис. 15 (стр. 61). Следовало бы рекомендовать обработать с геологической точки зрения собранные при осушительных работах данные и представить их в систематическом виде.

д) Закладка фундамента в глинах. Вследствие устойчивой структуры песка свойства его определяются, при данном качестве этого материала, условиями, при которых он был отложен<sup>1</sup>. Как только зерна песка попадают в место своего будущего залегания, их история прекращается. Свойства песчаного пласта есть нечто постоянное и могут сильно измениться разве только благодаря

<sup>1</sup> Terzaghi. Erdbaumechanik.

выходящим из ряда событиям (подземная эрозия, восходящий ток подземной воды, длительное искусственное сотрясение и т. д.). Даже временная нагрузка пласта песка налегающими на него слоями других пород и последующее удаление их эрозией не могут изменить рыхлое залегание песка в плотное, и условия, при которых отлагался песок, можно проследить даже по структуре песчаника, образовавшегося из песка, по прошествии геологических промежутков времени. Структура песка остается неизменной.

Химические и физические свойства глины, в противоположность песку, могут претерпеть после момента образования целый ряд самых глубоких изменений, так что конечный продукт с инженерно-геологической точки зрения имеет очень мало общего с первоначальным. Химические изменения происходят главным образом благодаря явлениям восстановления и окисления. Часть этих процессов по всей вероятности протекает очень быстро. Это видно хотя бы из того факта, что многие реки окрашивают воду озера или моря в области устья на далекие расстояния в желтый цвет, тогда как ил, отлагающийся в тех же местах, бывает темносерым или черным (восстановление соединений железа органическими примесями).

Другая часть процессов вероятно протекает в течении более значительных промежутков времени. Так, например, поразительно, что уже в верхне-третичных отложениях не встречается сцементированных пластов грунта, которые можно было бы сравнить в химическом и физическом отношении со слоями ила, которые образуются на наших глазах в устьях рек. Также и зеркально гладкие (harnischartige) чешуйчатые плоскости напластования во многих случаях повидимому обусловлены химическими изменениями, связанными с увеличением объема. Так, например, в Houston, Texas, была встречена повидимому совершенно неизменная речная глина, у которой верхняя темнокрасная часть изобиловала бесчисленными зеркально гладкими чешуйками (Harnischfläche), тогда как нижняя зеленовато-желтая часть оказалась совершенно без трещин. На почти горизонтальной границе между этими двумя частями материал походил на брекчию, состоящую из красных и бледно-желтых кусков с острыми краями, рассыпающуюся на составные части уже от небольшого давления (Terzaghi). Образование чешуек было вызвано повидимому тем, что химическое превращение начиналось в различных точках одной и той же зоны в разное время, причем на границе между измененным и неизмененным материалом образовались плоскости сдвига. Относительно характера химических превращений, которые испытывают глинистые грунты с течением времени, пока мало известно. Если осушить поверхность толщи синей глины, то с течением времени цвет глины переходит в желтый, благодаря окислению бедных кислородом соединений железа. Физические изменения касаются главным образом изменений консистенции и содержания воды, обусловленных испарениями с поверхности или благодаря временной нагрузке.

Глины разделяют на два главных типа, в зависимости от их геологической истории: глины, отложенные в области речных пойм, и глины, отложенные в водных бассейнах, озерах и морях на значительном расстоянии от берегов (мелководные и глубоководные глины). Сюда присоединяется еще третий тип — современные, отла-

гающиеся вблизи морских берегов, часто переслоенные песком и смешанные с органическими остатками ила и грязи (Schlick und Schlamm).

*Пойменные мелководные глины.* В качестве примера пойменной мелководной глины приведем вязкую синюю глину (Gumbo), встречающуюся в области разлива р. Миссисипи. Предел текучести этой глины доходит до 75, а порядок величины предела пластичности равен 30, следовательно ее можно определить как жирную пластичную глину. Если эта глина отложена в более глубокой стоячей воде, то она десятки лет остается в полужидком состоянии и тем не менее благодаря своим свойствам будет почти водонепроницаемой. По А. М. Shaw<sup>1</sup>, глину в этом состоянии можно качать насосом, причем она течет как вязкая жидкость по почти горизонтальной поверхности. В области речных пойм, наоборот, глина затвердевает до самой поверхности, и если в глине пробить буровую скважину, то ниже уровня грунтовой воды вода врывается в скважину тонкими струйками из всех маленьких щелей и ходов, проделанных корнями. По данным глубокого бурения видно, что грунт местами содержит примазки и пропластки очень мелкого песка и прослой мягкой глины в виде линз или полос. Последние представляют собою очевидно результат заплывания мертвых рукавов реки<sup>2</sup>. Твердая консистенция пойменных глин объясняется тем, что каждый новый слой отложенной глины за период низкой воды уплотняется благодаря капиллярному давлению (частичное высыхание). Вследствие сравнительно небольшой объемной упругости эта глина сохраняет после уплотнения свой плотный образ залегания, несмотря на последующее размачивание. Сравнительно хорошие качества строительного грунта New Orleans La обусловлены тем, что пласты глины, залегающие под городом, представляют собою пойменные глины.

*Глубоководные глины.* Судьба мелководных глин гораздо более переменчива. В исходном состоянии, т. е. сейчас же после осаждения, глина бывает настолько рыхлой, что содержание воды в ней находится выше предела текучести (табл. II, опыт 13). Это справедливо для морских глин в большей степени, чем для глин, отложенных в бедных электролитами пресных водах. В течение процесса осаждения каждый новый образовавшийся слой перекрывается следующим за ним материалом. Вследствие малой проницаемости мелкозернистого осадка излишек воды удаляется чрезвычайно медленно. Поэтому вода, заполняющая поры в глубоко лежащих слоях глины, находится под давлением, и содержание воды в этих слоях долгое время остается больше, чем соответствовало бы давлению силы тяжести, под которым эти слои находятся. Процесс затвердевания („Konsolidationsvorgang“) можно выразить численно при помощи постоянных грунта, определяемых из опыта 1 (стр. 38); вычисления приводят, в согласии с опытом, к выводу, что богатые коллоидами современные или геологически очень молодые отложения глины могут находиться еще

<sup>1</sup> Из письменного сообщения от 9 января 1928 г. Наблюдение сделано на южном берегу озера Pontchartrin, La.

<sup>2</sup> Из неопубликованной экспертизы К. Terzaghi.

сейчас в состоянии неполного затвердевания. Пока в воде, заполняющей поры, существует избыток давления, глина еще находится в стадии затвердевания, и поверхность ее будет постепенно опускаться даже в случае отсутствия добавочной нагрузки.

В случае *a* (рис. 46) предполагается, что поверхность глины постоянно находится под водой, в случае *b* — поверхность сухая и подвергается испарению. В обоих случаях треугольники *abc* изображают общее давление, происходящее от собственного веса породы, а заштрихованные поверхности дают ту часть общего давления, которая уравнивается обратным действием воды.

На рис. 46 изображено распределение давлений, существующее в такой залежи глины. Общее давление, происходящее от собственного веса массы глины, на глубине *h* равняется  $q_1$  на единицу поверхности. Так как это давление возрастает очевидно пропорционально глубине,

то на глубине *z* оно будет равняться  $q_1 \frac{z}{h}$ .

Одна часть *W* этого давления уравнивается давлением напора излишка воды, медленно вытекающего вверх из оседающей массы глины, и только остальная часть

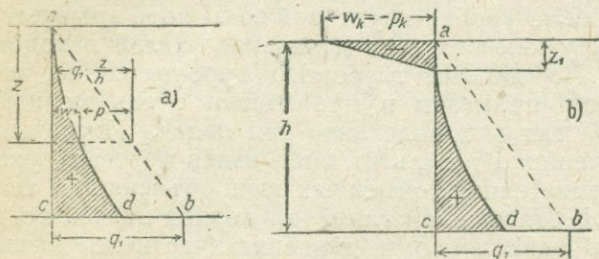


Рис. 46. Распределение напряжений в слое ила, находящегося в состоянии возрастающего уплотнения.

$p = q_1 \frac{z}{h} - W$  передается от зерна к зерну вниз. Треугольник *abc* изображает общее давление, происходящее от собственного веса глины, а заштрихованная поверхность *acd* дает давление заполняющей поры и вытекающей воды, направленное вверх. При возрастающем затвердевании уменьшается и количество воды, вытекающей в единицу времени из глины. Со скоростью потока уменьшается и давление, направленное вверх, которое производит вытекающая вода, пока наконец, при установлении гидростатического равновесия, это давление, изображенное на рис. 46а заштрихованной поверхностью, совсем не исчезнет. В этом окончательном состоянии процесса затвердевания содержание воды в любой точке залежи глины равно содержанию воды, соответствующему действующему в этой точке общему давлению  $q_1 \frac{z}{h}$ .

Пока в порах глины имеется избышек воды, эта последняя находится под действием положительного гидростатического давления и уходит поэтому в зону наименьшего избытка давления, т. е. наверх. Масса глины благодаря этому уплотняется, и в частности это уплотнение идет немного скорее в более глубоких слоях, чем в слоях, лежащих выше.

Главное значение вычислений, которые Terzaghi производит в своей „Erdbaumechanik“ на стр. 177 — 178, заключается не в самых цифрах, которые он получает. Численные значения в лучшем

случае могут лишь указать на порядок величины, потому что в природе нет совершенно однородных залежей глины. Значение же вычислений заключается скорее в том, что результаты вычислений дают ключ к пониманию многих явлений, которые иначе или оставались бы совсем непонятными, или же толковались бы неверно. Неправильное же толкование наблюдаемых явлений ведет к бесполезным или в едном техническим мероприятиям.

В качестве примера физического толкования имевших место явлений оседания мы приведем случай, когда состоящие из глины класса разбухания 2, проницаемости класса VI отложения затопленной долины недалеко от Константинополя подстилались замкнутым со всех сторон водоносным пластом песка. Поперечный разрез рис. 47 показывает, что поверхность глины первоначально находилась на несколько метров выше современной поверхности и заняла свое новое положение благодаря затвердеванию глины. Когда буровая дошла до слоя песка, то натолкнулись на артезианскую воду. Одновременно с началом работы насосов, необхо-

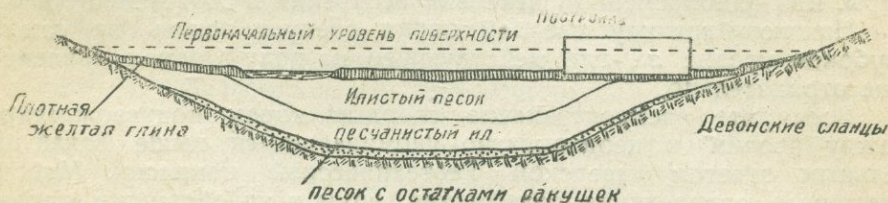


Рис. 47. Разрез отложений речной долины около Константинополя (по Терцаги).

димой для сильного понижения уровня воды, вся земля вместе со стоящими на ней зданиями и складами начала опускаться, и приблизительный подсчет показал, что объем откаченной из колодцев воды приблизительно равняется объему, заключенному между первоначальной и новой поверхностью земли.

Так как естественные оседания, связанные с затвердеванием глинистых отложений, не поддаются непосредственному наблюдению вследствие своей относительной незначительности, то вероятно многие явления оседания приписывают исключительно весу вновь возведенных сооружений, тогда как в действительности в небольшой степени это оседание произошло еще до постройки зданий. Для выяснения причин оседания полезно связать нивелировочкой опорные точки, отмеченные на здании, с другими точками, находящимися на значительном расстоянии за пределами зданий. В описанном выше случае часть изгороди участка, окружающей постройку, осела почти столько же, сколько и само здание.

**Образование коры и консистенция глинистых отложений.** При обсуждении приведенного выше на рис. 46 разреза глинистых отложений предполагалось, что поверхность залежи покрыта водой. При этом предположении в воде, заполняющей поры, физически мыслимы только положительные гидростатические давления, изображенные заштрихованной поверхностью *acd*. Как только однако поверхность глины вследствие поднятия почвы или опускания уровня воды приходит в соприкосновение с воздухом, начинается

испарение, и вблизи поверхности возникает отрицательное гидростатическое давление, подобное тому, которое существует в пучке капиллярных трубочек, в верхнем конце которого вода испаряется<sup>1</sup>. Сила  $W_k$  (рис. 46в), с которой это напряжение сказывается на поверхности, и глубина  $z_1$ , до которой испарение чувствуется внизу, зависят от свойств материала, от скорости испарения и от промежутка времени, протекшего с начала процесса испарения. Вследствие закона равенства действия и противодействия напряжение  $W_k$ , вызванное испарением и действующее на воду, заключенную в порах на поверхности глины (давление силы тяжести равно 0), связано с действующим внутри глины равным по величине давлением (капиллярное давление)  $p_k = -W_k$ . Силы, обусловленные испарением, складываются с уже разобранными выше давлениями, обусловленными собственным весом глины в связи с её малой проницаемостью. Рис. 46в (заштрихованная поверхность) дает отрицательные и положительные давления, получающиеся в воде, заполняющей поры, при одновременном действии испарения и собственного веса.

Нижнюю границу твердой корки следует искать на самом глубоком уровне  $z_1$ , где действующее на воду в порах давление еще отрицательно.

Всемирное распространение твердых корок подтверждается между прочим и неоднократно упоминавшимся выше заключительным отчетом шведской Геотехнической комиссии. Многочисленные определения содержания воды и консистенции, произведенные Комиссией, выяснили физические свойства этих корок с количественной стороны. Среди примеров Средней Европы можно упомянуть корки, ошибочно принятые за способный выдерживать нагрузки грунт при постройке Баварской железной дороги от Kempten до Immenstadt<sup>2</sup> и при пересечении долины между Badgastein и Hofgastein.

Из приведенной выше теории затвердевания под действием собственного веса вытекает, что как во время процесса затвердевания, так и по окончании его консистенция глины возрастает, а содержание воды убывает с глубиной.

Это правило подтвердилось, например, при геофизическом испытании буровых проб, взятых со дна морского залива Малый Vaertan, шириной 750 м, между Stockholm (Ropsten) и островом Lidingö (мелкий мягкий синий суглинок, по W. Kranz морской вязкий ил)<sup>3</sup>.

Рис. 48 дает схематическую картину соотношений, встреченных в одной из точек наибольшей мощности отложений.

В других случаях, однако, как будто не существует никакой закономерности между консистенцией и глубиной залегания. Это справедливо особенно относительно отложений глины, покрытых корой высыхания (см., например, разрезы грунтов в многократно приведенном заключительном отчете шведской Геотехнической комис-

<sup>1</sup> Terzaghi. Erdbaumechnik, S. 161 — 169.

<sup>2</sup> Die Heubachbrücke zwischen Kempten und Immenstadt auf der königl. bayrischen Süd-Nordbahn. Försters Bauzeitung, S. 269, 1855.

<sup>3</sup> По W. Kranz. Die Geologie im Ingenieurbaufach, S. 342, исследования производились шведским Мостовым управлением под руководством Z. O l s o n s, см. рис. 28, стр. 353 в книге Кра н ц а.

сии, Стокгольм, 1922), и для глин, которые отчасти стали тверже благодаря временному или длительному налеганию проницаемых слоев. Различия, проистекающие от местных условий осаждения или их изменений со временем (концентрация осаждающегося ила, содержание электролитов в воде), от различия в величине зерен, минералогического состава и от последующих химических изменений повидимому совершенно затемняют в этих случаях закономерность, связанную с процессом затвердевания. Изучение соотношений между консистенциями имеет не только большое практическое значение, но и представляет единственное средство выяснить историю возникновения отложений глин с физической и геологической стороны. Успешное производство таких исследований требует, однако, основательного знакомства с учением о сопротивлении материалов и с физикой грунтов.

Так как консистенция глин меняется совершенно не поддающимся расчетам образом, если ее месить при неизменном содержании воды (рис. 3), то необходимо производить определения консистенции с ненарушенными пробями глины (пробные цилиндры). Если постараться не ввинчивать, а вдавливать в грунт буровой снаряд, служащий для выемки проб, то материал вынимается повидимому в ненарушенном состоянии (см., например, правильные поверхности слоев пробы грунта, изображенной на рис. 49).

При современном состоянии нашего знакомства с зависимостью между способностью несцементированных грунтов выдерживать нагрузку и сопротивляемостью давлению цилиндрических проб грунта, определения консистенции могут пока служить только для сравнения строительных грунтов, требующих оценки, с такими строительными грунтами, для которых способность выдерживать нагрузки уже известна из поведения возведенных на них построек. При помощи физического изучения консистенций и характера глин с одновременным наблюдением за возведенными уже на них сооружениями исключается опасность неправильного заключения о вероятном поведении новых построек, которые проектируются в том же районе.

**Работы по закладке фундаментов в однородных глинах.** В определении размеров допустимой нагрузки грунта строительные власти различают глины мягкие, средней твердости и твердые („сухие“). Выражение „сухая“ глина относится, конечно, только к внешнему виду материала. Исследуя „сухие“ пробы глины, взятые с большой глубины, легко можно убедиться, что и „сухая“ глина обладает объемом пор от 30 до 40%, причем поры совершенно заполнены водой. „Сухая“ глина по своему содержанию воды соответствует примерно плотно залегающему, ненасыщенному водой песку.

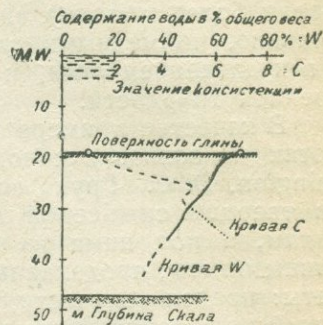


Рис. 48. Результаты испытания буровых образцов из Vaertan (по O l s s o n), указывающие на изменение водосодержания (W) и консистенции (C) в зависимости от глубины.

Мягкие глины, как уже указывалось, очень часто значительно тверже около поверхности, обстоятельство, которое может обмануть инженера относительно способности материала выдерживать нагрузку. Нагрузка грунта, принимаемая за допустимую, колеблется между 1 и 2 даже 2,5 кг на 1 см<sup>2</sup>. Глины средней твердости нагружают 1,75 до 3, иногда даже 4 кг на 1 см<sup>2</sup>. Твердые глины встречаются главным образом среди третичных и дочетичных отложений. Твердая консистенция может представлять собою или результат процесса высыхания, который нормально начинается с образования корки, или же она возникла благодаря весу прикрывающей толщи, которая в течении геологической истории сначала была отложена, а потом опять смыта. Глины такого сорта отличаются часто равномерной консистенцией, почти не зависящей от глубины. Среди более молодых глин твердая консистенция ограничена, как правило, пойменными глинами, ледниковыми глинами, уплотненными давлением льда, и корками мягких залежей глин и залежей средней твердости.

В качестве примера приведем залежь глины, вскрытую при работах по закладке силовой станции Potomac-Power Station in Washington, D. C. Грунт состоял на глубине от 0 до примерно 12 м из твердой сине-серой глины, от 12 до 15 м из твердой желтой глины, а под ними из плотного коричневого песка. Для синей глины опыты, сделанные по Terzaghi, дали следующие результаты: предел текучести 52, предел пластичности 24, предел усыхания (уменьшения объема при сушке, Shrinkage) 12, содержание воды 31%, сопротивляемость давлению свежих цилиндрических проб 3,4 кг на 1 см<sup>2</sup>, класс набухания VII. Фундамент был рассчитан на нагрузку в 4 кг на 1 см<sup>2</sup> (глубина закладки 6 м). Повидимому этот материал представляет собой пласт глины, отложившийся в области пойм и получивший твердую консистенцию благодаря высыханию. В той же свите слоев встречены пласт крупного щебня и линзообразная залежь синей глины, оставшейся мягкой (старича).

Твердые глины на практике нагружают от 4 до 6 кг на 1 см<sup>2</sup>. Однако было бы большой ошибкой принимать эти и другие цифры без критики. Из-за отсутствия справедливых для всех случаев зависимостей между оседанием и размерами нагружаемых поверхностей данные относительно допустимых нагрузок грунта являются лишь способом, к которому прибегают за неимением других. Оседания глин, которые получают при „допустимой нагрузке“ нередко в десять раз превышают наибольшие оседания фундаментов, рассчитанных на наибольшую допустимую нагрузку для песчаного грунта. Кроме того оседание фундаментов, стоящих на глине, с течением лет постоянно увеличивается по причинам, указанным на стр. 116 (постепенное сжатие грунта), тогда как фундаменты, стоящие на песке, успокаиваются уже через короткое время.

Наконец, следует упомянуть еще вязкие высококоллоидальные, залегающие глубоко глинистые массы, состоящие из тонкой песчаной пыли (Schluff), глины и органических веществ; они образуются на значительном расстоянии от берегов или на значительном расстоянии от устья рек, несущих перекаточный материал. Осадку строений, происходящую в первые годы после окончания постройки, следует приписывать почти исключительно „текучести“ материала при почти неиз-

менном содержании воды. Однако ввиду того, что такие глинистые отложения часто находятся еще в состоянии неполного затвердевания, выстроенные на них здания города оседают по истечении десятков лет на значительную величину (полметра и более).

При рытье глубоких и широких котлованов для фундамента в глинистых отложениях следует иметь в виду, что напряжения, возникающие в строительном грунте от веса грунта у стенок котлована, после достижения требуемой глубины могут быть гораздо более неблагоприятными, чем нагрузка от самого здания.

При рытье котлована для устоя XVI моста через р. Вейксель около Thorn дно котлована поднялось примерно на 0,31 м, причем сваи фундамента вместе с окружающими его лесами поднялись на 0,1 м. Грунт состоял из твердой глины<sup>1</sup>. В случае, изображенном на рис. 45, опасались вспучивания дна котлована. Поэтому на верхнем конце пробной сваи установили опорную точку и в период земляных работ от времени до времени производили измерения. Однако никакого движения заметить не удалось. В Detroit, Mich., при рытье котлована подобных же размерах в твердой ледниковой глине, смешанной местами с маленькими гальками, вскрыт прослой глины, оставшийся мягким. В том участке котлована, где был вскрыт этот прослой, дно поднялось на 2,4 м. При рытье выемки для магистрального канала в Jersey вязкая глина так энергично вылезала наверх, что в конце концов пришлось наполнить котлован водой и закончить работу землечерпательной машиной. Так как глина почти не пропускала воду, пришлось провести необходимую для заполнения воду извне.

Среди случаев, которые могут произойти при закладке фундаментов на глине, следует упомянуть о неожиданном вскрытии гнезд мелкого песка.

При рытье колодцев в Чикаго иногда встречались такие гнезда, причинявшие значительные потери времени и денег. После окончания котлована глубиной около 6 м, вырытого в описанной на стр. 136 глине (закладка фундамента силовой станции Potomac), на дне котлована вдруг из вертикальных цилиндрических отверстий забились ключи, дававшие смесь воды и мелкого песка (около 40 л в минуту, ширина отверстий 5 см). Вода притекала из прослоя мелкого песка, имевшего вид полосы, залегающей на глубине 1 м и идущей под углом к оси котлована. Между буровыми скважинами местами пришлось устроить бетонные перемычки с фильтрами, а пустоты, образовавшиеся от вымывания песка, заполнить цементом.

Пресноводные глины с прослоями песка. В области распространения ледниковых отложений нередко можно встретить глины, представляющие переход от жирных глин к пылевидным пескам (класс набухания от 2 до 3, E, рис. 17), отличающиеся очень часто небольшой мощностью слоев.

Рис. 49 изображает результаты испытаний, сделанных над неизменной пробой такой глины. Проба была взята на глубине около 10 м из буровой скважины недалеко от State Capital в Albany, N. Y. (подземная часть City Office Building). Кверху материал пе-

<sup>1</sup> Железнодорожный мост через р. Вейксель около Thorn. Zeitschr. f. Bauwesen, S. 35, 1876.

реходил в типичную ледниковую ленточную глину (varved clay). С левой стороны рисунка можно видеть форму, которую приняли отдельные отрезки пробы после сжатия на 20% первоначальной высоты. Песчаные прослойки подобно прослойкам песка на рис. 41 позволяют излишку воды, заключенному в порах глины, вытекать в стороны. Поэтому при нагрузке толщи такой глины происходит

значительное оседание, которое следует вероятно приписать сжатию (уменьшение объема или уплотнение) глинистых прослоев. При рытье котлована, из которого взята проба рис. 49, вода просачивалась из песчаных прослоев. Соседние строения осели неравномерно, несмотря на тщательное укрепление стенок котлована. Уплотнение грунта, вызванное забивкой свай для фундамента, равнялось примерно 20% объема, занятого сваями. Многие из забитых ранее свай поднялись во время работ на 90 см, из чего можно сделать заключение о коренном изменении структуры грунта. Строительные власти городов, в грунте которых встречаются ленточные глины, указывают, как пра-

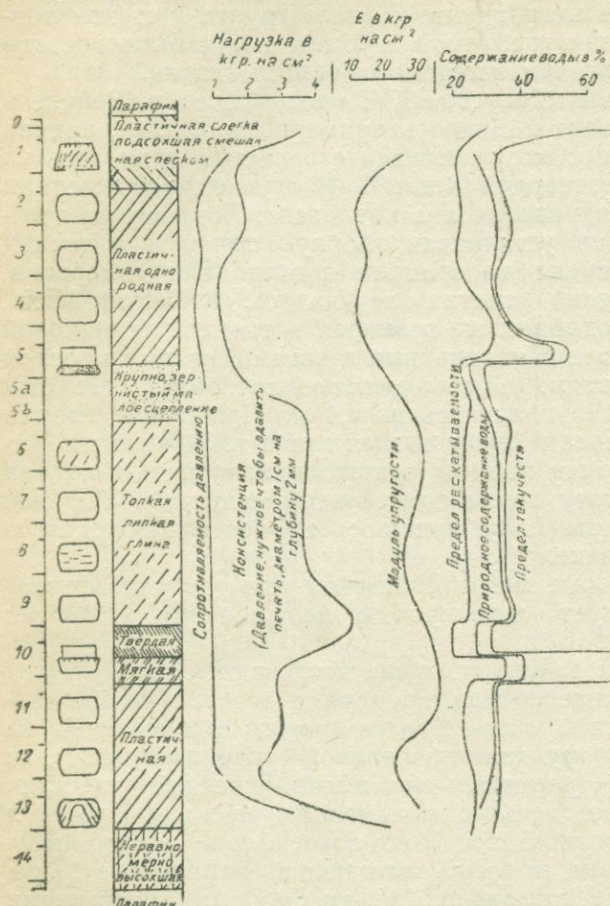


Рис. 49. Изменение свойств слабой ленточной глины (Albany, N. Y.) на интервале 40 см буровой колонки (керн) по Терцаги.

вило, наивысшую допустимую нагрузку грунта, равную 2 кг на 1 см<sup>2</sup>. Однако и при такой нагрузке тяжелые здания с большой площадью основания оседают весьма заметно.

В качестве примера глинистых и илстых отложений, чередующихся с прослоями мелкого и крупного песка и образовавшихся вблизи берегов, приведем разрез (рис. 50) узкой полосы берега около Клэвелэнда, Огио, на озере Эри. Отложение состоит, очевидно, из продуктов размывания донной морены, залегающей вблизи берегов и дальше вглубь страны, смешанных с органическими составными частями. Если в таких отложениях копать глубокий котлован с искус-

Буровая скважина 103

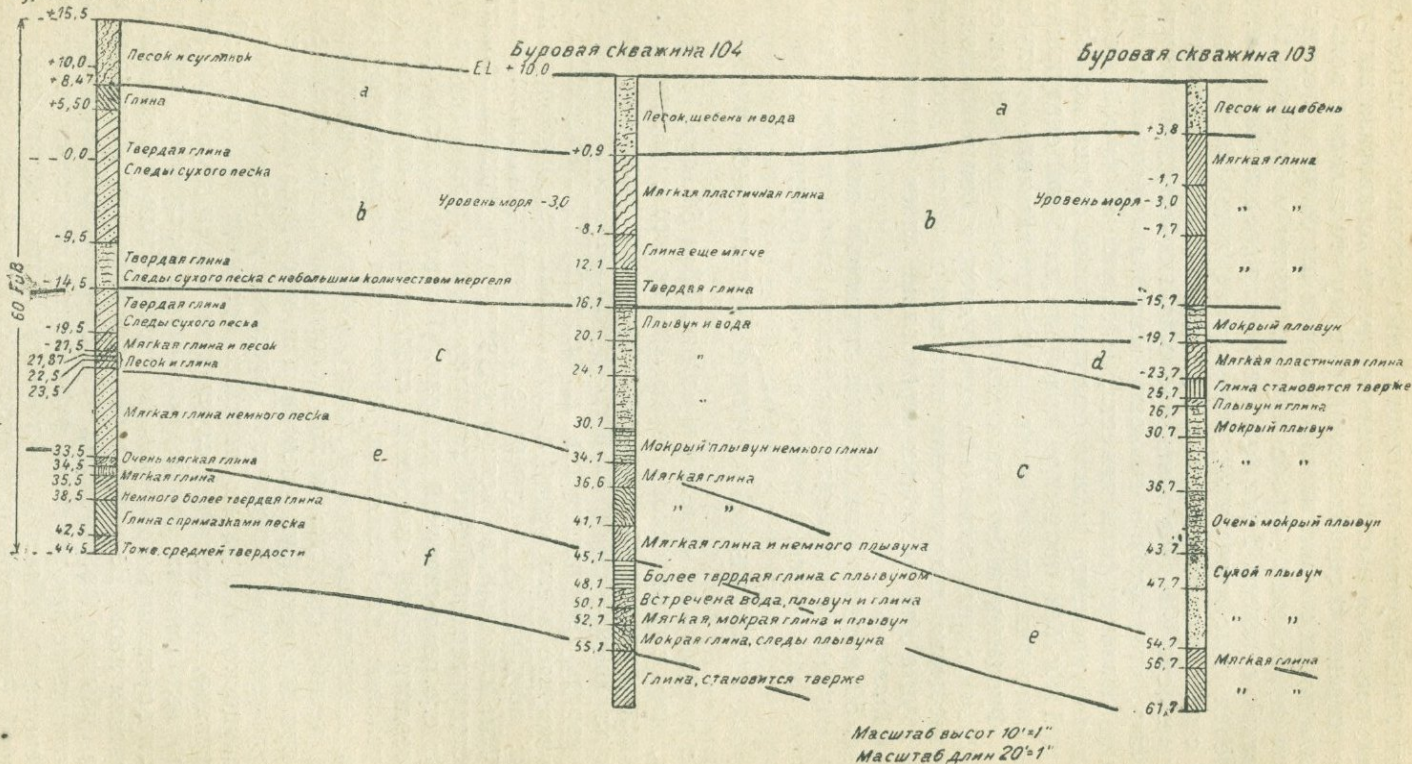


Рис. 50. Сводный геологический разрез береговой полосы у озера Эри, Клэвеленд, Огио (глубина в футах).

ственной осушкой, то по соседству с котлованом гидростатическое давление, действующее при нормальных условиях, отпадает. Возникающая при этом в строительном грунте добавочная нагрузка вызывает оседание соседних зданий, потому что излишек воды, заключенный в порах глинистых слоев, может вытекать по песчаным прослойкам в котлован. Проба грунта, взятая на глубине 11 м (дно котлована), согласно Terzaghi, показала предел текучести, равный 33, предел пластичности 22, содержание воды 34% и содержала 0,92% своего веса органического углерода (класс набухания 3, класс проницаемости VII). Из поведения обшивки котлована можно было заключить, что боковое давление материала равнялось примерно половине давления силы тяжести, действующей на той же глубине. Сваи для фундамента можно было забивать со дна котлована глубиной в 11 м без промывки водой до глубины следующих 14 м, причем сопротивление вбиванию почти не зависело от глубины забивки. Фундаменты агрегата машин, находящиеся на расстоянии около 20 м от края котлована, сдвинулись, и бетонный пол машинного помещения дал трещины шириной до 3 см. Допустимая нагрузка грунта для подобных чередований слоев равняется от 1 до 2 кг на 1 см<sup>2</sup>.

Рис. 50 может также служить примером далеко идущих упрощений, которые мы принуждены делать, чтобы в подобных случаях получить геологический разрез из данных бурения.

### 3. РЕГИОНАЛЬНЫЙ ПОДХОД К ГЕОЛОГИИ ОСНОВАНИЙ.

Из предыдущих отделов и из рис. 53 и 54 (стр. 152 и 153) вытекает, что с физической точки зрения исследование ограниченного числа буровых проб может дать только часть данных, необходимых для оценки строительного грунта. Чтобы правильно оценить устойчивость, проницаемость и вероятную сжимаемость грунта, нужно прежде всего верно понять общий геологический характер района; результаты, полученные в лаборатории, являются только средством для цели, во всяком случае очень важным средством.

Общий геологический характер строительного грунта есть результат его геологической истории. Поэтому в местностях с похожей геологической историей следовало бы ожидать и сходных условий для земляных работ при закладке фундаментов. Это в действительности и имеет место. Так, например, существует тесное сродство между соотношениями, которые встретились при закладке фундаментов для мостовых устоев на р. Гудзон, на северном побережье Бретани, в Золотом Поре залива С.-Франциско и в узких морских проливах в New South Wales в Австралии. Во всех этих случаях мы имеем дело с ландшафтами хорошо выраженных долин, которые в последний период своей истории опустились под уровень моря и были перекрыты глубинным мягким илом. Величина зерен этих недавних отложений, вообще говоря, убывает сверху вниз. Некоторые строительные затруднения, возникшие при закладке фундаментов мостовых устоев в наносах некоторых областей восточного Китая, напоминают похожие явления в Венгерской низменности (болотный лёсс, Sumpflöss). Затруднения, связанные с устройством водохранилищ в области извест-

няков, повторяются с небольшими изменениями в самых разнообразных частях света: кроатский карст, Греция, Северная Африка, Мексика, Виргиния, Вест-Индские острова. Как в Швейцарских Альпах, так и в Kaskaden-Gebirge решалась задача закрытия прорывов (брешей) в конечной морене, чтобы запрудить находящиеся за моренами естественные озера. Способ уширения подошвы фундамента был разработан приблизительно одновременно, хотя и независимо, в области распространения ледниковых глин в Швейцарии и в Новой Англии.

При этих условиях является настоятельная необходимость пересмотреть строительные условия с точки зрения геологической и геоморфологической и таким путем вскрыть органические зависимости, которые оставались неизвестными при существующем до сих пор чисто техническом подходе. Такая сводка дала бы нам возможность более правильного проектирования и расчета строительных работ в незастроенной еще местности, используя в этих целях после предварительных поисковых работ данные о работах в других частях света, происходивших в аналогичных геологических условиях. Последовательное проведение указанной мысли привело бы к созданию региональной инженерной геологии. Следующие факты должны служить лишь примером того, каким образом следует решать технические строительные вопросы с точки зрения региональной инженерной геологии.

**Миоценовый морской залив, местами плейстоценовый галечник и лёсс (Вена)**<sup>1</sup>. Вена расположена на краю впадины, ограниченной двумя пересекающимися около Gloggnitz сбросами с амплитудой около 1000 м. Горы, возвышающиеся к западу от Вены, относятся к венской песчаниковой или флишевой зоне (верхний мел и нижнетретичные отложения). Песчаник легко выветривается и послужил первоначальным материалом для более молодых отложений. В среднетретичное время произошел прорыв древнего Средиземного моря во впадину, в которой до этого времени находилось пресное озеро. Отложения, отложенные в морском заливе, представляют собою комплекс слоев мощностью до 500 м, состоящий из кирпичных глин и песков, и включают в себе отложения средиземноморского, сарматского и понтического ярусов. Наиболее высоколежащие береговые образования находятся на высоте около 270 м выше современного уровня Дуная.

Когда понтическое море достигло своего наивысшего уровня, река, предшественница современного Дуная, начала откладывать в морском бассейне свои песчано-галечниковые осадки. Слой гальки, поверхность которого в свое время находилась на высоте около 200 м выше уровня Дуная, был впоследствии почти совершенно смыт эрозией. Тем не менее отложения гальки имели существенное значение для условий закладки фундаментов в Вене, потому что толща гальки в течении долгого времени оказывала на миоценовые глины благодаря своему весу давление в 20 кг на 1 см<sup>2</sup>, вследствие чего глины превратились на долгое время в плотный, способный

---

<sup>1</sup> F. X. Schaffer. Der geologische Bau von Wien in seiner erdgeschichtlichen Entwicklung. Zeitschr. d. Oesterr. Ing. u. Arch. Ver., 1907.

выдерживать значительную нагрузку грунт, обладавший большим истинным сцеплением (ср. стр. 135—136).

Дальнейший ход истории реки, откладываявшей гальку, был выяснен благодаря изучению террасовых образований, на которых расположены западные и внутренние части города. Самая верхняя терраса (терраса Nussberg) находится на высоте около 200 м над уровнем Дуная, следующая терраса (Burgstall) — на высоте 155 м. На террасе Laaerberg (100 м) залегают дунайские галечники мощностью до 7 м среди рисово-красной глины (продукт разрушения)



Рис. 51. Грунты г. Вены (по Шафферу).

на эродированной поверхности; часто эти галечники сцементированы в виде конгломерата. На террасе 50 м расположены новые, наиболее густо застроенные части города. Слои, подстилающие галечники на той террасе, состоят из кирпичной глины (Tegel), и краю террасы соответствует ступенчатое понижение поверхности глины. Образование террасы 15 м, на которой простирается район Simmering, относится к ледниковому периоду. Терраса состоит из богатого песком галечникового наноса, средней мощностью в 15 м. Самая старая часть города (внутренний город) расположена на галечнике, нагроможденном не Дунаем, а его притоками, особенно р. Веной, в виде плоской наносной косы. Он состоит из углова-

тых обломков венского песчаника, выветрелых с поверхности, его называют и местным в отличие от окатанного галечника Дуная, или иначе плитчатым щебнем (Plattelschotter).

Когда Дунай завладел покинутым бассейном понтического моря, местность, занятая Веной, была степью и покрыта буковым лесом. На степной почве образовались отложения эолового происхождения, происшедшие из продуктов разложения (глины, флишевых пород). Мощность венского лёсса в отдельных частях города доходит до 10 м. Лёсс образует в более низлежащих частях города довольно связный покров. Лёсс, как и большинство отложений такого рода, в высокой степени водопроницаем, несмотря на свою тонкозернистость, за исключением тех мест, где он осаждался в стоячей воде (старица реки)—болотный лёсс. Венский болотный лёсс по своему составу соответствует кирпичной глине (Tegel). Рис. 51 дает представление о распространении упомянутых выше пород. Благодаря только что набросанной геологической истории, венский строительный грунт отличается среди грунтов других столиц необычайно благоприятными свойствами. На венском лёссе в 1915 г. были проделаны Австрийским союзом инженеров и архитекторов под руководством Emperger испытания нагрузками, давшие ценные результаты, хотя справедливые лишь для определенного типа лёсса<sup>1</sup>.

Нагрузки грунта, которые считаются допустимыми в черте города Вены, приводятся ниже. Некоторые из этих цифр содер- жатся в Normenblatt, S. 605, 1902 г., Венского городского строи- тельного управления. Тем не менее в действительности они не всегда оправдываются на практике (согласно любезному сообщению д-р инж. R. Tillmann). Предполагается, что при нагрузках грунта, указанных в таблице, не следует ожидать оседания больше 3 см, поскольку глубина закладки фундамента равняется по край- ней мере 1 м, а слои грунта имеют достаточную мощность.

### Нагрузки грунта, принятые в округе города Вены

(по R. Tillmann).

	в кг/см <sup>2</sup>
1. Аллювиальный песок очень мелкозернистый, мало влажный, в зависимости от положения . . . . .	от 1 до 1,5
2. Глина (глина и мелкий песок), окрашенная окислами . . . . .	2,0
3. Песок сильно глинистый сухой . . . . .	2,0
4. Песок (зерно до 5 мм) чистый, очень влажный . . . . .	2,0
5. Песок (зерно до 5 мм) чистый, сухой, плотно залегающий . . . . .	4,0
6. Глина мягкой консистенции . . . . .	1,0
7. Лёсс сухой или естественной влажности . . . . .	3,0
8. Аллювиальный и дилuviальный галечник, чистый, раз- ной крупности, в зависимости от положения . . . . .	от 4,0 до 8,0
9. Дилuviальный галечник (щебень) сильно глинистый	
а) Арсенальная галька (светло-желтая) . . . . .	—
б) Галька горы Laag (ржаво-красная), сухая или уме- ренно влажная, в зависимости от положения и содер- жания воды . . . . .	от 2,0 до 4,0
10. Синяя глина (Tegel) понтического яруса, сухая или естественной влажности . . . . .	4,0

<sup>1</sup> По рукописи, составленной Dr. Emperger.

11. Серая, частью выцветшая глина сарматского яруса, сухая или естественно влажная . . . . .	4,0
12. Морские пески с конкрециями . . . . .	5,0
13. Продукты выветривания флишевого песчаника: красный и серый или зеленоватый тегель, сухой или естественно влажный, смотря по залеганию . . . . .	от 2,0 до 3,0
14. Пестрый флишевый мергель естественно влажный . . . . .	5,0
15. Следующим видам грунта не приписывается никакой заслуживающей внимания способности выдерживать нагрузку:	
а) Мокрый песок (Wellsand) . . . . .	—
б) Мажущий песок (сарматский ярус) . . . . .	—
в) Мокрый лёсс и глина . . . . .	—
г) Мокрый тегель . . . . .	—
е) Шлис (мокрый песчаный тегель) . . . . .	—

**Древне-аллювиальные песчаные отложения, современные отложения ила и торфа (Берлин)<sup>1</sup>.** Город Берлин лежит большею частью в области осадков, отложенных в древней долине р. Эльбы. Равнина, расположенная по обе стороны древней долины реки, состоит из дилuviальных отложений, под которыми в окрестностях города местами видны более древние образования (буроугольные третичные отложения, третичная сентариевая глина, цехштейновый гипс и раковистый известняк). Древняя речная долина была промыта тальми водами, собиравшимися на краю ледника во время отступления Скандинавского ледяного покрова, простиравшегося на Е—W; эти воды стекали в древнюю Эльбу. Русло потока достигало глубины от 40 до 120 м и было заполнено древне-аллювиальным речным песком, размер зерен которого увеличивается с глубиной. В северо-западной части города (дельта между р. Райке и р. Шпрее) на поверхность речного песка налегает сухой дюнный песок, представляющий собой прекрасный строительный грунт. В других же частях города речной песок погребен под более юными наносами, представляющими строительный грунт сомнительного качества вследствие его малой способности выдерживать нагрузку. К таким наносам принадлежат торф и богатый гумусом песок, торфянистая земля, содержащий известь торфянистый мергель на юге Friedrich-Stadt и в районе вокзалов Lehn и Anhalt, залежь инфузальной земли между Kronprinzenbrücke и Kupfergraben, старая Bauakademia до Gertraudenbrücke и Waisenbrücke; луговая и болотистая почва в районе Ботанического сада, между Hasenheide и Rixdorf. Молодые аллювиальные образования заполняют впадины и сухие русла потоков, так что мощность их меняется самым неожиданным образом.

Затруднения при закладке фундаментов в Берлине большею частью стоят в связи с местным развитием необычайно мощных молодых аллювиальных образований. При постройке берлинской городской железной дороги речной песок, выдерживающий нагрузку, встречается на отдельных участках, например между Louisenstrasse и Lehrter-вокзалом, а также у Humbolthafen, только на глубине

<sup>1</sup> Berlin und seine Bauten. Geologische Beschaffenheit des Bodens von Berlin. Berlin, 1896.

18 м<sup>1</sup>. Поэтому фундаменты подвесного участка городской жел. дор. закладывали, смотря по положению уровня грунтовой воды и выдерживающего нагрузку деска, с уширенным основанием или при помощи заливки бетона между шпунтовыми стенками, или на опускных колодцах, или на свайном ростверке. Относительно нагрузки свай на основании опыта было установлено, что на деревянные сваи толщиной 30 см можно нагружать от 20 до 25 т, если они опускаются не больше, чем на 1 см, при последнем ударе копра весом бабы в 1 т, при высоте падения в 1 м. Чтобы удовлетворить этому условию, обычно достаточно забить сваи не глубже, чем на 3 м в речной песок. Из этого обстоятельства, а также из результатов пробных нагрузок, произведенных при постройке городской железной дороги<sup>2</sup>, повидимому вытекает, что речной песок залегает чрезвычайно плотно и очень мало сжимается. Если фундаменты берлинской городской железной дороги за полстолетия своего существования осели на величину, равную нескольким сантиметрам, то это вероятно следует отнести за счет процессов в более глубокой части грунта, которые могут зависеть от непрерывно увеличивающейся общей нагрузки, действующей на пласт песка, от влияния постоянных сотрясений и, наконец, от действия временного понижения уровня грунтовых вод.

В качестве примера затруднений при закладке фундаментов, возникающих в черте города Берлина из-за местного появления мощных молодых аллювиальных образований, упомянем новую постройку Музея и закладку фундамента здания Патологического института Университета<sup>3</sup>. При бурении под фундаменты северного крыла Музея оказалось, что хороший грунт, залегающий на соседних участках в среднем на глубине от 6 до 7 м под поверхностью земли, на месте постройки опускается на полосу шириной от 30 до 50 м ниже среднего уровня р. Шпрее. Через эту депрессию пришлось перебросить косой массивный свод, опоры которого переносят давление свода на плотно залегающий песок. Перед постройкой свода сравнительно плотные на большой глубине илистые отложения оврага были укреплены еще больше свайной бойкой и засыпкой песком с поверхности<sup>4</sup>.

На месте постройки упомянутого выше здания грунт состоял сверху вниз из 3 м культурного слоя, от 2 до 3 м торфа и инфузورной земли, 12 м торфяника, от 3 до 5 м рыхлого песка и только ниже из выдерживающего нагрузку речного песка. Глубина залегания поверхности речного песка равнялась в среднем 19,5 м, максимум 22 м. Забивка свай через торфяник оказалась очень затруднительной, потому что при всяком перерыве в работе копра сваи прочно присасывались к торфянистой почве. Присутствие

<sup>1</sup> Die Berliner Stadteisenbahn. Seitschr. f. Bauwesen, S. 1 u. 113, 1884. См. также: Rammarbeiten beim Bau der Berliner Stadteisenbahn. Zeitschr. f. Bauwesen, S. 267, 1880.

<sup>2</sup> Brennecke-Lohmeyer. Der Grundbau, S. 28 u. 29, 1927.

<sup>3</sup> Das neue Sammlungsgebäude des Pathologischen Institutes der Universität. Beriin. Zentralblatt der Bauverwaltung, S. 212, 1900.

<sup>4</sup> Gründungsarbeiten bei den Museumsneubauten in Berlin. Deutsche Bauzeitung, 11, Bd. 46, S. 738 u. 775, 1912.

пласта торфа представляло однако то преимущество, что приток воды в котловане был снизу отрезан.

Более значительные глубокие фундаменты закладывают в настоящее время в берлинской песчаной почве при помощи снижения уровня грунтовой воды. Методы снижения для города Берлина были конструктивно разработаны и отчасти улучшены при постройке городской подземной дороги.

Затопленные долины с илистыми наносами, флювио-гляциальные отложения (Нью-Йорк)<sup>1</sup>. Возникновение современной топографии местности, занятой городом, начинается с происшедшего в верхне-третичное время поднятия Аппалачских складчатых гор. В связи с этим преобразовательным процессом равнина Нью-Йорка (Schooley Plain) была приподнята кверху в виде свода. Так как базис эрозии Атлантического океана остался без изменений, то реки Гудзон и East River размыли образовавшийся порог, что таким образом послужило причиной для образования глубоких оврагов, находящихся по обе стороны внутренней части города (Manhattan Island). Обе реки соединились на южном конце современного острова Manhattan и текли вместе в юго-восточном направлении через Narrows в Атлантический океан, берега которого вероятно находились на расстоянии около 150 км от современной береговой линии. Во время ледникового периода массы льда, идущие с Лабрадора, проникали через Manhattan вплоть до Narrows (рис. 52), и валунный материал морен, принесенный льдом на юг, нагромоздился в виде конечной морены, остатки которой мы видим на островах Staaten Island и Long Island. Когда ледник отступил, то северная, большая половина острова Manhattan оказалась совершенно очищенной, и только кое-где на нем остались остатки тонкого слоя донной морены. Центральный парк, естественный парк, занимающий середину жилого квартала в северной части Manhattan Island, представляет собою типичный ледниковый ландшафт с бараньими лбами (Rundhöcker). Впадины этого ландшафта заполнены или небольшими озерами, или же отложениями торфа небольшой мощности. Меньшая, южная, часть острова при отступании ледника была покрыта слоем флювио-гляциальных осадков крайне неравномерного состава; общая мощность слоев не превышает 30 м. Как мощность, так и величина зерен и плотность залегания этих флювио-гляциальных осадков крайне непостоянны. Местами среди слоев глины и слоев более крупных песков и галек встречаются прослойки чрезвычайно мелкозернистого однородного рыхлого песка (Quicksand). Поверхность этого флювио-гляциального отложения повидимому первоначально была неровной, с холмами до 30 м высоты<sup>2</sup>. Валуны, окруженные мелкозернистыми осадками, вероятно приплыли на плавучих льдинах в те

---

<sup>1</sup> New York Folio, U. S. Geological Survey. См. также: Ch. P. Berkeley. Areal and Structural Geology of Southern Manhattan Island. Annals of the New York Academy of Sciences, vol. XIX, № 11, Part II, pp. 247 — 282. April, 1910, а также: Ch. P. Berkeley and J. R. Healy. The Geology of New York City and its relation of Engineering Problems. The Municipal engineers of the City of New York. Proceedings for 1911.

<sup>2</sup> I. Cozzens. A geological history of Manhattan or New York Island. New York, 1843.

места, где они сейчас находятся; у подошвы отложений местами встречается донная морена.

Долины, ограничивающие с обеих сторон Manhattan Island в черте города, повидимому приурочены к тектоническим зонам нарушения (сбросовые трещины). Когда поверхность земли опустилась примерно на 60 м (время этого опускания пока еще не удалось определить с достоверностью), долины рек Гудзон и East River превратились в глубокие лиманы, в которых после того осаждались лишь мелкозернистые осадки (пылевидные грунты и ил).

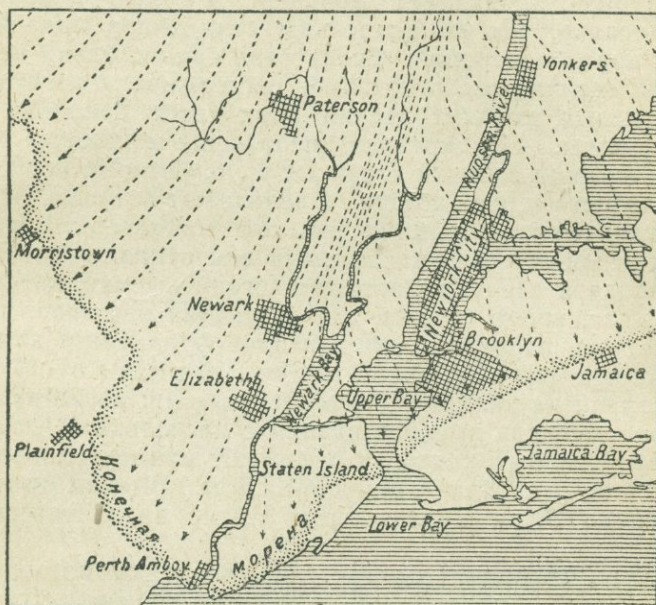


Рис. 52. Направление движения ледникового покрова в районе г. Нью-Йорка (по U. S. Geological Survey, New-York Folio).

По мере развития города площадь острова, так же как и полосу берега в соседнем районе материка, постепенно расширяли при помощи искусственных насыпей, лежащих большей частью на суглинистых и илстых отложениях лиманов. Поэтому строительный грунт Нью-Йорка состоит из следующих главных типов: в северной части Manhattan Island коренная гладко вышлифованная ледником порода, местами тонкий покров донной морены или болотистой почвы. В южной части флювио-гляциальные отложения со свойствами, меняющимися в горизонтальном и вертикальном направлениях, состоящие главным образом из мелкого и крупного песка. В районе берегов искусственные насыпи, которые расположены на мягких пылевидных грунтах и иле.

Деловой квартал с известными всем небоскребами, имеющими до 60 этажей, находится на южном конце острова, в области распространения флювио-гляциальных отложений и окружен жилыми кварталами более бедной части городского населения. Нагрузка

флювио-гляциальных отложений, допускаемая законом, колеблется в зависимости от местных условий между 1 и 4 кг на  $см^2$ . Новая постройка двадцатиэтажного здания в Downton District (южная оконечность Manhattan), недалеко от Woolworth Building, была основана на уширенных фундаментах. Глубина фундаментов равнялась 6 м. Грунт состоял из почти плотного песка и был нагружен 4 кг на 1  $см^2$ . Здание осело равномерно на 4,5 см, величину незначительную. В качестве явлений, сопровождающих это оседание, у соседних семиэтажных домов с фундаментами, заложенными на той же глубине, появилась меньшая, но зато неравномерная и вредная осадка, так что владельцы этих домов подали жалобу на хозяина новой постройки. Вследствие сравнительно небольшой способности ледниковых отложений выдерживать нагрузку, фундаменты тяжелых высоких зданий приходится доводить вниз до коренной породы. На окраинах (небольшая мощность) это часто делают при помощи забивки стальных труб, которые после забивки выдувают дочиста струей воздуха и заполняют бетоном. В деловом квартале, где толщина рыхлых наносов достигает 20 м и более, пользуются исключительно кессонными основаниями (Druckluftgründung). Благодаря введению автоматической выемки материала по способу Могап время, нужное для опускания кессонов, настолько сократилось, что, например, при закладке фундамента для Knickerbocker Buildings (27 кессонов, глубина закладки от 15 до 20 м) затрата времени на каждый кессон не превышала 28 часов. При закладке фундаментов высоких зданий с несколькими подземными этажами строительный котлован окружают прямоугольными кессонами длиной от 5 до 8 м и шириной 1,8 м. Выемка промежутков шириной около 30 см производится также пневматическим способом.

Устройство широких выемок для постройки новых участков подземной дороги (Subway) еще и теперь производится при помощи открытого водоотлива. В связи с ростом Subway развилось до высокой степени совершенства искусство укреплять снизу (Unterfangung) фундаменты, так что повреждения соседних зданий случаются только в виде редких исключений, несмотря на неоднородные свойства строительных грунтов в выемках. По системе Pretest Whitl подведенные снизу сваи (Unterfangspfeiler) находятся под давлением гидравлического пресса, равным той нагрузке, которую они должны будут выдерживать впоследствии, а промежуточную кирпичную стенку возводят, пока сваи находятся под давлением. Благодаря этому исключается оседание, которое могло бы возникнуть вследствие упругого сжатия грунта<sup>1</sup>.

Проведение туннеля под рекой East Пенсильванской жел. дор. оказалось очень труднительным. Так как древнее дно долины находится на слишком большой глубине, туннель пришлось прокладывать в молодых отложениях пылевидных грунтов и ила, из которых состоят отложения долины. Постройка производится пневматическим способом. Туннель East-River Пенсильванской жел. дороги имеет в длину 1200 м, круговое сечение с диаметром в 6,9 м, и рельсы

<sup>1</sup> L. White and E. A. Prentis. Modern Underpinning. 2-d ed., New York. Joh. Willey, 1928.

находятся на самом глубоком месте на 27 м ниже уровня воды. Во время прокладки через мягкий материал туннель местами деформировался или отклонялся от своего направления вследствие движения окружающего материала. Исправление дефектов производилось частью пневматическим способом, частью способом замораживания. Вынутый материал назван в опубликованных сообщениях пльвуном, однако он имеет характер чрезвычайно рыхлого пылевидного грунта (Schluff) с органическими примесями<sup>1</sup>. Типичная проба, взятая из стенки одного из туннелей, недалеко от трубы туннеля, по Terzaghi, обладает следующими свойствами: цвет (в мокром) состоянии темно-зелено-серый, предел текучести 49, предел пластичности 32, содержание воды 62% (сухого вещества), класс набухания 3, класс проницаемости VI, содержание углерода 1,5%, следовательно эта порода относится, согласно рис. 17 (стр. 65), к категории пылевидных грунтов (Schluff). Из кривой распределения рис. 44f можно получить, что этот материал очевидно состоит из: настоящего пльвуна с коэффициентом неоднородности 1,5, и материала с действующей величиной зерна 0,04 мм, который превратился в темный слабо-пластичный иловатый пылевидный суглинок, благодаря смешению с мельчайшими составными частями почвы и органическим материалом. Так как содержание воды на 13% выше предела текучести, вскрытый материал очевидно находился в состоянии вязкой жидкости, и наблюдаемые явления не представляют собой ничего удивительного. На многих участках Гудзон-туннеля не пришлось производить вообще никаких работ по выемке породы. Достаточно было выжимать в стороны вязкий ил, вдавливая вперед замкнутый со всех сторон щит, подобно тому как происходит вдавливание сваи. Расстояние, пройденное при этом щитом за один день, равнялось от 12 до 15 м. В немного более твердом грунте во время вдавливания щита материал вытекал через проделанные в щите отверстия, прямо в приготовленные для этого бады. При применении первого способа русло реки поднялось над туннелем на 2,1 м, при втором способе примерно на 0,9 м. При продвижении с замкнутым щитом ось туннеля отклонялась кверху, при продвижении с полуоткрытым щитом — ось отклонялась книзу. Знание этих зависимостей позволяло исправлять отклонения от проектированного направления.

Затруднения, которые могут возникнуть при постройке туннеля в скалистом грунте в черте города, будут описаны при описании Astoria-туннеля.

Вследствие мягкости речных пылевидных суглинков и ила в тех местах, где ил был искусственно засыпан для увеличения площади застройки, тоже господствуют самые неблагоприятные

---

<sup>1</sup> The East River Tunnel for the New York City Terminus of the Pennsylvania and Long Island Rr. Enging. Record, II, p. 11, 29, 32, 66, 97, 572, 1906. — New York Tunnel Extension of the Pennsylvania Ra., Trans. Am. Soc. C. E. vol. LXVIII. Sept., 1910. — Ch. M. Jacobs. The Nord River Division. — A. Noble. The East River Division. — Lavis. E. The Bergen Hill Tunnels. — B. H. M. Hewett and W. L. Brown. The North River Tunnels. — J. H. Brace and F. Mason. The Crosstown Tunnels. — J. H. Brace, F. Mason and S. H. Woodard. The East River Tunnels, Trans. Am. Soc. C. E., vol. LXIX. Oct., 1910.

условия для закладки фундаментов, какие только можно придумать. В одной мелкой искусственно-засыпанной бухте (Flushing Creek) строился бетонный фундамент для сигнальной башни с площадью основания в 10,5 на 7,5 м. Он опирался на 120 свай длиной от 9 до 12 м. Когда еще до постройки башни фундамент был окружен насыпью 3,5 м высотой, то он разломился на отдельные части, которые осели неодинаково и сместились относительно друг друга. На поверхности около края откоса насыпи образовался земляной вал около 1 м, прорезанный продольными трещинами.

Участок подвесной дороги, идущей вкось через бухту, устой которой покоятся на сваях длиной в 21 м, вполне способных выдерживать нагрузку, испытывает точно так же вредные смещения с появлением трещин при каждом изменении нагрузки грунта, происходящем по соседству.

Подводный холмистый (друмлинный) ландшафт ледниковых и современных пресноводных отложений (Бостон, Mass.)<sup>1</sup>. Характер ландшафта Бостона и Cambridge выработался в течении периода последнего (Висконсинского) оледенения и после него. Местность покрыта друмлинами, между которыми отлагались более молодые образования разнообразной мощности, при условиях осадения, местами сильно отличных друг от друга. Внешняя гавань длиной около 15 км, шириной 10 км включает большое число островов, сильно оживляющих картину гавани; почти все эти острова представляют собой верхнюю часть друмлины, обточенную прибоем. Друмлины (Beacon Hill), на котором стоит старейшая часть города, тоже первоначально был островом, соединенным только узкой и низкой пересыпью с суши; только с течением десятилетий он стал частью суши, после устройства широкой искусственной насыпи, состоящей большей частью из ила и мелкого песка и сооруженной при помощи землечерпательных машин.

Так как краевая часть ледников отступала в черте города быстрее, чем к западу и востоку от нее, то талые воды, не имевшие выхода на юг из-за находившегося там моренного вала, собрались в озеро (Lake Shawmut), уровень которого был примерно на 20 м выше уровня моря. В этом водоеме отложились бледно-синие слабо пластичные ледниковые глины, покрывающие донную морену на большей части площади, занятой городом. Тонкие прослойки донной морены, подстилаемые глиной, которые встречаются местами, указывают на промежуточные наступания ледника. Когда воды озера Shawmut нашли себе выход, то водяные потоки промыли свои долины в еще мягкой глине. Наиболее высоко лежащие части пластов глины находились в этой стадии над уровнем воды и благодаря испарению с поверхности приняли более твердую консистенцию (образование корок, см. стр. 133), местами даже окислению. Части, залегавшие на большой глубине, сохранили свою

<sup>1</sup> W. O. Crosby. A study of the Geology of the Charles River Estuary and Boston Harbor. Technology Quarterly, vol. XVI, p. 2, June, 1903.—B. K. Emerson. Geology of Massachusetts and Rhode Island. U. S. Geological Survey Bulletin, p. 597, 1917.—W. C. Alden. The Physical features of Central Massachusetts, U. S. Geological Survey Bulletin, p. 760, 1925.

мягкую консистенцию. Во время последовавшего затем опускания суши потоки воды оставляли на поверхности слоя глины свои отложения песка и галечника. Мощность этого пласта меняется в разных местах неодинаково. Залегание на поверхности галечника всегда связано с понижениями поверхности глины, потому что мягкая глина выдавливалась в стороны под влиянием концентрированной нагрузки галечника.

При дальнейшем ходе процесса опускания поверхности земли прекратилось и образование наноса из песка и глины, и пласты песка и галечника в свою очередь были погребены под покровом мелкопесчанистого черноватого пылевидного суглинка с обильными органическими примесями, мощность которого колеблется от 0,6 до 7,5 м в зависимости от местности. Всюду, где только поверхность ила достигала уровня воды, в нём появлялись торфообразующие растения. Так как пласты торфа местами находятся на значительной глубине ниже уровня моря, то повидимому ландшафт с тех пор еще опустился. В качестве самого юного члена в этой последовательности пластов к ним присоединились еще искусственные насыпи, благодаря которым значительная часть современной площади города была отвоєвана у мелких морских заливов.

Донная морена вместе с друмлинами образует прекрасный строительный грунт и, как правило, подвергается нагрузке в 10 кг на 1 см<sup>2</sup>. Пылевидный суглинок, ил и искусственные насыпи, лежащие на них, в качестве строительного грунта в рассмотрение не входят. Поэтому на насыпанных площадях фундамент нужно опускать через эти насыпи или до песка, или же при отсутствии такового до глины. В зависимости от глубины залегания, способного выдержать нагрузку пласта, здание ставят или на сваях, или же открытыми колодцами доходят до желаемой глубины и в забое этих колодцев выкапывают камеры в виде усеченного конуса, которые заполняют бетоном (бетонные массивы, Gow). В виде исключения применяются и кессонные работы.

Пробы глины, взятые из буровых скважин в Cambridge на глубине от 10 до 30 м, показали, по Terzaghi, следующие свойства: предел текучести от 42 до 50, предел пластичности от 20 до 27, среднее 22. Хотя судя по этим цифрам качество материала и оказалось замечательно однородным, сопротивляемость давлению (консистенция) для тех же разрезов почвы дала значительные колебания, почти не зависящие от глубины залегания (от 0,5 до 2,5 кг на 1 см<sup>2</sup>). В зависимости от консистенции глины строительные законы допускают нагрузки в 5 (для твердой), 4 (для средней) и 2 кг (для мягкой глины) на 1 см<sup>2</sup>.

Замечателен тот факт, что часть города (рис. 53), расположенная на мягкой глине (юго-восточная часть Cambridge, омываемая рекой Charles River по излучине около 4 км длины), с течением времени неравномерно оседает на значительную величину. Рис. 54 изображает продольный разрез через одну из главных улиц Cambridge, а также оседания, которые произошли на этом участке с 1869 г. <sup>1</sup>. Это оседание можно с большой вероятностью отнести к уменьше-

<sup>1</sup> F. H. Carter. Progressive subsidence near Main-Street, Cambridge, Mass. and the design of the Main-Street Subway. Enging. News, 11, vol. 64, p. 246, 1910.

нию объема вследствие выжимания воды, которое перенесла глина под влиянием веса вновь выстроенных зданий города. К этому присоединяется еще то обстоятельство, что глина повидимому находится в состоянии неполного затвердения, и поэтому и под влиянием одного собственного веса она могла осесть на величину, составляющую некоторую долю действительно происшедшего оседания. Независимо от общего оседания строительного грунта, от-

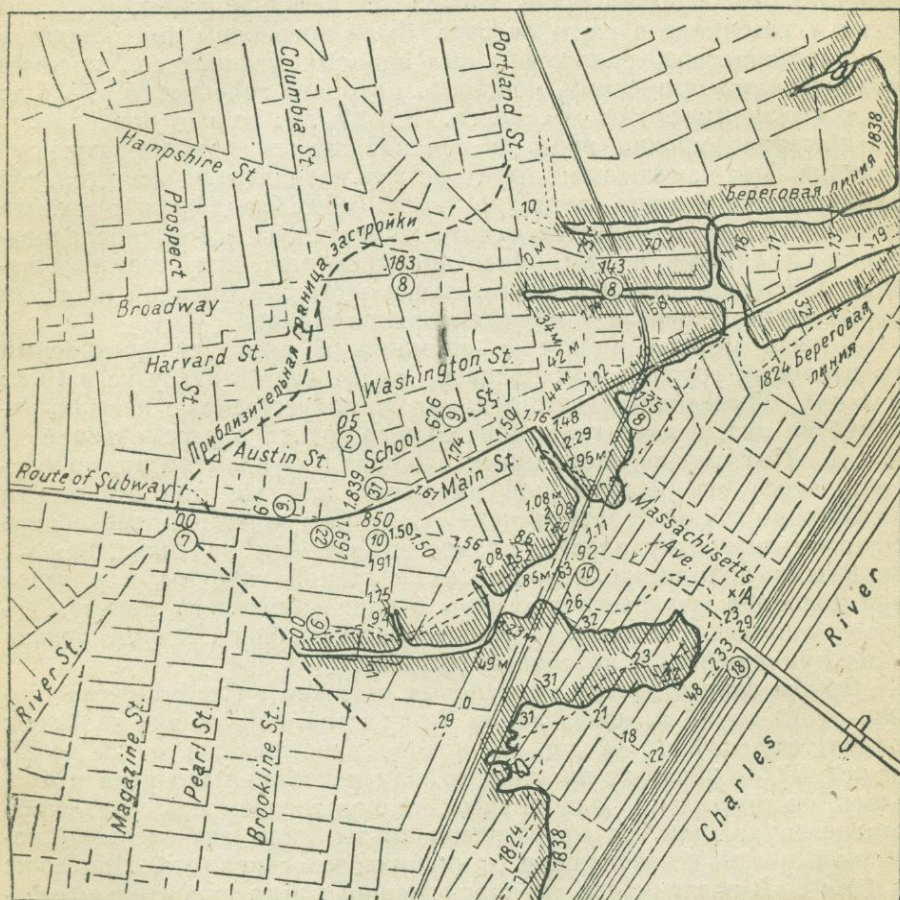


Рис. 53. План расположения города Кэмбридж, Масс. (по Гартеру).

дельные, особенно тяжелые постройки испытывают добавочные осадки, которые при данных условиях можно устранить только дорого стоящими фундаментами, доведенными до коренной породы, которые нужно принимать в расчет при конструктивной разработке сооружений. При одной монументальной постройке, занимающей большую площадь и основанной на сваях, находящейся в А (рис. 53), нагрузка отдельных свай была рассчитана на основании многочисленных опытов таким образом, чтобы ни одна из свай при соответствующей ей максимальной нагрузке не опускалась

более чем на 2 мм. Тем не менее здание осело за десять лет на величину в пределах между 2,5 и 20 см. На месте постройки поверхность глины находится на глубине от 4 до 10 м, и мощность пласта песка, залегающего под глиной, колеблется между 0,7 и 8 м. Высота искусственной насыпи, состоящей из пылевидного суглинка и ила, равняется от 2 до 6 м. Вес здания исчисляется в 0,9 до 1,1 кг на 1 см<sup>2</sup> застроенной площади. Пол подвального этажа находится на 2,5 м ниже поверхности земли. В зависимости от толщины пласта песка, способного выдерживать нагрузку, сваи заби-

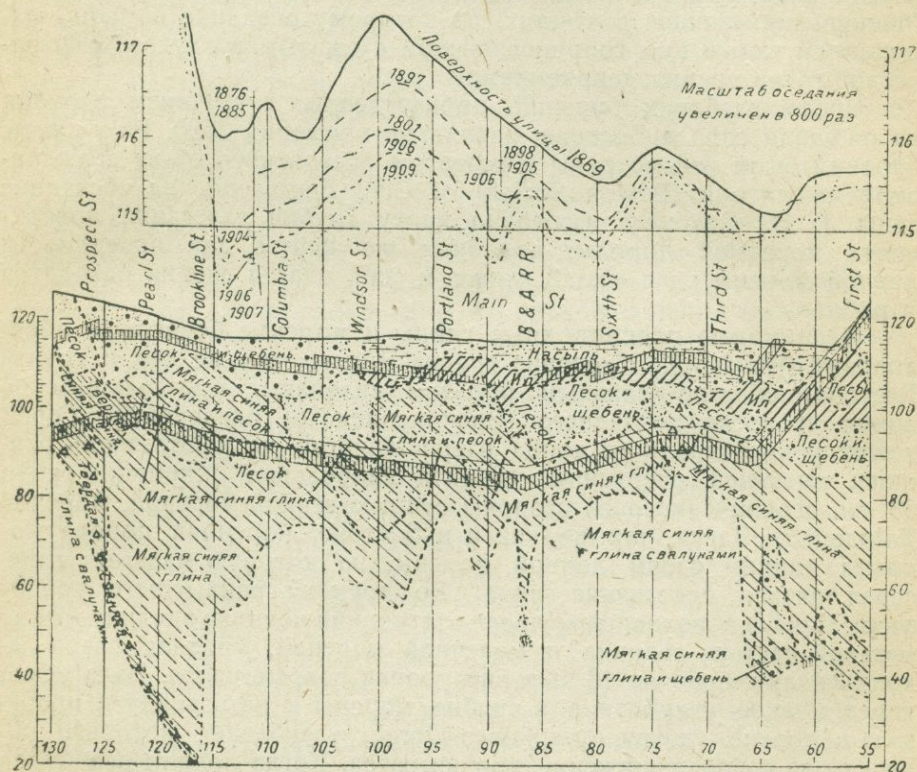


Рис. 54. Разрез вдоль улицы Main Street в Кембридже, Масс. (по Гартеру).

вались или в песок (короткие сваи, от 6 до 8 м), или же через песок в мягкую глину (длинные сваи, от 12 до 15 м). Самое большое оседание получилось в некоторой зоне, имеющей очертания полосы, на которой мощность пласта песка минимальная, а высота искусственной насыпи максимальная (старое русло ручья). Оседание вероятно следует отнести по большей части за счет потери воды вследствие увеличения давления и в меньшей части за счет выжимания в стороны.

При постройке туннеля East-Boston, по которому городская подземная дорога проходит под заливом, находящимся между Boston и East-Boston, пришлось также пройти довольно большое расстояние в мягкой синей глине. Соседние здания, оседание которых вызвано

постройкой туннеля, были расположены на расстоянии 25 м от временного портала туннеля. Осадка зданий произошла несмотря на то, что проходка туннеля производилась пневматическим способом. В той же части города появились вредные явления оседания, когда по соседству с существующими уже зданиями стали опускать пневматические кессоны для фундамента среднего крыла здания таможни. В этих случаях дело было конечно не в изменении содержания воды, а в пластическом изменении формы глины, находящейся под давлением фундаментов соседних строений. Сжатый воздух компенсировал вес воды, но не вес глины и построек. Мнение, высказанное в отчетах, по которому оседание вызвано высыханием глины при соприкосновении с сжатым воздухом, с физической точки зрения неприемлемо<sup>1</sup>.

Число глубоких бурений, произведенных с течением времени на площади города Бостона, равняется примерно 2500. Результаты бурений были рассмотрены Комитетом бостонского об-ва гражданских инженеров (Boston Society of Civil Engineers). За последние годы J. V. Crosby изготовил карту глубин залегания поверхности коренной породы; подобные же карты для поверхности донной морены, для синей глины и для пласта щебня находятся в работе.

Ледниковые пресноводные глины и морские береговые образования (Чикаго)<sup>2</sup>. Строение грунта Чикаго, так же как и грунта Бостона, обязано главным образом явлениям, протекавшим во время и после последнего (Висконсинского) оледенения. Город лежит у юго-западного конца озера Мичиган на прибрежной равнине, имеющей очертания сегмента наибольшей шириной около 30 км, ограниченного со стороны суши конечной мореной, мореной Valparaiso. Здесь, так же как и в Бостоне, коренная порода покрыта тонким слоем донной морены, на которую налегает синесерая вязкая пластичная глина. Во времена наивысшего уровня озера Чикаго, заполнявшего после отступления ледника впадину между краевой частью ледника и конечной мореной, уровень озера находился примерно на 18 м выше уровня современного. Вода текла через мелкое углубление в гребне морены к юго-западу и прорезала в морене ущелье Desplaines Gorge, углубление которого повлекло за собой понижение уровня озера. Когда ледник освободил и местность, лежащую к северу от современного озера, то воды озера нашли на севере другой выход, лежавший ниже ущелья Desplaines Gorge, вследствие чего это последнее высохло. Только в последнее время при постройке Чикагского дренажного канала небольшую часть вод озера искусственно отвели через старую брешь на юг.

Единственная разница между строением грунта в Чикаго и в Бостоне состоит в том, что пески и галька, налегающие на поверхность глины в Чикаго, отложены не реками, а были вымыты из донной морены и перенесены на юг, где они и скопились в виде

---

<sup>1</sup> J. R. Worcester. Boston Foundations. Journal Boston Soc. of Civ. Eng. January, 1914, vol. I, p. I. Прения Ch-R-Gow.

<sup>2</sup> J. W. Goldthwait. Physical Features of the Desplaines Valley, Illinois State Geological Survey, Bulletin 11.

отмели, остатки которой, вообще говоря, прослеживаются вдоль восточного края береговой равнины. Между отмелью и донной мореной грунт состоит главным образом из глины, поверхностью которой местами покрыта торфом и более юными культурными слоями. Деловой квартал Чикаго вместе с 50-этажными зданиями административных учреждений Chicago Tribune расположен на берегу, на рукаве Chicago River и сложен исключительно глиной.

В области отмели условия закладки фундаментов сравнительно благоприятны; подошвы фундаментов ставят или прямо на песок, или же на свайные ростверки. Для тяжелых зданий пользуются также методом неглубоких колодцев по системе Gow. Так как в разных частях отмели песок залегаet неодинаково плотно, то строительные законы предусматривают для песка различные допустимые нагрузки. Они лежат в пределах от 1,5 до 2,5 кг на 1 см<sup>2</sup>. На стр. 126 приведен пример затруднений, возникающих при закладке фундаментов, при неожиданном местном изменении плотности залегания песка. Гораздо менее благоприятно складываются условия в области распространения глины. Верхняя кора, толщиной от 2 до 3 м, по наблюдениям очень твердая (кора высухания). Под этим слоем вниз до донной морены консистенция значительно мягче и пavidимому почти не зависит от глубины. Более старые постройки Чикаго основаны при нагрузке грунта от 4 до 7,5 кг на 1 см<sup>2</sup>. Так как эти постройки сильно и неравномерно осели на величину, доходящую до нескольких дециметров, фундаменты стали делать на подушках (Plattengründung) и уменьшили нагрузку строительного грунта до 1,75 и 1,0 кг на 1 см<sup>2</sup>. Однако и такие фундаменты осели с течением времени на величину до 50 см и более. Поэтому появился обычай основывать тяжелые здания на коренной породе, проходя сквозь пласт глины. Обыкновенно основания устраивают в шахтах круглого сечения, обшитых досками в 3" толщиной и длиной в 1,5 до 1,8 м. Венцы (Gevierte) этой обшивки шахт состоят из железных колец. Шахты копают с большим искусством совершенно круглыми, так что горбыли (доски) плотно прилегают к их стенкам. В последнее время делаются опыты замены копания шахт вручную машинной работой. В тех местах, где в глине попадаются гнезда пльвуна или где пласт донной морены между глиной и коренной породой сильно водопроницаем, углубление шурфов идет пневматическим способом. Глубина шахт меняется в зависимости от мощности пласта глины и местами доходит до 300 м. Легкие здания теперь, как и раньше, строят на неглубоких фундаментах, причем по закону глину можно нагружать от 1,75 до 2,5 кг на 1 см<sup>2</sup>.

Так как во многих местах очень трудно прорыть донную морену, чтобы добраться до коренной породы, то в таких местах удалось значительно удешевить работы по закладке фундаментов тем, что фундамент опускали только до поверхности донной морены. Согласно официальным предписаниям Чикаго, допустимая нагрузка донной морены равняется только 3 кг на 1 см<sup>2</sup>. Чтобы получить для фундамента новой постройки Chicago Union Terminal Co более высокую допустимую нагрузку, строители произвели пробные нагрузки для двух цилиндрических устоев глубиной в 20 м и диа-

метром в 1,3 и 2,6 м соответственно. Оседание равнялось при нагрузке в 10 кг на 1 см<sup>2</sup> всего 3 и 16 мм соответственно<sup>1</sup>.

Пойменные глины в области дельты (Нью-Орлеан)<sup>2</sup>. Более старые части города вместе с деловым кварталом окружены полукруглой излучиной р. Миссисипи длиной около 8 км. Ширина реки около 600 м, глубина местами до 50 м. Город постепенно растянулся к северу до берегов мелкой лагуны Pontchartrain. Средний уровень улиц находится примерно на высоте среднего уровня низких грунтовых вод и на 5 м ниже уровня высоких грунтовых вод. Поэтому в черте города приходится искусственным путем поддерживать уровень грунтовых вод ниже уровня улиц, при помощи системы откачивающих установок.

Грунт состоит до глубины нескольких сот метров из отложений дельты р. Миссисипи. Сверху находится слой грунта, не очень хорошо выдерживающий нагрузку, состоящий из вязкого ила (Schlick) мелкого песка и болотных осадков (Cyrus Swamps). Когда буровая пройдет этот слой, она попадает в мощные отложения, состоящие из мелких светлых песков и из серо-синих упруго-пластичных глин (Gumbo).

В верхних частях этих отложений песок и глина встречаются в виде мощных, довольно резко отграниченных друг от друга пластов, причем в буровой скважине, в зависимости от местности, преобладает или гумбо, или песок. Еще глубже (ниже 100 или 120 м) появляется равномерно-слоистый, сложенный из тонких слоев песка и гумбо вид грунта, в высшей степени способный выдерживать нагрузку. Пробы гумбо, взятые при бурениях для проектируемого моста через Миссисипи на глубине 30, 45 и 75 м, обладали, по Terzaghi, следующими свойствами и характерными цифрами.

Глубина 30 м (дно реки): предел текучести  $F=90$ , предел пластичности  $p=27,8$ , предел усадки 13,2, содержание воды свежей пробы  $W=39,2\%$ , сопротивляемость давлению  $Q=0,45$  кг на 1 см<sup>2</sup>. Цвет темнооливково-зеленый, следы органических примесей.

Глубина 45 и 75 м:  $F$  — от 50,7 до 52,3,  $p$  — от 19,0 до 23,0,  $W$  — от 23,0 до 27,7, сопротивляемость давлению — от 2,3 до 2,7 кг на 1 см<sup>2</sup>. Цвет — темносеро-синий.

Пласты гумбо, залегающие в черте города на умеренных глубинах, слабо пластичны и пронизаны мелкими трубочками от корней растений и плоскостями наслоения („buckshot“), т. е. повидому являются пойменными осадками. Благодаря этому благоприятному обстоятельству в черте города Новый Орлеан можно устроить и для тяжелых зданий фундаменты, лучше выдерживающие нагрузку, чем в области распространения ледниковых глин в Чикаго или Бостоне. Многоэтажные казенные здания все без исключения снабжены фундаментом, устроенным на сваях. Так, например, четырнадцатипятиэтажное здание Hibernia с его средним двадцатипятиэтажным флигелем стоит на железобетонной подушке, которая в свою оче-

<sup>1</sup> D'Esposito в „Journal of the Western Society of Engineers“, Februar, 1924.

<sup>2</sup> По устным сообщениям J. F. Coleman, A. M. Shaw, а также по неупомянутой экспертизе Terzaghi.

редь опирается на сваи длиной в 15 м. Нагрузка на каждую сваю равняется 18 т (предельная нагрузка 60 т). Здание осело в общей сложности на 4,5 см и уже примерно через шесть лет совершенно успокоилось. При забивке свай на расстояниях в 75 см друг от друга следует считаться со вспучиванием грунта на 90 до 120 см, откуда можно сделать вывод, что грунт залегает очень плотно и что глина практически не сжимается. Плохая слава, которой пользуется строительный грунт Нового Орлеана, пошла с того времени, когда здания в этом городе основывались на фундаментах, опиравшихся на верхний пласт, плохо выдерживающий нагрузку.

**Мелкозернистые дельтовые образования (Шанхай)**<sup>1</sup>. В качестве противоположности Новому Орлеану приведем условия закладки фундаментов, с которыми приходится считаться инженеру в Шанхае. Грунт состоит до глубины от 30 до 70 м главным образом из глины с прослоями или гнездообразными включениями мелкого песка или пылевидного суглинка. Ниже глины идут перемежающиеся пласты галечника, песка, пылевидных суглинков и глины, сменяющих друг друга неожиданным образом. Коренная порода не было достигнута даже буровой скважиной Bubbling Well, глубиной в 130 м. На этой глубине бур, пройдя очень мелкозернистый пласт серого песка, застрял в вязкой пластичной глине.

В отличие от Нового Орлеана Шанхай находится не на границе далеко продвинутой вперед дельты со стороны суши, а в области краевых дельтовых отложений. Рукав р. Jangtse, впадающий в Желтое море на расстоянии около 9 км от города, в этом месте достигает уже ширины около 16 км. Самый город лежит на западном берегу маленького бокового притока, р. Whangpoo, впадающего к северу от Шанхая в Jangtse. Поверхность улиц Шанхая в среднем лежит на 0,9 м выше уровня высокой воды Whangpoo River, а грунтовая вода находится на глубине 2,5 м ниже поверхности улиц. Тяжелые здания опираются или на продольные железобетонные подушки (допустимая нагрузка 0,75 кг на 1 см<sup>2</sup>), или же покоятся на свайных ростверках.

Способность отдельных свай выдерживать нагрузку и влияние формы и длины свай на способность выдерживать нагрузку были исследованы инженерами Whangpoo Conservancy District достойным подражания образом при помощи большого числа испытаний. По испытаниям, произведенным над сваями длиной от 3 до 9 м в Pheasant Point на берегу р. Jangtse к северу от Шанхая, боковое трение, вызванное попытками вытаскивания круглых конических деревянных свай, равнялось в среднем 2,5 т, а для несущихся четырехгранных свай 1,8 т на 1 м<sup>2</sup>. Грунт состоял из коричневатожелтой смеси чрезвычайно мелкого песка и ила. Для проб, взятых на глубине 3 м ниже поверхности, по Terzaghi, получились почти одинаковые пределы текучести и пластичности, равные 28.

Испытания свай в Chang Hua Pang дали для предельной

---

<sup>1</sup> Whangpoo Conservancy Board, S. H. I. Series I, № 7. Various reports to the Engineer in Chief on Special Investigations. Shanghai, 1921, а также письменные сообщения Herbert Chatley и F. H. R. Hansen. Испытания грунта произведены K. Terzaghi и F. S. Tsai.

нагрузки, отнесенной к  $1 \text{ м}^2$  площади свай, значения от 2,9 до 4,8  $t$  на  $1 \text{ м}^2$  (круглые, конические) и от 2,0 до 3,65  $t$  на  $1 \text{ м}^2$  (четырёхгранные сваи). Почва в Chang Hua Pang состояла из синей пластичной глины.

Как в Pheasant Point, так и в Chang Hua Pang было установлено, что боковое трение, определенное из опытов вытаскивания свай, равняется примерно 0,8 указанных выше значений. Нагрузка, при которой оседание отдельной сваи достигало 15 мм, в обоих случаях равнялась для круглых конических свай 2,7 и для четырёхгранных 1,4  $t$  на  $1 \text{ м}^2$  поверхности свай. Оседание в 6 мм соответствует нагрузке 1,75 и 1,00  $t$  соответственно на  $1 \text{ м}^2$  (допустимая нагрузка). Следует отметить то обстоятельство, что среднее боковое трение на единицу поверхности всей сваи не увеличивается, а уменьшается с длиной сваи. В причинной связи с этим обстоятельством стоит вероятно и тот факт, что в Шанхае здания значительно оседают даже тогда, когда они стоят на свайном ростверке. Скорость оседания убывает со временем, и через десять—пятнадцать лет после окончания постройки здания обычно совершенно успокаиваются. Часть осадки следует несомненно отнести за счет упругой деформации грунта, потому что уменьшение нагрузки грунта связано, правда с незначительным, поднятием поверхности. При перемещении центра тяжести подвижной нагрузки изменяется и положение площадок фундамента. Другая и более значительная часть осадки однако несомненно вызывается затвердеванием мягкой глины под влиянием давления.

**Обзор.** При попытках сделать сводку из собранных в разных городах наблюдений над закладкой фундаментов бросается в глаза, насколько во всех городах много пробелов в знакомстве с оседаниями, происшедшими на застроенных площадях. В большинстве случаев архитекторы не заботятся о том, чтобы нанести на нижней части своих построек тщательно пронивелированные опорные точки, а в тех случаях, когда из-за появившихся трещин и других повреждений в постройках приходилось производить наблюдения над оседанием, обычно не имеется данных относительно оседаний, происшедших до появления первых трещин. Про те здания, в которых нет трещин, просто говорят, что они не осели.

В качестве разительного примера размеров неравномерного оседания, которое при благоприятных обстоятельствах может выдержать постройка без образования трещин, приведем здание заведения Монтанистской высшей школы в Mexico City, у которого разность между оседанием середины и концов равняется почти 1 м (рис. 55). Абсолютная величина оседания неизвестна. Дом был построен 200 лет тому назад, грунт состоит из мелкозернистого вулканического пепла, отложившегося в морском бассейне. Пока городские строительные управления не возьмут в свои руки наблюдения над оседаниями сооружений в интересах усовершенствования строительных законов, до тех пор нечего и думать о существенных улучшениях.

При сравнении строительных правил, действующих в разных городах, можно видеть, насколько эти предписания часто бывают произвольны. Они обязаны своим возникновением не основанной на цифровых данных и геологических фактах оценке соотношений,

существующих между причиной и следствием, издержками и прибылью, как это логически можно было бы ожидать; они являются результатом местного исторического развития взглядов, подверженных влиянию различных мнений и течений.

Главы предписаний, относящихся к строительным грунтам, сплошь представляют собой попытку указать предписанный свыше путь для одной из важнейших основ проектирования, не давая себе перед тем труда проверить действие предложенных мероприятий при помощи наблюдений и измерений, с принятой для всех других отраслей техники тщательностью.

В этом отношении поучительно сравнение между Чикаго и Бостоном. Так как развитие Бостона началось с странения донной морены и твердых глин, то первые опыты закладки фундаментов, сделанные на твердой глине, с небольшими изменениями были перенесены в части города, подстилаемые мягкой глиной, и еще сейчас не пришли к признанию того, что в этих частях города приходится затрачивать на фундаменты немного больше капитала, чем в других частях, для того чтобы достигнуть удовлетворительных результатов. В Чикаго начали со слишком больших нагрузок на мягкой глине. Под впечатлением первых неудач впали в другую крайность и, например, при определении допустимой нагрузки для покрытой глиной донной морены и для плотного песка заходят слишком далеко в отношении надежности. В Шанхае допустимая нагрузка сваи равняется около 50%, а в Новом Орлеане только 30% предельной нагрузки. В Вене условия закладки фундаментов необычайно благоприятны. Если там в области распространения менее надежных слоев тем не менее встречаются неудачные фундаменты, то это происходит из-за непринятия в расчет того опыта, который накоплен в больших городах с очень плохими строительными грунтами.

Особенно интересны города, в которых целые городские районы целиком оседают вследствие застройки и может быть отчасти вследствие неполного затвердевания более глубоких слоев грунта (Бостон, Чикаго, Шанхай). Чтобы успешно бороться в хозяйственном отношении с таким положением, требуется, во-первых, статистическая сводка всех оседаний, возникших в данной части города (рис. 54). Далее следовало бы выяснять зависимость между нагрузкой отдельных фундаментов и их оседанием и, наконец, выяснить для большого числа типичных единичных случаев зависимость между распределением нагрузок, свойствами строительного грунта, общим оседанием и разностями между отдельными оседаниями. Только на основании таких данных можно было бы решить что более оправдывается с хозяйственной стороны, изменение ли конструкции фундамента, или же принятие в расчет неравномерного оседания при конструктивной разработке всего здания. Иначе является опасность, что с данным явлением будут бороться неподходящими мероприятиями, как это, например, произошло в истории стро-

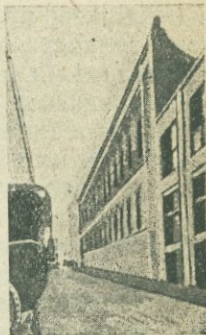


Рис. 55. Осадка Монтанистской высшей школы в Mexico City (фотогр. White).

ительства Чикаго при переходе от отдельных фундаментов к групповому фундаменту. В настоящее время мы почти не имеем данных, чтобы приближенно судить об оседании разных частей зданий, которое можно ожидать при заданном распределении нагрузок и свойствах строительного грунта, и поэтому мы не имеем никакой возможности оценить значение вторичных напряжений, возникающих в отдельных частях конструкции верхних частей здания.

Наконец, следует подчеркнуть еще тесную связь, существующую, согласно содержанию предшествовавших глав, между способностью строительных грунтов выдерживать нагрузки с их геологической историей. Однако при попытке практически оценить эти зависимости данные как геолога, так и инженера оказываются недостаточными.

Данные инженеров недостаточны в виду редкости и малой достоверности наблюдений над явлениями оседания, произведенных над готовыми постройками. Данные геолога оставляют нас неудовлетворенными потому, что надлежащие петрографические исследования осадков можно вести с успехом только в тесной связи с физическими испытаниями ненарушенных буровых проб. Современные методы физического испытания грунтов не нашли еще до сих пор доступа в лабораторию геолога. В качестве примера приведем совершенно недостаточное знакомство со структурой и историей развития дельты Миссисипи и р. Jantgse. Из немногих испытаний, которые мы до сих пор сделали с пробами грунта из этих дельт, и из скудных данных инженеров относительно наблюдаемых явлений оседания можно больше узнать об этих отложениях двух дельт, чем из геологических данных, опубликованных за последние полстолетия. Вероятно существует немного областей, в которых совместная работа геолога и инженера могла бы дать более ценные научные и практические результаты, чем в области изучения несцементированных отложений.

---

При расчете нагрузки на основание плотин значение веса всего сооружения отступает на задний план по сравнению с разнообразным действием воды на основание, возникающим в связи с подпором у плотины. Статистика несчастных случаев показывает повидимому, что наши предсказания относительно условий заложения плотин связаны часто с еще большими ошибками, чем наши предсказания относительно постройки высоких зданий. Кроме того потери капитала и человеческих жизней при прорыве плотин, в среднем, далеко превосходят убытки, проистекающие от ошибок при постройке высоких зданий, поэтому геология оснований плотин заслуживает особого внимания.

Сравнение относительных значений расходов, из которых складывается стоимость плотины, приводит к следующему заключению: дешевле всего обходится геологическое исследование древней истории долины<sup>1</sup>, произведенное опытным специалистом на основании изучения естественных обнажений и существующих уже специальных геологических работ, касающихся местности, окружающей место постройки. Дороже стоит разведочное бурение, но все-таки еще немного, по сравнению с непредвиденными расходами по выемке грунта и возведению тела плотины, возникающими вследствие недостаточных предварительных изысканий. Однако еще дороже обходится уничтожение последствий прорыва. При таких обстоятельствах самые тщательные предварительные изыскания представляются весьма обоснованными и безусловно оправдываются с хозяйственной точки зрения.

## 1. ВЫБОР МЕСТА ПОСТРОЙКИ.

Участки речной долины, годные для возведения проектируемой плотины, определяются обычно чисто техническими и хозяйственными соображениями. Задача геологической экспертизы состоит в том, чтобы найти на указанных участках точку или точки, в которых условия сооружения плотины были бы самые благоприятные. J. Stiny особенно обращает внимание на выяснение падения и простирания пород в месте закладки плотины. Уменьшение падения по направлению долины можно считать благоприятным признаком, потому что при этом облегчается укрепление всего сооружения и утечка воды становится маловероятной. Неблагоприятным же считается крутое падение пластов в сторону одного из берегов долины, особенно при перемежающемся напластовании пород, потому что при этом облегчается фильтрация воды под плотинной,

<sup>1</sup> Прим. ред. Геологическая съемка.

а при перемежающихся твердых и более мягких слоях основание будет обладать неравномерной сжимаемостью.

Если имеется возможность или техническая необходимость заложить фундамент на коренной породе, то задача упрощается в том смысле, что остается указать те места, где толщина несцементированных речных наносов наименьшая. При этом прежде всего выделяют участки, на которых по геологическим соображениям следует ожидать определенно неблагоприятного строения пород. Данные для решения задачи даются геоморфологическим изучением долины. Как только правильно поняты главные черты истории развития системы речной долины, можно уже судить, где следует заложить буровые скважины или шурфы, необходимые для отыскания коренной породы. Результаты, полученные ударным бурением, часто бывают неясными, так как порода при этом разбивается в песок. Поэтому скважины следует бурить колонковым бурением, дающим буровой материал в виде цилиндров (кернов), хотя такое бурение обходится много дороже<sup>1</sup>.

В пределах древнего оледенения условия стока и отложения наносов претерпевали во время и после оледенения столько перемен, что ни по продольному профилю современной долины ни по характеру и склону ее берегов нельзя вывести надежных заключений относительно разреза и глубины несцементированных речных наносов. Чтобы хотя наполовину правильно судить о подпочвенных условиях дайнго участка долины, необходимо изучить отдельные фазы в истории развития всей долины в послеледниковое время.

Поучительные примеры условий, господствующих в Восточных Альпах, можно найти между прочим в работах M. Singer и V. Pollack. Эти авторы обращают особенное внимание на перемещение рек и на изменившиеся вследствие этого подземные условия, причем в большинстве долин этих горных участков нужно рассчитывать на большие глубины оснований. Мощность отложений в долинах ни в коем случае не возрастает закономерно; с удалением от истока она может быть весьма различна в соседних участках долины.

Для долин с менее сложной историей развития условия постройки определяются прочностью пород, а также направлением и характером тектонических зон, которые пересекает долина.

Особенного внимания заслуживают те участки долины реки, на которых направление течения определяется сбросами (тектонически вынужденные участки долины). На таких участках порода может быть на большую глубину ниже основания настолько раздроблена и выветрела, что о закладке плотины не может быть и речи. Район города Нью-Йорка дает поучительные примеры таких зон нарушения (рис. 86).<sup>1</sup>

Ввиду того что реки нередко самым неожиданным образом пересекают такие зоны нарушения, чередуясь с зонами здоровых ненарушенных пород, определение тектонических линий нарушения относится к важнейшим задачам геологической экспертизы. Эта

---

<sup>1</sup> Прим. ред. Механическое колонковое бурение во многих случаях, особенно при бурении в изверженных породах, обходится дешевле ударного и происходит гораздо скорее.

задача решается косвенным путем, при помощи геологической съемки на основании наблюдений на дневной поверхности. В новейшее время пробуют, и повидимому с успехом, применять геофизические методы исследования для определения линий нарушения.

В главе о геологии туннелей указывается, что сбросовые трещины могут быть при некоторых условиях вполне водонепроницаемыми и что на этом основании они с технической точки зрения могут не иметь значения. Вследствие этого присутствие сбросовой трещины должно лишь указывать на необходимость самого тщательного исследования характера пород при помощи колонкового бурения.

В дальнейших рассуждениях мы примем, что на основании геоморфологических данных оказалось технически и хозяйственно возможным достигнуть коренной породы. Тогда следующая задача будет состоять в том, чтобы дополнить данные, приведенные экспертом, результатами разведочных бурений, идущих не только до коренной породы, но и на большую глубину в самую породу. В верхнем течении рек задача представляется простой. При наносах, состоящих из крупного галечника, достигнуть коренной породы уже труднее и стоит дороже. Чтобы провести буровую скважину на достаточную глубину через галечник, нужно брать обсадную трубу диаметром не меньше 20—25 см. Хуже всего могут оказаться условия на участках долины, лежащих в пределах области древнего оледенения, если попадется нанос, перемешанный с большими валунами твердой породы. Однако и в этом случае, если только дело касается значительного сооружения, следует добраться до коренной породы, хотя бы взрывая отдельные глыбы или применяя тяжелый долотчатый бур с тем, чтобы потом через обсадные трубы ввести колонковый бур. Если пренебречь этой мерой предосторожности, могут возникнуть ошибки, влекущие за собой тяжелые последствия. При прохождении наносов следует обращать внимание на степень водопроницаемости проходимого материала, если только не имеют наперед в виду применять кессонные работы. При коэффициенте проницаемости грунта, равном около 0,5 см в секунду (действующий диаметр зерна около 0,8 мм), осушка строительной выемки при помощи зумпфа представляется по техническим соображениям уже чрезвычайно трудной и дорого стоящей.

Важно, особенно в горной местности, измерить количество тонкого взвешенного и донного крупного материалов, которые несет и откладывает река, если здесь хотя бы возвести плотину или дамбу, так как количество содержащихся в воде этих материалов определяет собой скорость обмеления запруженного бассейна.

## 2. СВОЙСТВА КОРЕННЫХ ПОРОД ОСНОВАНИЯ.

Когда бурением достигнута коренная порода, то первая часть предварительных работ закончена. Вторая часть состоит в опробовании свойств породы. Спротивляемость породы давлению, т. е. ее способность сопротивляться раздавливанию при статическом давлении веса сооружения, можно довольно легко и точно определить по свойствам колонок, полученных бурением.

Важно также условие, чтобы модуль упругости породы <sup>1</sup> был не слишком малым по сравнению с модулем упругости материала тела плотины, иначе в сооружении появляются напряжения, вызванные податливостью грунта, на которые конструктор не рассчитывал.

Так, например, гребни построенных в 1830—1833 гг. плотин Grosbois и Chazilly имели горизонтальные колебания, вызванные изменениями водяного давления на лейасовые глины, пронизанные многочисленными трещинами и слагающие дно водохранилища. Эти колебания привели с течением времени к образованию местных трещин и деформации тела плотины <sup>2</sup>.

Условия будут наиболее неблагоприятными в том случае, когда грунт состоит в горизонтальном направлении из последовательно более твердых и более мягких пород. В этом случае существует опасность, что над границей между разными породами в кладке образуются разрывные трещины <sup>3</sup>. Однако на практике все-таки часто бывает весьма трудно оценить, хотя бы приблизительно, влияние разницы в свойствах пород на существующие в плотине растягивающие усилия и напряжения.

Наконец, в такой же степени трудно судить и об имеющих такое же основное значение для устойчивости и прочности проектируемого сооружения условиях образования трещин и об изменениях, которые может претерпеть порода под влиянием гидрологических условий, созданных благодаря запруде.

Из этих соображений вытекает, насколько важно исследовать подземную часть проектируемых плотин и получить от геологов точный разрез слоев подземной части. Однако составить разрез можно только в том случае, если геолог может бурить разведочные скважины по своему усмотрению. Геологическая экспертиза места закладки плотин без разведочных буровых скважин имеет обычно так же мало цены, как и разведочные скважины, заложенные без научного руководства геолога.

В качестве примера тщательно произведенных геологических изысканий приведем исследования М. Ligeon при постройке запруды Champsy Rougny на Роне, которые нам сообщает Н. Е. Grunet из Базеля.

Ниже Женевы Рона течет по ледниковому щебню Ронского глетчера. На террасах встречаются большие ледниковые валуны, а также обрывки моренной глины, под ними залегают молассовые слои (Molassenschichten), а именно пестрый молассовый мергель и молассовый песчаник. Уже предварительные исследования показали, что молассовых песчаников, на которые должна была опираться плотина, можно достигнуть только кесонными работами. Поэтому

---

<sup>1</sup> Модуль упругости породы вычисляется из данных опыта при раздавливании цилиндрической или кубической пробы породы, путем деления величины давления на единицу поверхности на соответствующую величину сжатия на единицу высоты пробы породы. Как правило, модуль упругости породы, так же как и бетона, немного убывает при увеличении давления.

<sup>2</sup> Annales des ponts et chaussées. III, 1905. См. также: P. Ziegler. Die tatsächlichen Gefahren des Unterdruckes. Zeitschr. f. Bauwesen, S. 408, 1916 и S. 147 и. 670, 1917.

<sup>3</sup> A. Leppla. Die geologischen Voraussetzungen für die Errichtung von Talsperren in Deutschland und die Durchführung geologischer Vorarbeiten bei ihrer Planung. Deutsche Wasserwirtschaft, 2 (19), S. 55—58, 1924.

задача геолога состояла в определении формы и расположения поверхности песчаника. На основании данных, полученных ударным бурением, произведенным под руководством Ligeon, оказалось возможным изобразить эту поверхность достаточно точно, как это видно из приложенного рисунка (рис. 56). Строительные работы подтвердили правильность геологических исследований с точностью до одного дециметра.

Строительные выемки центральной силовой установки находятся в зоне потока грунтовых вод. При предварительных изы-

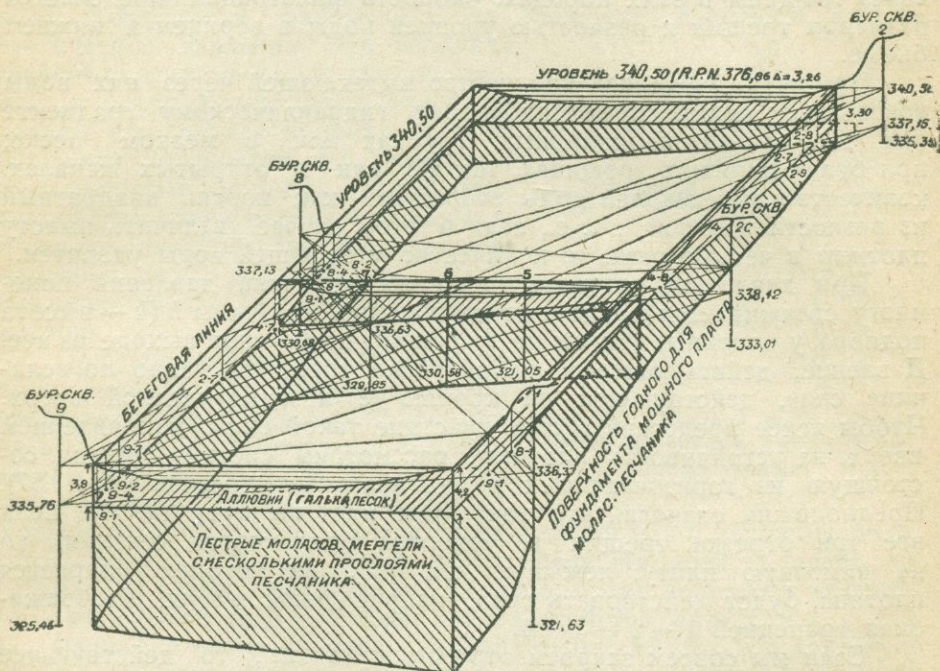


Рис. 56. Сводный геологический профиль, построенный на основании буровых скважин в районе плотины Rougnу-Chancy на р. Роне (по Ligeon).

сканиях требовалось определить проницаемость русла Роны, чтобы на этом основании проектировать сооружение и решить вопрос о креплении котлована. На основании измерений температуры воды в первой пробной выемке с откачкой насосами и на основании определения жесткости воды оказалось возможным доказать, что влияние воды Роны весьма небольшое. Грунтовая вода обладала довольно постоянной средней температурой  $12^{\circ}\text{C}$  и жесткостью 14 французских градусов, тогда как температура воды р. Роны сильно колебалась, а жесткость ее была значительно ниже. Наблюдения позволили также определить коэффициент просачивания по Bligh (см. стр. 192)<sup>1</sup>. Этот коэффициент был важен потому, что на основании его можно было установить, каким образом связать плечи плотины с галечниковой террасой. На основании этого ко-

<sup>1</sup> Прим. ред. Правильнее называть „критический градиент“ — J  
чр.

эффициента просачивания гидравлический градиент оказался равным 1:12. Далее, этим самым были получены и предварительные данные для закладки на грунтовую воду колодца, из которого бралась вода для охлаждения трансформаторов.

Гидрографическое и статическое значение трещиноватых пород. Если исключить пористые доломиты и некоторые песчаники, то все плотные породы можно считать практически водонепроницаемыми. При заложении плотин в твердых коренных породах утечка запруженной воды происходит обычно исключительно через трещины в этих породах. Скорость фильтрации определяется размером трещин и разностью уровней воды в верхнем и нижнем бьефе.

При узких трещинах количество вытекающей через них воды возрастает прямо пропорционально гидравлическому градиенту так же как в капиллярных трубках или в мелком песке; при более широких трещинах, так же как в открытых каналах, количество вытекающей воды возрастает как корень квадратный из разности уровней<sup>1</sup>, т. е., если в этом случае увеличить высоту плотины в четыре раза, то количество утекающей воды удвоится.

При движении воды по трещинам величина давления понемногу сглаживается и падает от наибольшей величины  $h$  ( $h$  — высота подпора у плотины) при входе в трещину до 0 — при выходе из нее. Давление, действующее в любой точке трещины, равно по величине силе, действующей на кровлю её и направленной вверх. Чтобы яснее представить себе действие такой силы, направленной вверх, на устойчивость плотины, рассмотрим систему трещин, состоящую из горизонтальных и вертикальных отрезков (рис. 57). Предположим сначала, что ток воды идет по пути  $aa'b'b'$ . Если все три отрезка трещин в точности одинакового сечения, то на каменную плиту, лежащую над  $a'b'$ , на которую опирается плотина, будет действовать сила, направленная вверх, изображаемая трапецией 1—2—3—4.

Если мы совсем закроем отрезок пути  $aa'$ , то действующее усилие исчезнет. Если же мы, наоборот, закроем отрезок расселины  $bb'$ , то сила возрастет больше чем в два раза, и мы получим линию давления 2'—5. Если мы передвинем трещину  $bb'$  в  $(b)$  ( $b'$ ), то трапеция давлений 1—2—3—4 обратится в 1—2'—(3)—(4). Каменная плита, лежащая между плотиной и точкой  $(b)$ , попадает под действие силы (3')—(4') или (3)—(4), и если она не достаточно прочная, то эта сила может ее нарушить и выбросить вверх. Во всех этих случаях мы имеем дело со значительными величинами давления. При самых тщательных предварительных изысканиях все, что мы можем в лучшем случае установить, это общее направление и приблизительную поглощательную способность самых широких водяных путей. Однако, находят ли главные препятствия течению фильтрационного потока выше или ниже плотины, зависит от случая и остается для нас всегда сокрытым.

Вследствие этого мы никогда не можем знать, выражается ли величина давления ординатами прямой 2—3, 2—(3) или 2'—5, хотя и имеется некоторая вероятность, что линия давления зани-

<sup>1</sup> Прим. ред. По закону Шези  $c = k \sqrt{J}$ .

мает некоторое среднее положение, вроде положения 1—2—3—4 (рис. 57).

На нашем примере мы видим также, что степень прочности двух плотин, выстроенных на породах с одинаковыми свойствами и с похожим расположением трещин, при технически как будто одинаковых условиях, может быть весьма различной. Однако и под одной и той же плотиной величина и распределение действующих сил меняются от сечения к сечению вместе с условиями подземного потока, что может вызвать в теле плотины вторичные напряжения.

Дальнейшая неопределенность касается величины той части всей поверхности фундамента, на которую действует гидростатическое давление. Эта величина зависит от минимального сечения трещин, в которых гидростатическое давление еще может проявиться, и от величины плоскостей, по которым в трещиноватых породах происходит непосредственная передача давления. В местах непосредственной передачи давления сила, действующая вверх, исключается по физическим соображениям.

При современном состоянии наших знаний минимальное сечение трещин, в которых еще может действовать давление, направленное вверх, можно принять равным  $200 \mu$  (одна пятитысячная часть миллиметра). Ходы с таким сечением представляют собой едва заметные волосяные трещины. В еще более узких трещинах вода обладает, согласно Terzaghi, свойствами, гораздо более похожими на свойства аморфного твердого тела, чем на свойства жидкости<sup>1</sup>.

Величина части поверхности фундамента, на которую действует гидростатическое давление, зависит от числа точек приложения этого давления на единицу поверхности, от величины давления, действующего в точке приложения, от модуля упругости соприкасающихся материалов тела плотины и породы, а также от радиуса кривизны соприкасающихся поверхностей. Зависимость между последними величинами установлена известными формулами Негз. Если принять во внимание эти факты, то относительно действия давления, направленного вверх, можно сделать следующие выводы.

Если основание под плотиной состоит из чистого, ничем не связанного песка, то часть поверхности фундамента, подвергающаяся гидростатическому давлению, достигает почти 100% общей поверхности.

При мелкозернистых, обладающих некоторым сцеплением грунтах (пылевидный суглинок, глины), эта часть делается тем меньше, чем больше сцепление. Это соотношение между величиной сцепления грунта и величиной подвергающейся давлению части

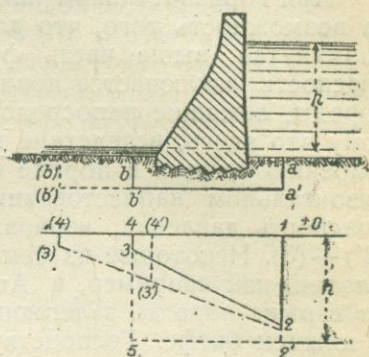


Рис. 57. Влияние гидростатического давления в открытой системе трещин.

<sup>1</sup> Terzaghi. Discussion zu H. de B. Parson. Hydrostatic Uplift in pervious Soils. Proc. Am. Soc. of Civ. Eng. Aug., 1928.

поверхности основания плотины сейчас нельзя еще выразить численно, однако весьма вероятно, что для плотных пластичных глин эта часть меньше 30%.

При неправильно или равномерно трещиноватых породах эта подверженная давлению часть фундамента не должна была бы превышать 30—40%. При неосушенном основании следует считать, что гидростатическое давление на фундамент со стороны верхнего бьефа равно полной высоте подпора, а со стороны нижнего бьефа равно половине высоты подпора. Если же было произведено полное осушение подземной части плотины, то давление со стороны, обращенной вниз по течению, можно принять равным нулю.

При горизонтальном напластовании пород нужно рассчитывать на возможность того, что для целых участков основания плотины упомыная выше часть фундамента достигнет 100%. Главная опасность заключается повидимому в действии давления на части породы, лежащие непосредственно ниже плотины по течению, потому что здесь, вследствие меньшей нагрузки, сопротивление расширению трещин в породе будет наименьшим. Особенно при горизонтальном напластовании пород следует серьезно обсудить опасность давления, изображенного на рис. 57 линией давлений (3')—(3). Некоторые из самых тяжелых по последствиям прорывы плотин, как например, в Austin, Texas, произошли, повидимому, от взрыва породы, залегающей у самого подножия стенки плотины в нижнем бьефе. Господствующую в Соединенных Штатах привычку считать, независимо от каких-либо местных геологических условий, что подвергающаяся давлению часть основания равняется одной трети всей поверхности, при горизонтальном напластовании следует назвать ошибочной.

**Исследование условий трещиноватости пород и искусственное заполнение трещин.** При этом исследовании пригодны те же соображения, которые приведены в главе „Геология туннелей“. Гидрологические условия, которые можно ожидать при постройке туннелей, удастся предсказать лишь в общих чертах, даже после основательного изучения геологического строения, и самый сильный приток воды иногда происходит в таких местах, которые в тектоническом отношении ничем не выделялись. Совершенно сухие участки туннелей считаются при глубоко заложенных туннелях редкостью, из чего можно заключить, насколько вообще распространена трещиноватость пород. Эти замечания можно полностью перенести на условия просачивания, которые можно ожидать в области проектируемых заград, с тем ограничением, что по тальвегу долин к нормальным трещинам в породах присоединяется еще разрыхление вследствие местного уменьшения нагрузки.

Подшвы и склоны долин представляют собою участки возвышенностей, находившиеся до размыва долины рекой под тяжестью лежавших на них пород и в пределах почти постоянной температуры. Изменение условий давления и температуры приводит к взаимному смещению глыб породы, ограниченных трещинами, и к разрыхлению структуры (рис. 58). Часто бывает также, что отдельные пласты тонкослоистого известняка отделены друг от друга прослойками мергеля. Коэффициент расширения многих мергелей больше чем известняка. Если нагрузка на эту систему пластов

уменьшается, то при переменной мощности прослоев мергеля может произойти изображенное на рис. 59 расслоение.

Вызванное местным уменьшением нагрузки и колебаниями температуры разрыхление породы естественно ограничено соседними участками, где нагрузка оставалась постоянной.

Если трещиноватость породы продолжается равномерно на большие глубины, то искусственное заполнение трещин в породе, доведенное до глубины 15 или 20 м, будет иметь лишь скромное влияние на общее количество просачивающейся воды. В большинстве же случаев, встречающихся на практике, однако удается такими приемами искусственного заполнения трещин довести потери на просачивание до небольшой величины.

Само собой понятно, что на основании результатов геологической съемки местности можно лишь очень грубо оценить условия трещиноватости. Заключение геолога относительно этих условий можно рассматривать лишь как основу для выработки программы

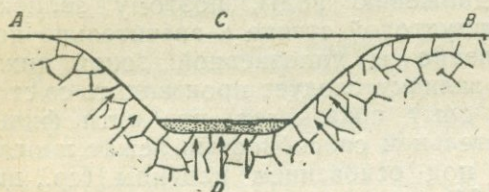


Рис. 58. Разрыхление трещиноватых горных пород вследствие уменьшения нагрузки.



Рис. 59. Расслоение мергелистых прослоев, вследствие уменьшения давления.

бурения. Однако и колонковое бурение выясняет в лучшем случае степень трещиноватости, но не поглощательную способность трещиноватых пород и тектонических разломов. Поглощательную способность можно определить только на основании исследования относительной проницаемости стенок буровой скважины. Самый простой способ определения этой проницаемости состоит в том, что на склоне долины, приблизительно на высоте будущей поверхности запруженной воды, устраивают водоем и соединяют его трубками с коротким раструбом, вделанным в верхнюю часть исследуемой буровой скважины, так, чтобы вода не могла просачиваться. Давление воды измеряется манометром, введенным в трубку недалеко от отверстия скважины, а количество воды особыми водомерами. Если устройство водоема неудобно, то воду нагнетают в буровую скважину при помощи насоса. Чтобы измерить поглощательную способность отдельных трещин или короткого интервала буровой скважины, в буровую скважину вводят резиновые тампоны, при помощи которых нагнетают воду в исследуемый участок скважины. Трубка, подающая воду под давлением, вводится через отверстие, оставленное в верхней пробке. В Соединенных Штатах такие методы исследования производятся уже более двадцати лет и составляют существенную часть специальных предварительных изысканий при постройке сколько-нибудь значительных плотин. Величина потери воды, которую можно считать допустимой, зависит, во-первых, от соотношения между имеющимся запасом воды

и количеством ее, которое потребуется для эксплуатации будущего гидротехнического сооружения. При нормальных условиях работы по заполнению трещин можно считать законченными, если при помощи инъекции цемента удалось уменьшить потерю воды в стенках буровых скважин до 0,05 л в 1 минуту на 1 м глубины буровой скважины и на 1 м высоты давления<sup>1</sup>.

Однако и результаты этих изысканий не устраняют неуверенности, о которой говорилось выше при рассмотрении рис. 57. Эти исследования все же дают некоторые основания, чтобы судить о потерях воды, которые следует ожидать, о положении трещин с наибольшей поглощательной способностью и о видах на уменьшение утечки воды цементированием.

Заливкой цементом трещин можно, правда, сильно понизить потерю воды, однако совершенно уничтожить ее нельзя; это подтверждается и результатами имеющихся наблюдений. Введение цемента представляет значительное, хотя и сконцентрированное в узкой зоне сопротивление движению воды, поэтому заливка цементом действует подобно шпунтовой стенке и значительно понижает гидростатическое давление за уплотненной зоной ниже по течению. Вследствие этого заливку следует производить со стороны верхнего бьефа. Так как опыт показывает, что пути фильтрации с наибольшей поглощательной способностью лежат иногда на глубине 20 и более метров под основанием плотины (ср., например, запруда в Вгйх, стр. 184), то в сильно трещиноватых породах следует по крайней мере некоторые из буровых скважин доводить до 30 м и проверить их водопоглощательную способность на отдельных интервалах.

При обсуждении влияния цементирования на гидростатические условия следует иметь в виду, что размеры частиц цемента обычно не меньше 0,05 мм. Так как сечение самых узких трещин, по которым еще передается гидростатическое давление, достигает приблизительно 0,0002 мм, то фильтрация из верхнего бьефа не исчезает, несмотря на цементирование. Если грунт прорезан сильно поглощающими доступными для проникновения цемента трещинами, то последние с внешней стороны уплотненной зоны действуют как сборный дренаж, и присутствие их понижает гидростатическое давление под основанием плотины. Менее благоприятны условия гидростатического давления в породах с мелкими трещинами, мало или совсем недоступными для цемента. В этих случаях хорошо принимать в расчет гидростатическое давление даже тогда, когда опыты над проницаемостью стенок скважин указывают на плотные породы, но буровые колонки (керны) позволяют заключить о наличии большого количества трещин. Н. Е. Ступег из Базеля добавляет к этим рассуждениям свои опыты с инъекцией цемента.

„Вообще необходимо указывать при закладке плотины на различные виды расселин и трещин. Следует подчеркнуть, что даже самая прочная и плотная порода претерпевает глубокие повреждения при подрывных работах. Большею частью нельзя заложить зуб настолько глубоко, чтобы можно было начать кладку вне этой

<sup>1</sup> Прим. ред. Очень важные практические данные, приводимые автором на основании обширного опыта плотностроения заграничей.

нарушенной зоны, поэтому почти при всех постройках плотин необходимо предпринять инъекции. Самые инъекции нужно хорошо обдумать с физической точки зрения. Если инъекция производится сжатым воздухом, то воздух естественно стремится найти себе выход. Когда воздух давит на инъецированную воду или цемент, то в самом цементе образуются новые ходы. Иначе при гидравлической инъекции, здесь столб воды покоится на инъецированной

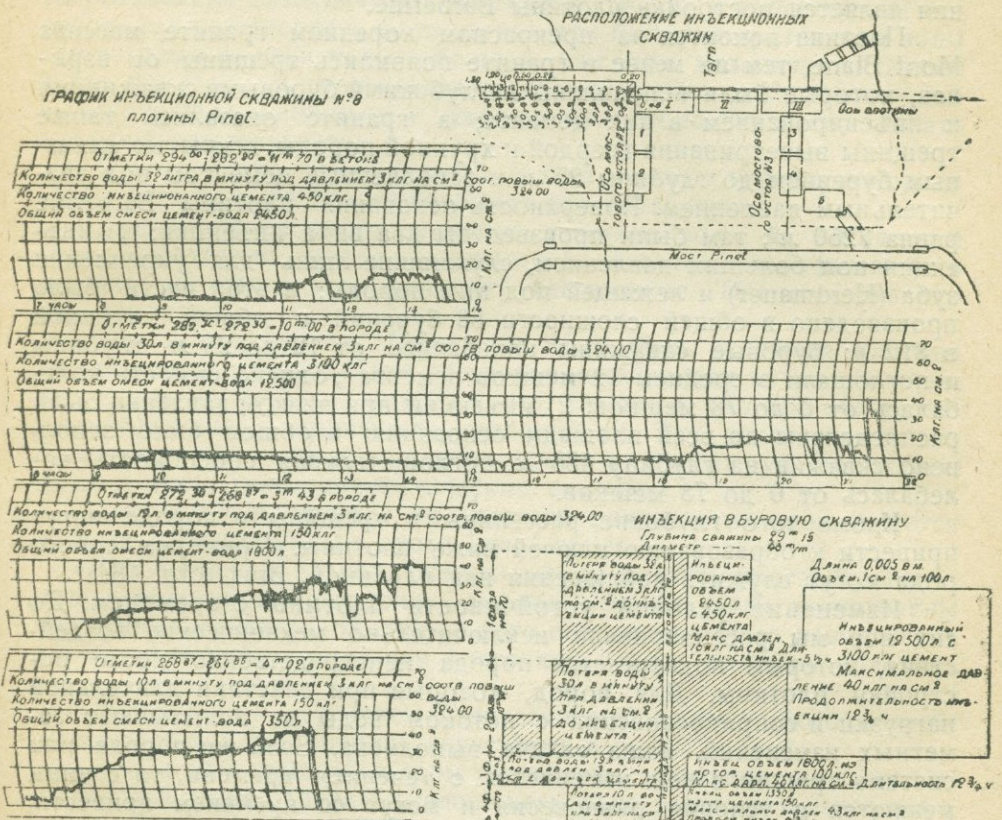


Рис. 60. Диаграмма процесса инъекции цемента, производившейся гидравлическим способом для плотины Pinet (по Г р ю н е р у).

массе и сдвигает ее. Поэтому в действительно критических случаях только гидравлическая инъекция приводит к удовлетворительным результатам. Избыток давления при инъекции тоже имеет значение. Ошибочно ограничиваться избытком давления, равным ожидаемому давлению воды. Инъецируемая масса должна проложить себе путь в трещины, и для этого нужен большой избыток давления. Кроме того следует принять в расчет, что при переходе из инъекционной трубки в трещину в породе часть избытка давления теряется. На приложенной диаграмме (рис. 60) изображена непосредственная запись такого инъекционного процесса для гидравлической инъекции. Внезапное падение давления соот-

ветствует вскрытию новой трещины, в которую поступает инъецируемая масса.

Если поверхностные повреждения от взрывов можно закупорить инъекцией цемента в неглубокие скважины, выбуренные при помощи сжатого воздуха буровыми пневматическими молотками, то более глубокие трещины и разрывы в породе можно инъецировать лишь с помощью алмазного или дробового бурения. Типичным примером тщательно произведенного уплотнения основания является постройка плотины Barberine.

Плотина покоится на прекрасном коренном граните массива Mont Blanc, тем не менее в граните появились трещины от взрывов, которые были исправлены неглубокими буровыми скважинами и инъецированием в них цемента; в граните оказались также трещины выветривания твердой и хрупкой породы, вскрытые алмазным бурением до глубины 25 м и заполненные цементом под значительным давлением. Поверхность основания плотины Barberine равна 7250 м<sup>2</sup>; там были произведены два вида инъекций: 1) инъекции под большим давлением, служившие лишь для укрепления зуба (Herdmauer) и лежащей под ним породы; в этой части было произведено в общей сложности 58 бурений с общей глубиной в 812 м; буровые скважины колебались от 12 до 25 м глубины и поглощали в среднем 12 мешков цемента<sup>1</sup>; однако емкость колебалась от 0 до 78 мешков; 2) инъекции при низком давлении были распределены по всей площади основания; в общем было заполнено скважин на глубину 435 м, поглощательная способность колебалась от 0 до 78 мешков.

Кроме того глубокие расселины и трещины в породе могут привести к образованию ключей ниже плотины. Примером такого рода могут служить наблюдения над плотинной. Вгӱх (стр. 184)<sup>4</sup>.

**Изменение условий устойчивости плотины с временем.** До сих пор мы рассматривали исключительно механические воздействия, которым подвергается порода непосредственно после постройки плотины. Для пород, которые при действии длительной нагрузки и соприкосновении с потоком воды не испытывают заметных изменений, наша задача выполнена. Если же порода или система трещин в ней изменяется с течением времени, то с ними меняются и условия равновесия и могут со временем привести, наконец к прорыву такой плотины, которая в момент пуска в действие не вызвала опасений.

Опасности, которые могут возникнуть для основания плотины, вследствие медленно идущих изменений, известны уже десятки лет. Тем замечательнее недостаток цифровых данных, полученных наблюдениями или опытным путем, для определения вида и размеров возможных изменений, так что даже опытный геолог может в лучшем случае высказать лишь предположения, а не положительные сведения. Изменения эти могут идти четырьмя путями: а) химические изменения вследствие обменного разложения или растворения, в) физические изменения объема, содержания воды и твердости пород, с) медленное изменение формы поверхности подземной части основания под длительным влиянием изменения нагрузки, д) изме-

<sup>1</sup> Прим. ред. Мешок цемента весит 80 кг.

нения сечения путей фильтрации благодаря механическому действию текущей воды.

а) Так как породы, находящиеся под водой, в большинстве случаев подвергались увлажнению благодаря просачивающейся воде уже в течении геологических периодов времени, то химических изменений, связанных с обменом веществ, следует ожидать лишь в небольшой мере (большее содержание кислорода в просачивающейся воде). Важнее происходящее во многих породах уменьшение сопротивления давлению при насыщении водой и процессы растворения, так как скорость растворения при быстром протекании воды через трещины значительно больше, чем при медленном, и кроме того помогает и повышенное давление. По этой причине заливку трещин цементом в растворимых породах нужно делать с особой тщательностью.

Относительно химического действия воды на коренную породу Н. Е. Гипер из Базеля сообщает нам следующее.

„Здесь первое место занимает действие воды на ангидрит и гипс. Собственно говоря, следовало бы сказать, что закладывать плотину на гипсе или ангидрите невозможно. Тем не менее это уже случалось.

Так, в окрестностях Базеля на Biers была заложена плотина на триасовых сланцах. При постройке не обратили внимания на то, что под ними залегают пласты гипса. Вскоре в плотине обнаружили трещины, и произошло оседание ее. Эту опасность можно было устранить, подперев плотину снизу и опустив зуб (Herdmauer) ниже пластов гипса пневматическим способом.

Аналогичным случаем, но с катастрофическим исходом является прорыв плотины Francis около Los Angeles <sup>1</sup>.

Там в сланцах правого склона долины имелись прослойки гипса мощностью лишь в несколько дюймов, все они были выщелочены просачивающейся водой. Кроме того появилось общее размягчение пород, служивших основанием восточного плеча плотины. Плотина осела и прорвалась.

Дальнейшим следствием физического или химического воздействия является растворение известняка в воде.

В качестве примера в этом отношении упомянем плотину Сапага. Там выше плотины имелось несколько расселин в известняке, на которые руководители постройки обратили мало внимания. Вскоре после постройки утечка воды через расселины увеличивалась и в настоящее время превышает 10 м<sup>3</sup> в секунду, причем уплотнение не удалось.

При описании запруды в долине Wäggi в Schräh будет сказано про уплотнение известняковой породы. Эти инъекции были произведены, разумеется, специалистами гидравлическим способом.

Однако и химические изменения пород при выветривании могут привести к затруднениям при постройке плотины. В древних выветрелых породах, которые мало размываются водой, выветрелый слой остается лежать на породе. В этом слое лишь в очень редких случаях можно заложить фундамент.

Такие условия встречаются, например, в Испании в Sierra Mo-

<sup>1</sup> St. Francis. Dam Catastrophe. Eng. News Rec., I, p. 466, 1928.

rena, Sierra del Gredo, Sierra Guaderama, также в южных Аппенинах и частью также в области Богемского массива. Эти древние горы, образовавшиеся в силурийское, каменноугольное или пермское время, скрывают свои коренные породы под плотным покровом продуктов разрушения. Такой выветрелый слой может пропускать воду, например продукт выветривания гранита, состоящий из смеси зерен кварца, слюды и полуразрушенного полевого шпата. При закладке плотины Charco del Cura на Alberche в Sierra del Gredo такой слой пришлось пройти до глубины 12 и 15 м, пока встретили надежную для фундамента породу. В Тоскане начали постройку запруды, при которой на 30 м еще не достигли надежной для закладки фундамента породы.

Гнейсы и кристаллические сланцы могут обратиться и в совершенно непроницаемую массу. В таких случаях иногда возможно основать плотину на выветрелых породах. Такой запрудой является плотина Cala. У ее внешних плечей основание оказалось надежным и не пропускающим воду, однако такая выветрелая порода представляет мало сопротивления действию воды. Породы, залегающие ниже водослива плотины Cala, были смыты уже через несколько часов, и только залегающие в скале пласты диорита представляли еще твердый остов.

Бывают случаи, когда на коренной породе лежит выветрелый

слой, который затем перекрыт более молодыми отложениями.

Примером такого рода служит разрез в районе одной европейской запруды (рис. 61).

Слой глины, лежащей на мелафире, постепенно вымывается, и вода выступает ниже плотины уже под давлением. Здесь ничего больше не остается, как опустить зуб до самого мелафира.

в) Физические изменения, которые может претерпеть порода в области потока просачивающейся воды, хорошо выражаются словами „разбухание“ (глины, мергели и т. д.) и „размягчение“ (прослойки глины). Оба слова, в сущности говоря, обозначают то же самое, потому что размягчение физически невозможно без одновременного увеличения содержания воды. Процесс разбухания был уже описан на стр. 29.

Если вспомнить выведенную там зависимость между разбуханием и упругими свойствами материала, то напрашивается дальнейший вопрос, почему процесс разбухания должен начаться лишь после окончания постройки запруды. Породы в огромном большинстве случаев уже до постройки плотины находились в сфере грунтовых вод. Так как постройка плотины не уменьшает, а увеличивает давление, действующее сверху на породу, то вместо разрыхления из-за набухания следовало бы ожидать уменьшения объема вслед-

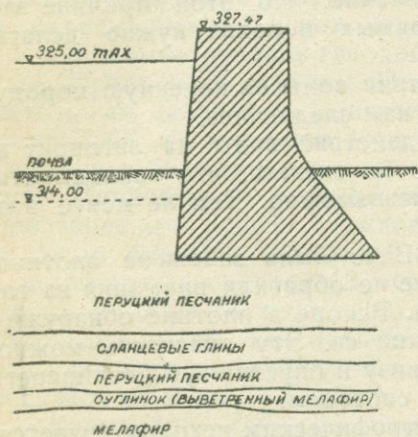


Рис. 61. Разрез основания одной северо-богемской плотины (по Г р у н е р у).

ствие сжатия. Выяснить это важное обстоятельство можно, только рассматривая отдельные явления. Предположим сначала, что тонкий прослойк жирной глины заключен между двумя ограниченными плоскостями (пластами породы), которые не могут сместиться по отношению друг к другу. Пусть пласт находится под водой. Если давление воды, действующее на оба конца нашего пласта, станет неодинаковым с разностью  $v - a$  (рис. 62а), то благодаря сцеплению между глиной и поверхностями породы, глина не сможет двигаться по направлению давления, и движение, вызванное падением давления, ограничивается чрезвычайно медленным током воды через глина. На пути  $AC$  ток воды производит, правда очень незначительное уплотнение глины. На отрезке  $CB$  структура глины разрыхляется благодаря давлению тока воды.

Если проследить за этим явлением численно, вводя цифровые значения, относящиеся к пластическим глинам, то можно заключить, что изменения, которые произойдут в прослойке глины под влиянием разности давлений, практически не имеют значения. О „размягчении“ прослойка глины, по которому протекает вода, по всей его длине и ширине или о медленном выдавливании глиняной массы нечего и думать. Попытки косвенно связать некоторые прорывы плотин (например, разрушение плотины в Austin, Texas) с размягчением глинистых прослоек следует поэтому принимать с осторожностью. В действительности в таких случаях дело могло состоять в постепенном уносе глинистой массы водой, содержащей перекатный материал<sup>1</sup> (мелкие осколки пород) (см. стр. 177).

Немного более заметно действие текущей просачивающейся воды на глины, если плотина всей своей массой и по всей ширине покоится на поверхности залегающей глубоко пластической массы глины (рис. 62б). В этом случае текущая просачивающаяся вода производит на воздушной стороне основания плотины набухание и размягчение массы глины даже тогда, когда глина уже до постройки плотины длительно находилась под водой.

Это набухание следует рассматривать как чисто механическое действие текущей просачивающейся воды; при этом вода, текущая под давлением, направленным вверх, гонит вверх частицы глины и разрыхляет таким образом ее структуру.

Разрыхление структуры глины и связанное с ним размягчение

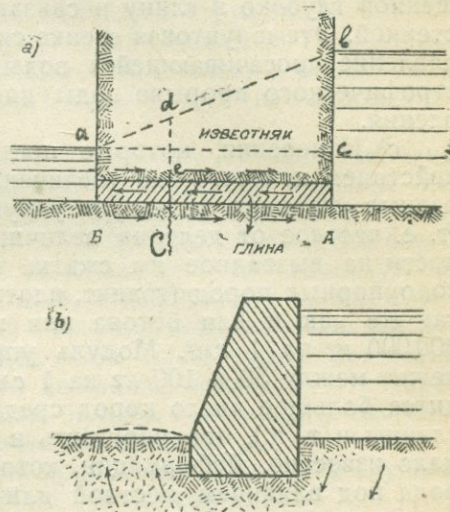


Рис. 62. Действие фильтрационного потока: а) на тонкий прослойк глины, заключенный между двумя пластами породы; б) на глина, находящуюся под давлением веса плотины.

<sup>1</sup> Под перекатным материалом автор повидимому подразумевает донные наносы, передвигаемые рекой.

ее вызывают уменьшение прочности с воздушной стороны фундамента плотины. Так как размягчение возникает в том месте, где давление фундамента при закрытой запруде наибольшее, то существует опасность появления системы трещин под основанием с водной стороны, опасность образования трещин в плотине вследствие неравномерного оседания и опасность местного прорыва воды по появившимся трещинам под основанием. Такое стечение обстоятельств привело в 1911 г. к разрушению плотин Macdonalton в Пенсильвании <sup>1</sup>.

Чтобы бороться с приведенными выше обстоятельствами, рекомендуется укрепить подножие с верховой стороны плотины, опущенной глубоко в глину и связанной с самой плотиной шпунтовой стенкой. Эта шпунтовая стенка сильно уменьшает гидростатическое давление просачивающейся воды и уничтожает возможность катастрофического прорыва воды вдоль линии наименьшего сопротивления.

с) Изменения, которые претерпевает порода основания под действием искусственно увеличенной нагрузки, зависят при прочих равных условиях от модуля упругости породы. Модуль упругости (т. е. частное от деления величины давления на единицу поверхности на вызванное им сжатие на единицу длины) для твердых водоупорных пород (гранит, плотный известняк и т. д.)<sup>2</sup> равняется, так же как и для бетона или кирпичной кладки, от 100 000 до 300 000 кг на 1 см<sup>2</sup>. Модуль упругости плотной жирной глины <sup>3</sup> лежит между 50 и 100 кг на 1 см<sup>2</sup>. Между этими пределами находится большое число пород средней крепости (мергель, глинистые сланцы и т. д.), про упругость и прочность коих до сих пор очень мало известно. Деформации, которые происходят в породах такого рода под влиянием местной длительной нагрузки и особенно под влиянием переменной нагрузки, вероятно с течением времени возрастают, так же как и деформация глины. Большая разница между прочностью этих пород в сухом и насыщенном водой состоянии (для глинистых сланцев около 60%)<sup>4</sup> вероятно проявляется, так же как и для глины, в соответствующей разнице между модулями упругости сухого и насыщенного водой материала. Это заставляет думать, что ток просачивающейся воды, направленный вверх, в пределах воздушной стороны стенки плотины не остается без влияния на прочность этих пород.

Значение этих обстоятельств для сооружения плотин очевидно. Если плотина выстроена на породе с модулем упругости близким к модулю материала кладки, то предположения, сделанные при расчете плотины, почти вполне оправдываются. Если же модуль упругости породы в основании значительно меньше, чем модуль материала плотины, и кроме того грунт претерпевает деформации, величина которых возрастает со временем, то в теле плотины появляются вторичные напряжения, приводящие с течением времени к дряблости и образованию трещин.

<sup>1</sup> Eng. Rec., 1911, II, p. 581.

<sup>2</sup> Förster. Taschenbuch für Bauingenieure.

<sup>3</sup> Terzaghi. Erdbaumechanik.

<sup>4</sup> Hirschwald. Handbuch der bautechnischen Gesteinsprüfung. S. 196, Berlin, 1911.

Поучительные примеры такого рода повреждений были указаны Р. Ziegler<sup>1</sup>.

д) Чисто механическое вымывание трещин, заполненных песком и рыхлым передвигающимся или выветрелым материалом, понятно без дальнейших объяснений. Труднее понять расширение пустот, вполне или частью заполненных глиной. Опыт учит, что такие глины даже в мягко пластичном состоянии прекрасно противостоят механическому воздействию воды, и нет причины предполагать, что глина в соприкосновении с током просачивающейся воды будет вести себя иначе. Если же вода в трещине несет с собою грубый материал, то она может промыть и расширить себе пути в глине, постепенно стирая открытую поверхность глины, соприкасающуюся с током воды, аналогично тому, как действует струя песка.

Как осторожно нужно обращаться с заполненными глиной раселинами, даже при сравнительно небольшом давлении, показывают наблюдения Н. Е. Grüner в Базеле при работе на одной плотине на Рейне у Augst-Wyhlen.

На стр. 180 находится подробное описание условий закладки этой плотины. „Трещина, обнаруженная в основании плотины вызвала особые затруднения, потому что там была встречена глубокая, плотно заполненная глиной жила. При помощи пневматического бурения эта жила была прослежена, пока она не закончилась узкой, совершенно забитой глиной трещиной, и дальнейшее прослеживание ее из технических соображений оказалось невозможным. Обследование подошвы плотины, произведенное через десять лет после постройки, при помощи водолазного колокола, показало, что через эту трещину вытекает под давлением больше 1 м<sup>3</sup> воды в секунду. Значит, трещина расширилась с течением времени“.

Образование зародышей трещин происходит во многих случаях вследствие перемены нагрузки сильно сжимаемой глины.

Некоторые указания на то, каким образом образуются водяные ходы в глине, дано упомянутое на стр. 137 происшествие в Washington, D. C. Образование ключей началось очевидно с образования тонкой трещины, возникшей под влиянием гидростатического давления, действовавшего на дно строительной выемки выше залежи мелкого песка. Как только вода, несущая песок, пробилась себе дорогу через эту трещину, она высверлила в самом широком месте выходное отверстие в форме трубки, причем остальная часть трещинки не расширилась, а даже скорее заплывала. После произведенного перекрытия первого ключа поблизости образовались другие, однако ни в одном из случаев первоначальные трещинки не были настолько большими, чтобы их можно было заметить на взгляд.

**Влияние свойств породы основания на устойчивость плотин.** Из предыдущих рассуждений можно вывести следующие заключения относительно надежности устойчивости плотин.

При тщательном производстве строительных работ система трещин под основанием подвергается гораздо меньшей опасности, чем находящаяся над ними плотина или порода. Гидростатическое давление, направленное вверх, действующее в породе, залегающей

<sup>1</sup> Р. Ziegler. Die tatsächlichen Gefahren des Unterdruckes. Zeitschr. f. Bauwesen, S, 408, 1916; S. 147 u. 670, 1917.

ниже трещин под основанием, можно оценить лишь совсем грубо, даже при самых тщательных исследованиях места постройки. Влияние цементирования, уменьшающее гидростатическое давление, сильнее проявляется в породах, сильно разбитых трещинами, обладающими большой поглощательной способностью, чем в породах с очень узкими трещинами. Самая большая опасность, происходящая от гидростатического давления, направленного вверх, состоит не в скольжении плотины по основанию, а в скольжении внутри породы основания.

Если трещины прорезают породу неравномерно, то скольжение может иметь место только после сглаживания неровностей породы. Поэтому большинство прорывов плотин, которые косвенным образом были вызваны гидростатическим давлением, произошли в породах с более или менее горизонтальным напластованием, с плоскими границами между отдельными пластами. При выборе такого рода основания из коренных пород следует считаться с возможностью сильного гидростатического давления на породу, залегающую ниже плотины по течению (рис. 57).

Среди вредных изменений, которые может претерпевать основание плотины с течением времени, главную роль играют, повидимому, следующие факторы.

Возрастающая деформация мягких пород под влиянием переменной нагрузки и расширение существующих трещин и пустот под действием тока воды, несущего перекаточный материал. Более точное обсуждение значения первого фактора в настоящее время еще невозможно из-за скудных сведений относительно физических свойств и прочности мергелистых пород и мягких глинистых сланцев. Деформации, возникающие в этих породах под влиянием изменения нагрузки, влекут за собой образование трещин в стенке плотины и ее обрушение.

Значение второго фактора можно сильно уменьшить тщательным заполнением открытых трещин.

Классификация пород по их пригодности в качестве основания для высоких плотин имеет лишь статистическое значение, как это имеет место и в геологии туннелей. Сведения, собранные в Германии, были обработаны Leppla<sup>1</sup>.

### 3. ПЛОТИНЫ, ЗАЛОЖЕННЫЕ НА КОРЕННЫХ ПОРОДАХ.

Для уяснения наших представлений об основаниях плотин рекомендуется изучить описание наиболее интересных сооружений, подобно тому как это сделано в области геологии оползней и геологии туннелей, и на основании таких примеров узнать, как проявляются на практике основные геологические и физические законы. В этом отделе будет обращено внимание на некоторые из важнейших новых построек.

**Соседство сбросов.** На основании данных, полученных при

---

<sup>1</sup> A. Leppla. Geologische Vorbedingungen der Staubecken. Zentralblatt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, 3, 1908. Die geologischen Voraussetzungen für die Errichtung von Talsperren in Deutschland und die Durchführung geologischer Vorarbeiten bei ihrer Planung. Deutsche Wasserwirtschaft, 2 (19), S. 55-58, 1924.

постройках туннелей, показано, что ни амплитуда сброса ни угол падения не дают достаточных оснований, чтобы судить о поглощательной способности трещин, встречающихся в области сброса.

Вообще говоря, молодые сбросы в слабо нарушенной области повидимому вызывают больше опасений, чем сбросы в сильно пересеченной горной области, возникшие в то время, когда массы пород еще находились под давлением мощного покрова. Недопустимо возведение плотин на сбросах, в которых еще сейчас происходят медленные перемещения, обусловленные сейсмическими явлениями.

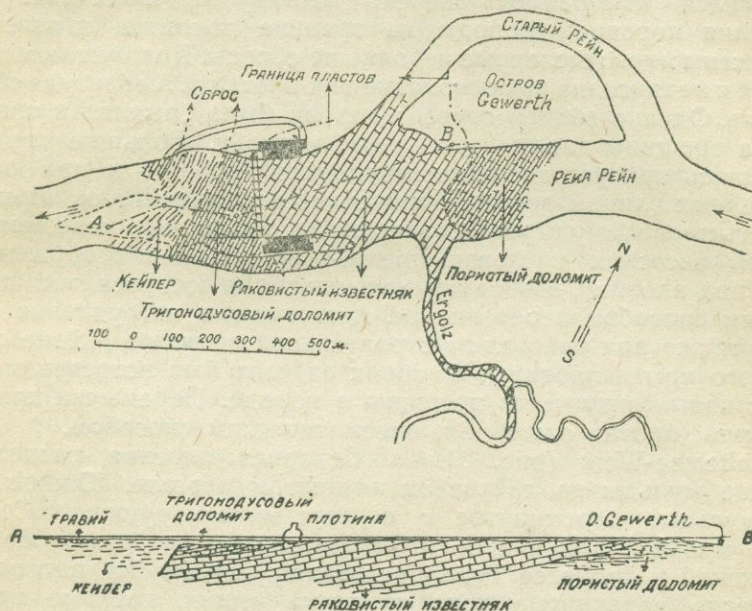


Рис. 63. Геологическая карта и разрез в районе постройки плотины Augst-Whylen (Schweizerische Bauzeitung, Bd. 61).

Если на расстоянии нескольких километров от места постройки сброс пересекает другой сброс, в котором в исторические времена происходили смещения, как это было, например, в Соединенных Штатах в районе некоторых главных сбросов, простирающихся параллельно Сиерре Неваде, то такие сбросы следует считать неблагонадежными, и на них не следует закладывать каменные плотины. Насколько обоснована такая мера предосторожности, показывает между прочим тот факт, что в трубе туннеля, пересекающей такую главную трещину (туннель Gunnison в Колорадо), произошел разрыв вследствие взаимного смещения стенок трещины. В средневропейских зонах землетрясений, разумеется, было бы достаточно избежать пересечения главных сбросов, образовавшихся в результате землетрясений.

В качестве крайних примеров наблюдений, собранных при постройке плотин в сбросовых областях, приведем работы при сооружении запруды для гидросиловой установки в Augst-Wyhlen на Рейне и плотин заводов Spullersee.

Augst-Wyhlen. Высота подпора 8,4 м, длина плотины 213 м; для возведения плотины на твердых коренных породах применялись кесонные работы<sup>1</sup> при проходке гравия мощностью 3 м. В 100 м ниже места постройки на границе между доломитом и подстилающим его раковистым известняком, с одной стороны, и кейпером с другой, проходит линия сброса, обусловленного присутствием грабена, пересекающего русло Рейна под косым углом Кейпер, залегающий вообще высоко, опускается здесь на большую глубину ниже раковистого известняка (рис. 63 а и б). Выбор места постройки определен намерением опереть плотину на известняк. После обнажения коренной породы на границе доломита и известняка обнаружены многочисленные небольшие сбросы. Доломитовая порода дряблая и непригодна как основание для плотины. Амплитуда сбросов невелика. Однако вблизи сбросов порода была „рыхлая и трещиноватая, а трещины частью заполнены глиной“. Большие трудности встретились при устранении трещиноватой породы и при очистке заполненных глиной расселин ниже дна рабочих выемок. Пришлось изменить программу строительных работ, вследствие невозможности осушить насосами котлован, предназначенный для сооружения подушки под плотину, возводимую между двумя построенными пневматическим способом перемышками. Аналогичные затруднения встретились также при работах на строительной выемке в районе северо-западного крыла плотины. В обоих случаях был встречен мощный приток воды снизу через трещины в породе. Перемышки пришлось соорудить, против ожидания, пневматическим способом.

Spullersee-Werk (рис. 84)<sup>2</sup>. Северная плотина расположена в районе мульды на лейасовом пятнистом мергеле. Южное крыло этой мульды, опрокинутое к северу, мало нарушено. Северное крыло мульды под влиянием скалывающих и раздавливающих напряжений в процессе горообразования разбито на многочисленные, тесно надвинутые друг на друга чешуи, которые придают пятнистым мергелям явную сланцеватость и чешуйчатую структуру. Сбросы и разрывы кальцитовых заполнений трещин дали возможность выяснить целый ряд последовательных по времени фаз движений. Амплитуды сбросов колеблются от нескольких дециметров до 40 м. Вследствие вязкости породы чешуйки в мергелях, несмотря на деформации, „так прижаты друг к другу, что свойственная пятнистым мергелям водонепроницаемость сохранилась. Только в восточной части района плотины, где тектонические нарушения относятся к началу титона, в некоторых местах потребовались выемки до 5 м глубины для достижения благонадежного водонепроницаемого основания под плотину“.

Южная плотина заложена в самом глубоком месте южного крыла мульды Spullersee. Это крыло в месте постройки переходит из положения, опрокинутого на север, в круто падающее к северу, так что в районе самой плотины пласты поставлены почти на голову. Простираение пород переходит от западного плеча плотины к восточному, из восточного в северо-восточное. „Изменение прости-

<sup>1</sup> Die Wasserkraftanlage Augst-Wyhlen. Schweizer Bauzeitung.

<sup>2</sup> O. Ampferer und H. Asches. Ueber geologisch-technische Erfahrungen beim Bau des Spullersee-Werks. Jahrg. d. Geolog. Bundesanst. Bd. 75. Wien, 1925.

рания обусловлено рядом сбросов, пересекающих свиту пород в северо-восточном направлении и разбивающих их на отдельные глыбы. Самый значительный сброс как раз касается восточного плеча плотины. Величина смещения равна 250 м; сброс вызвал перемещение лежащей к западу части массива на северо-восток. Благодаря этому перемещению и небольшому другому сбросу с амплитудой в 12 м, прорезающему наискось основание плотины, и явилась возможность основать самую высокую и самую важную часть плотины на лейасовом пятнистом мергеле“.

Местами заполненные глиной мешки, приуроченные к выклиниванию мергелистых пород, обогащены роговиком. После произведенной выемки этих мешков сделана инъекция цементом трещин в мергелях с помощью небольших скважин от 3 до 5 м глубиной под давлением 4—5 атм. Наибольшее количество цемента, приходившегося на скважину, достигало 10—15 мешков.

Описанные выше случаи устанавливают границы между благоприятными и неблагоприятными геологическими условиями при сооружении плотин в районе нарушенных сбросами зон.

Излишек расходов, связанный с необходимостью переходить уже во время постройки от выемки открытыми работами к кессонным работам, настолько значителен, что в сомнительных случаях всегда лучше предварительно обследовать свойства трещин опытами с нагнетанием воды под давлением в буровые скважины. Такого рода опыты производятся в Соединенных Штатах настолько часто, что для большинства встречающихся на практике случаев в литературе можно найти соответствующие описания.

Сравнительно благоприятные результаты, полученные относительно свойств сбросовых трещин в породах основания плотин Spullersee, не исключают однако неблагоприятных условий гидростатического давления.

Согласно стр. 170, между сечением трещин, имеющих значение в отношении водопроницаемости подземной части основания, и сечением самых узких трещин, по которым может еще передаваться гидравлическое действие давления, существует очень большая разница. Правильность такого представления, повидимому, подтверждается измерениями гидростатического давления, предпринятыми Schaefer на плотине Ostertal и Vorchardt на плотине Neytal.

Измерения производились при помощи манометров, которые показывали величину давления воды, действовавшую в небольших камерах, оставляемых внутри тела плотины над трещинами под ее основанием и соединенных трубами с контрольной галлереей. Эти измерения показали, что давление воды в породах, по внешности не нарушенных и не трещиноватых, гораздо больше чем в тех местах, где при рытье котлована для фундамента пробивались ключи.

Наблюдения, произведенные с помощью пьезометрических трубок, заложенных в теле плотины Willwood и плотины American Falls, над гидростатическим давлением в трещиноватых и затем уплотненных инъекций цемента породах оснований, указали на весьма благоприятные условия.

Измерения такого рода не только дают ценные данные для составления проектов других плотин, но также выясняют и возмож-

ные изменения, происходящие в породах основания наблюдаемого сооружения, и поэтому принципиально их следовало бы производить над каждой плотиной.

**Коренные породы с почти горизонтальным залеганием.** Этот случай особенно важен, потому что горизонтальное расположение трещин между пластами благоприятствует разрушению сооружения вследствие скольжения. Некоторые из самых тяжелых по последствиям катастроф при прорыве плотин произошли на коренных породах такого характера.

Плотина Olive Bridge, Catskill, для водоснабжения Нью-Йорка, высотой 66 м. Залегающие горизонтально пласты известняка, мощностью в несколько метров, отделены друг от друга тонкими прослойками сланцев и мергеля. Трещины между пластами, в верхней части открытые до глубины 20 м, вероятно по причине, указанной на рис. 58 и 59 (стр. 169).

Выемка до 12 м ниже поверхности здоровой породы. Со дна выемки 15 скважин от 12 до 30 м глубины проверены на водопроницаемость через каждые 30 см длины скважины. Заполнение открытых трещин произведено при помощи инъекции цемента<sup>1</sup>.

Плотина Gotha, высотой 22 м<sup>2</sup>. Плотный конгломерат красноватой толщи. Почти горизонтальное напластование, открытые трещины, многочисленные вертикальные сбросы. При первом заполнении, при высоте запруды в 5 м, потеря воды в одной пробной штольне 215 л в секунду. Заливка цемента через буровые скважины диаметром в 30 см, от 13 до 30 м глубины. Потребление цемента на буровую скважину от 80 до 1530 мешков цемента. Отыскание водяных жил E. Döll при помощи волшебной палочки (Wünschelrute). Дополнительные работы по уплотнению, произведенные по указаниям Döll, снизили потерю воды с 120 до 8 л в секунду.

Austin, Pa., высотой 14 м. Тонкослоистый песчаник (мощность слоев от 20 до 29 см). Между пластами песчаника залегали тонкие прослойки мергеля и выветрелого песчаника. Вертикальных трещин мало. Зуб толщиной в 1,2 м, 1,2 м глубины до „здоровой“ породы. 21 января 1910 г. оползни на восточном берегу ниже плотины; 22 января скольжение средней части на 45 см вниз по течению. 30 сентября 1911 г. разрушение плотины, частью вследствие сползания по подошве основания, частью вследствие скольжения породы по породе. В 260 м выше места несчастья находится другая плотина, еще хуже построенная, но на которой до сих пор не замечено серьезных последствий. Основание прорвавшейся плотины было вскрыто до начала постройки буровыми скважинами глубиной от 3 до 4,5 м и признано водонепроницаемым.

Nashville, Tennessee. Плотина, подпиральная водоем для питьевой воды, высотой 9 м; тонкие пласты известняка, разделенные примазками глины, падающие под углом от 3 до 4° по направлению течения. В 1912 г. 25 лет спустя после постройки, часть плотины

<sup>1</sup> Testing-Diamond Drill Borings at the site of the Olive Bridge dam., Ashokan Reservoir, Eng. Rec., II, 1908. — см. также: L. White. The Catskill Water Supply of New York City. New York, 1913.

<sup>2</sup> Götte. Die Dichtungsarbeiten an der Gothaer Talsperre. Journ. f. Gasbeleuchtung und Wasserversorgung, (55), s. 561, 654. 1912.

обрушилась и сползла вместе с породой основания вниз по течению <sup>1</sup>.

Ohio <sup>2</sup>—государственная плотина № 26. Наибольшая высота подпора 4,3 м, длина плотины 180 м. Твердый мергель; глубина фундамента от 0,9 до 1,3 м ниже поверхности породы. Скольжение породы по породе, наибольшее расстояние скольжения 45 м.

Только что приведенные несчастные случаи, имеющие место при горизонтальном залегании пород, заставляют обратить внимание на опасность, возникающую под влиянием гидростатического давления в нижнем бьефе у подошвы плотины и выражающуюся нередко нарушением, выпиранием и размывом в этом месте пластов горных пород (рис. 57).

Дальнейший опасный момент заключается в частичном размывании глинистых прослоек между пластами под действием просачивающейся воды, несущей песчаный материал. Вследствие чрезвычайной медленности, с которой коэффициент трения породы о глину стремится к своему нормальному значению при увеличении нагрузки (стр. 31), размывание трещины вдоль поверхности напластования, составляющей  $p\%$  всей ее поверхности, влечет за собой уменьшение сопротивления скольжению почти в том же процентном соотношении. Образование ключей в строительной выемке силовой установки Potomac дает пример скорости, с которой может происходить такое размывание. Размеры этих опасностей нельзя предсказать ни на основании свойств буровых колонок ни из результатов опытов над давлением воды, поэтому при составлении проекта нужно делать самые неблагоприятные предположения, которые еще могут оправдаться при данных геологических условиях.

Весьма замечательны успешные результаты работ по уплотнению, произведенных в результате исследования при помощи волшебной палочки (Wünschelrute) на плотинах Gotha и Brüh (стр. 182 и 184). Так как здесь очевидно имеется чисто физиологическое действие земных токов, возбужденных быстро текущей по трещинам водой, на водоискателя (Rutengänger), то получение аналогичных результатов геофизическими измерениями, казалось бы, должно лежать в пределах возможного.

**Неравномерно-трещиноватые породы.** При обсуждении характера коренных пород такого рода следует различать, имеем ли мы дело с грубо-трещиноватыми или с мелко-трещиноватыми породами. В первом случае задача инженера состоит главным образом в снижении потери воды. Работы по уплотнению в то же время частично улучшают условия гидростатического давления (стр. 170). Во втором случае небольшие потери воды не имеют особого значения, но зато тогда нет способа урегулировать искусственным путем условия гидростатического давления, и поэтому при расчете плотины следует считаться с большей силой этого давления. Во всяком случае, при неравномерной трещиноватости породы опасность прорыва плотины вследствие скольжения внутри породы отпадает.

Плотина Lahontan, Nevada. Земляная плотина высотой 36 м <sup>3</sup>.

<sup>1</sup> Failure of the City Reservoir Wall, Nashville, Tenn. Eng. News, II, p. 922—925, 1912.

<sup>2</sup> Failure of Ohio Dam. № 26, Ohio River. Eng. News, 1912, II, p. 366.

<sup>3</sup> Неопубликованный отчет об уплотнении русла долины.

Пласты красноватого песчаника с глинистым цементирующим материалом, падающие под небольшим углом с правого берега реки Carson к левому. Справа налево: мелкозернистый твердый песчаник, грубозернистый песчаник средней твердости, наконец не вполне затвердевшая глинистая порода, по всем направлениям пересекающаяся трещинами, шириной от 0 до 1,5 см, открытыми или заполненными кварцем или мягкой глиной. Буровые скважины диаметром 10 см со дна выемки (глубиной 9 м) в два ряда на расстоянии 60 см друг от друга, расстояние между буровыми скважинами в каждом ряду 90 см.

Проверка водопроницаемости при давлении 3,6 атм. Потери воды на 1 м высоты давления и на 1 м глубины скважины в литрах в минуту: до начала работ по уплотнению от 0,69 до 0,13 л, в среднем 0,40 л; по окончании их—от 0,04 до 0,02 л, в среднем 0,03 л (левый берег) и от 1,06 до 0,55 л, в среднем 0,84 л и от 0,21 до 0 л, в среднем 0,075 л (правый берег). Потребление цемента на буровую скважину от 1 до 25 мешков цемента. При цементировании начали с ряда, лежащего ниже по течению. При этом сначала пропускали каждую вторую скважину (первичные буровые скважины), затем последовали пропущенные (вторичные) и, наконец, буровые скважины второго ряда (буровые скважины третьего порядка). Этот метод дал возможность проследить шаг за шагом ход уплотнения при помощи опытов над давлением воды.

Запруда долины Brüh<sup>1</sup>. Высота плотины 53 м, длина гребня 220 м, порода—гнейс, проникнутый бесчисленными, неправильно расположенными трещинами; местами гнейс производит впечатление кучи нагроможденных обломков породы. Определенного сброса не найдено. Произведен дренаж русла. Первая заливка при высоте подпора 37 м; утечка 132,3 л в секунду вследствие дренажа основания и через трещины в породах на левом склоне долины. В 1914 г. с воздушной стороны плотины проведено 60 буровых скважин, глубиной от 8 до 10 м, диаметром 4 см; заливка 968 мешков цемента, под давлением 6 атм. Утечка не уменьшается. Тогда обследование при помощи волшебной палочки (Wünschelrute). Констатированы водоносные трещины на глубине от 11 до 30 м ниже подошвы основания. Заливка цемента через 10 буровых скважин, в количестве 2157 мешков цемента. Уменьшение утечки с 132 до 28 л в секунду.

Плотина Östertal<sup>2</sup>. Плотные граувакковые пласты перемежаются на левом склоне с тонкослоистым сланцем; на правом склоне более мощные, но трещиноватые пласты сланца; трещины в сланце были заполнены жирной глиной.

Простирание пластов приблизительно параллельно направлению долины, падение очень крутое. Самая большая трещина на левом крыле заполнена синей глиной, перешедшей уже частью в плотный синий сланец. Измерение гидростатического давления в колоколообразных камерах, устроенных в плотине над подошвой основания

<sup>1</sup> Macquard. Die Sickerungserscheinungen an der Brüxer Talsperre und ihre Aufdeckung mit der Wünschelrute. Der Bauingenieur, s. 995—1003, 1926. Содержит также указания на успехи цементирования других плотин.

<sup>2</sup> R. Schaefer. Unterdruck bei Staumauern. Zeitschr. f. Bauwesen, S. 101—118, 1913.

и соединенных трубками с контрольными галереями. В местах, находящихся вблизи от ключей, получилось давление меньше, чем в местах, которые при обнажении породы оставались сухими. Согласно измерительным записям, при увеличении высоты запруженной воды на 1,11 м давление увеличилось на 10 м по сравнению с бывшим давлением (4,2 и 3 м). Эта аномалия была объяснена предположением о частичном расседании трещин под основанием (Gründungsfuge). Самые большие давления получились в местах наименьшей глубины закладки фундамента. Утечка со времени пуска в ход в 1907 г. равномерно убывает (правое крыло 1,4 л в секунду в 1910 г. сравнительно с 2,8 л в секунду в 1907 г.).

Плотина Neyetal<sup>1</sup>. Мощные пласты граувакки и глинистых сланцев. Простирание перпендикулярно к направлению долины, падение под углом от 15 до 35° вверх по течению. В середине дна строительной выемки трещины, заполненные марганцовистыми соединениями (шламм). Глубина основания 8 м. Измерено гидростатическое давление. Расстояние точки места измерения от трещин не имело заметного влияния на величину давления. То же справедливо для длившегося 84 дня процесса заливки дренажа подошвы.

Результаты, полученные при предпринятой у плотины Lahontan инъекции цемента в буровые скважины, позволяют вывести заключение о чрезвычайной проницаемости породы. Если для этой и для других плотин тем не менее удалось с помощью инъекции цемента через неглубокие скважины снизить утечку до приемлемых размеров, то это можно объяснить только тем, что водопоглощаемость трещин уменьшается с глубиной, в смысле рис. 58. Величина причитающейся утечки на одну буровую скважину и на 1 м высоты давления дает необходимую основу для сравнения обследуемого основания плотин с характером оснований других плотин, для которых уплотнение удалось провести с успехом.

Результаты измерений гидростатического давления на плотинах Östertal и Neyetal считаются ценнейшими эмпирическими данными, полученными до сих пор в области оснований плотин. Они подтверждают предположение, сделанные на стр. 166 на основании теоретических соображений, и повидимому показывают ненужность перемычек над дренажем основания. Наблюденная R. Schaefer аномалия лучше объясняется расседанием трещины основания у подошвы плотины со стороны верхнего бьефа.

**Основание плотин на известняках.** Известняк относится к горным породам, наименее поддающимся расчету в отношении трещиноватости. Местами практически водонепроницаемый, он может на соседнем участке обладать весьма повышенной поглощательной способностью, обусловленной местным растворением породы и образованием пустот (карстовые явления). Подземные водяные пути приурочены преимущественно к геологическим зонам нарушения. Эти зоны могут соединяться между собой системами трещин и пещер, о направлении которых ничего нельзя сказать при наблюдениях над дневной поверхностью. Если запрудить русло реки в трещиноватых известняковых породах, то тонкий слой выветрелой глины,

<sup>1</sup> Schaefer, B. Unterdruck bei Staumauern. Zeitschr. f. Bauwesen, S. 101—118. 1913.

покрывающей дно, скоро прорывается в отдельных местах, и вода устремляется через трещины вниз. Если удастся найти эти места и их закрыть, то обычно непроницаемый почвенный слой прорывается где-нибудь в других местах, так как закрытие отсасывающих отверстий исключает противоположное гидростатическое давление, которое до тех пор удерживало соседние участки покрова в целости. Таким образом, уплотнение запруженного бассейна в области развития карстовых известняков представляет собою дорого стоящую и часто даже неразрешимую задачу. Надежные сведения относительно свойств породы можно обычно получить лишь глубоким бурением и опытами над давлением воды. Не следует забывать и химическое растворяющее действие воды на известняк (стр. 173).

В качестве примера большого разнообразия в свойствах известняковых массивов упомянем условия закладки фундамента при постройках плотин Keokuk на Mississippi и Hales-Bar на реке Tennessee. В обоих случаях дело касалось мощных пластов породы с почти горизонтальным напластованием, не прорезанных ни одним сбросом.

Плотина Keokuk, Ia. Длина 1300 м, высота подпора 9,5 м. Синий плотный известняк. Буровые скважины диаметром 10 см, 10 м глубины. Имеющиеся трещины при помощи сжатого воздуха под давлением в 4 атм. заполнены цементом и признаны водонепроницаемыми<sup>1</sup>. Никаких происшествий во время постройки плотины не было.

Плотина Hales-Bar. Длина гребня 360 м, высота подпора 20 м<sup>2</sup>. Бонгорский известняк. Попытки осушить строительную выемку между перемычками при помощи зумпфа не удалась вследствие притока воды снизу. Основание большею частью заложено на железобетонных кессонах сечением от 9 × 9 м до 16 × 22 м. После того как плотина была пущена в ход в 1913 г., после восьмилетней стройки, сопряженной с большими расходами, потери воды оказались, несмотря на предпринятое до возведения плотины цементирование, настолько большими, что потребовалось дополнительное уплотнение русла. Эта работа длилась еще тринадцать лет. Сначала была испробована заделка глиной, затем были найдены места утечки, покрыты тюфяками и залиты бетоном. Закрытие мест утечки влекло за собой всегда образование других, хотя это возникновение и было связано с узко ограниченными участками дна бассейна, имеющими форму островков. При обследовании этих фильтрующих воду участков бурением были встречены трещины шириной до 90 см, через которые вода стремилась со скоростью 1,8 м<sup>3</sup> в секунду. Уплотнение грунта удалось наконец при помощи инъекции жидкого асфальта<sup>3</sup>. Асфальт сохранялся внутри буровых скважин в жидком виде благодаря нагреванию электрических проводов с большим сопротивлением. Эти провода доходили до дна скважин. Под давлением в 14 атм. асфальт проникал в трещины шириной от 5 до 7 см на

<sup>1</sup> Waterpower development on the Mississippi River at Keokuk, Iowa. Eng. News, vol. 66, II, p. 355, 1911.

<sup>2</sup> Eng. News, II, p. 949, 1913.

<sup>3</sup> G. W. Christians. Asphalt Grouting under Hales Bar Dam. Eng. News Rec., I, 1926. Содержит также описание приспособлений, которыми измерялась система трещин.

расстояние 100 м от испытываемой скважины. Уплотнение подошвы плотины потребовало 68 буровых скважин со средней глубиной в 27 м и около 2850 т асфальта. Недавно асфальтовый способ был применен с успехом при уплотнении плотины Dix-River в Kentucky.

**Податливые породы основания.** Относительно действия этого фактора до сих пор известно еще очень мало. P. Ziegler<sup>1</sup> приводит между прочим следующие примеры.

Плотины Grosbois и Chazilly, см. стр. 164.

Запруда Bouzey. Длина гребня 472 м, высота подпора 15 м. Сланцы с прослойками глины и кварцевый пестрый песчаник. Несмотря на большую глубину основания в 17 м ниже подошвы долины, три года спустя после окончания постройки стенка плотины отделилась от зуба, заложённого еще на 2 до 6 м глубже. Высота воды была 3,3 м ниже гребня, когда стенка выпучилась на протяжении 135 м с прогибом в 0,28 м, скользя по основанию. Хотя кварцевый песчаник не был особенно прочным, и связь между горизонтальными пластами, пересеченными трещинами и прослойками глины, представляла еще меньшее сопротивление, однако это движение удалось приостановить помощью контрфорсов. Пять лет спустя средняя и верхняя части плотины обрушились (наполовину опрокинулись, наполовину обвалились).

Платина Nabra в Алжире. Высота запруды 27 м. В долине Nabra пласты песчаника небольшой мощности, с падением в 15° по направлению долины, налегают на пласты глинистых сланцев с падением в 45° в том же направлении. С площади основания плотины пришлось удалить прослойки глины до большой глубины. Значительная утечка в районе правого плеча, чему содействовала сброшенная трещина, вызвала разрыхление сланцев и опускание стенки фундамента, особенно в стыке бокового крыла с центральной частью плотины.

Глина размягчилась в соприкосновении с водой и была вымыта многочисленными ключами. Перегруженная, ослабленная, подмытая плотина очень небольшой толщины и из мало прочного материала была смыта через одиннадцать лет после пуска в ход половодьем, которое пробило брешь длиной 140 м и глубиной 18 м.

Grands Cheurfas (высота запруды около 30 м) возведена на оси антиклинальной складки миоценового известняка с перемежающимися глинистыми и мергелистыми пластами. На правом склоне долины напластование было нарушено и прорезано трещинами, заполненными песком. Они были причиной образования ключей еще при сооружении плотины в январе 1885 г. и привели уже 8 февраля к обвалу берега долины и части плотины длиной 10 м.

Относительно причины этих обвалов не может быть сомнений. Провести же сколько-нибудь резкую границу между надежными и сомнительными основаниями, например, между грунтом постройки плотины Ostertal и плотины Nabra или плотины Gotha и плотины Grands Cheurfas, очень трудно. До тех пор пока упругие свойства глинистых сланцев, сланцевых глин и мергелей не изучены подробнее, решения подобных вопросов будут всегда носить более или менее произвольный характер.

<sup>1</sup> P. Ziegler. Die tatsächlichen Gefahren des Unterdruckes. Zeitschr. f. Bauwesen, S. 408, 1916 u. S. 147, 670, 1917.

#### 4. ПЛОТИНЫ, ОСНОВАННЫЕ НА НАНОСАХ.

Если по техническим или хозяйственным соображениям невозможно опереть плотину снизу хотя бы при помощи зуба на коренную породу, то прежде всего возникает опасность разрушения плотины вследствие прорыва основания (размывание) и затем опасность значительной утечки воды. При одинаковой ширине долины и при одинаковой конструкции плотины размеры обеих опасностей зависят в большой степени от условий залегания несцементированного заполнения долины (наносов).

Н. Е. Gruner из Базеля сообщает нам интересный в этом отношении случай; он касается основания плотины Pointis на реке Гагонпе. В этом месте под руслом реки Гагонпе протекает мощный поток грунтовых вод. Верхний зуб в виде железной шпунтовой стенки опущен до самой грунтовой воды, что уничтожает гидростатическое давление под плотиной, несмотря на гравий. Проверка правильности таких соображений была произведена следующим образом: в одной из строительных выемок был сильный приток воды из реки. Когда из этой выемки опустили шурф до грунтовой воды, то вся вода ушла туда.

**Механика прорыва основания.** Чтобы оценить влияние строительного грунта на опасность прорыва основания, нужно прежде всего выяснить те явления, которые приводят к прорыву в простейшем случае, т. е. при вполне плоской поверхности фундамента и при совершенно однородном, равномерно пропускающем воду наносе. Эти явления были изучены Terzaghi как экспериментально, так и теоретически и представлены математически на основании теории потоков подземных вод Forchheimer по изотермическим семействам кривых. Согласно результатам этих работ, окончательная причина прорыва основания состоит в том, что давление потока просачивающейся воды направлено вверх и действует против силы тяжести. В тот момент, когда это наступит, плотное или наполовину плотное залегание зерен наноса переходит в местах преодоления силы тяжести в самое рыхлое, и материал становится подвижным, начиная с места первого разрыхления и распространяясь постепенно под основанием плотины вверх по течению.

Место, где опасность возникновения разрыхления больше всего, зависит между прочим от поперечного сечения плотины, и его можно определить из хода линий тока (рис. 64). Линии тока представляют собой пути, по которым частицы воды направляются из запруженного бассейна в пропускающий воду грунт, до выхода в подводной части ниже плотины. Из этого определения линий тока вытекает само собой, что количество воды, текущее между двумя линиями тока, остается одинаковым на всем протяжении от верховой до низовой подводной части плотины.

Если кроме того выбрать линии тока так, чтобы количество воды протекающее между каждыми двумя линиями тока, всегда было то же самое, то густота линий тока, т. е. число линий тока на единицу длины кривых одинакового гидростатического давления (пунктирные кривые рис. 64), будет мерой как для скорости течения просачивающейся воды, так и для давления, которое оказывает поток этой воды. Чем меньше расстояние между линиями тока, тем

быстрее течет просачивающаяся вода, и тем больше давление, которое она оказывает.

Рис. 64 а и в изображает такие линии тока для двух простейших случаев, для шпунтовой стенки и для плотины с горизонтальной

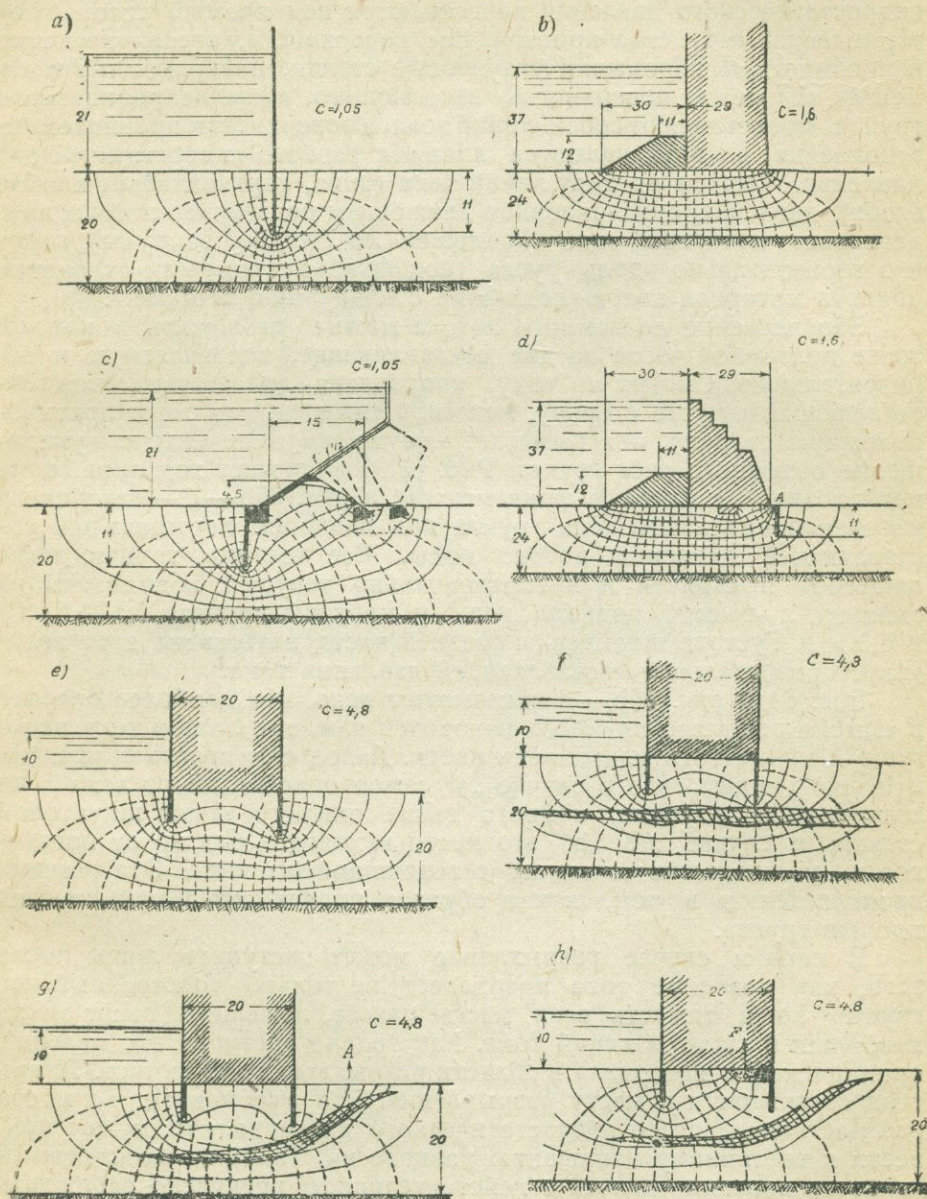


Рис. 64. Расположение линий тока воды (сплошные линии) и линий одинакового гидростатического давления (пунктирные линии) в подземной части плотин, заложённых на фильтрующем основании (по Терцаги).

плоскостью фундамента. Пунктирные линии дают линии равного гидростатического давления, т. е. если ввести в грунт пьезометрические

трубки с непроницаемыми стенками так, чтобы их открытые нижние концы были расположены вдоль одной из пунктирных линий, то во всех трубках вода поднимается до одной и той же высоты. Согласно теории движения подземных вод, линии тока и линии равного гидростатического давления пересекаются под прямым углом (изотермические семейства кривых). Все поверхности, ограничивающие непроницаемые перемычки (шпунтовые стенки, поверхности фундамента), так же как поверхность залегающего ниже непроницаемого грунта, представляют собою линии тока, а поверхности проницаемого заполнения долины являются линиями равного гидростатического давления. Смотря по ходу линий тока (вниз, горизонтально или же вверх), давление, обусловленное движением подземного потока, придавливает материал вниз (подножие со стороны запруды), гонит его горизонтально вдоль русла (под фундаментом) или стремится поднять материал вверх (подножие с воздушной стороны).

Это давление подземного потока можно разложить в каждой точке подземной части на две составляющие, вертикальную и горизонтальную. Смотря по тому, направлена ли вертикальная составляющая в ту же сторону, как сила тяжести, или же в противоположную сторону, она вызывает кажущиеся увеличение или уменьшение объемного веса грунта. Рис. 65а изображает ход линий тока под плотиной с плоским фундаментом, а рис. 65b—d—кажущиеся изменения объемного веса грунта под влиянием вертикальной составляющей давления потока воды. Все частицы грунта, находящегося в стоячей и в горизонтально текущей воде, взяты за единицу, а высота подпора воды у плотины принята за 1,5, 3,0 и  $6,0 \times b$ . Густота штриховки средней части диаграммы дает величину горизонтальной составляющей давления тока.

Рис. 64 и рис. 65b—d показывают ясно, что наиболее опасное в смысле разрыхления место находится там, где линии тока всего гуще и кроме того направлены вверх. Далее, если сравнить рис. 64а и b, то увидим, что в случае „а“ самое опасное место лежит на значительной глубине, немного выше нижнего конца шпунтовой стенки; в случае же „b“ это место находится близко от поверхности, у подножия плотины с воздушной стороны. Эта разница проявляется и в том, каким образом происходит в этих случаях прорыв грунта.

В первом случае разрыхление может наступить лишь после того, как давление тока преодолет не только собственный вес грунта, но и тяжесть всей массы наноса, лежащего выше места наибольшей густоты линий тока. Как только наступит это явление, проницаемость материала в области разрыхления возрастает. Линии тока расширяются к месту разрыхления. Это увеличивает во много раз местное действие гидростатического давления, что может привести к внезапному нарушению равновесия. Такой насильственный характер явления удалось в действительности прекрасно наблюдать на опыте с моделью. Пока не была достигнута критическая высота подпора воды, масса, по которой протекала вода, находилась в полном равновесии, и из наблюдений над просачиванием можно было видеть, что структура песка оставалась совершенно неизменной. Когда же перешли за критическую высоту подпора, материал с воздушной стороны шпунтовой стенки вспучился кверху на большом

протяжении, и несколько мгновений спустя грунт был снесен вниз по течению. Так как нарушение равновесия происходит вследствие преодоления давления силы тяжести неразрушенных масс грунта, то Terzaghi обозначает этот случай как „Erddruckgrundbruch“ (прорыв основания).

Во втором случае (рис. 64b) прорыв основания начинается с образования небольших ключей, выбивающихся с воздушной стороны

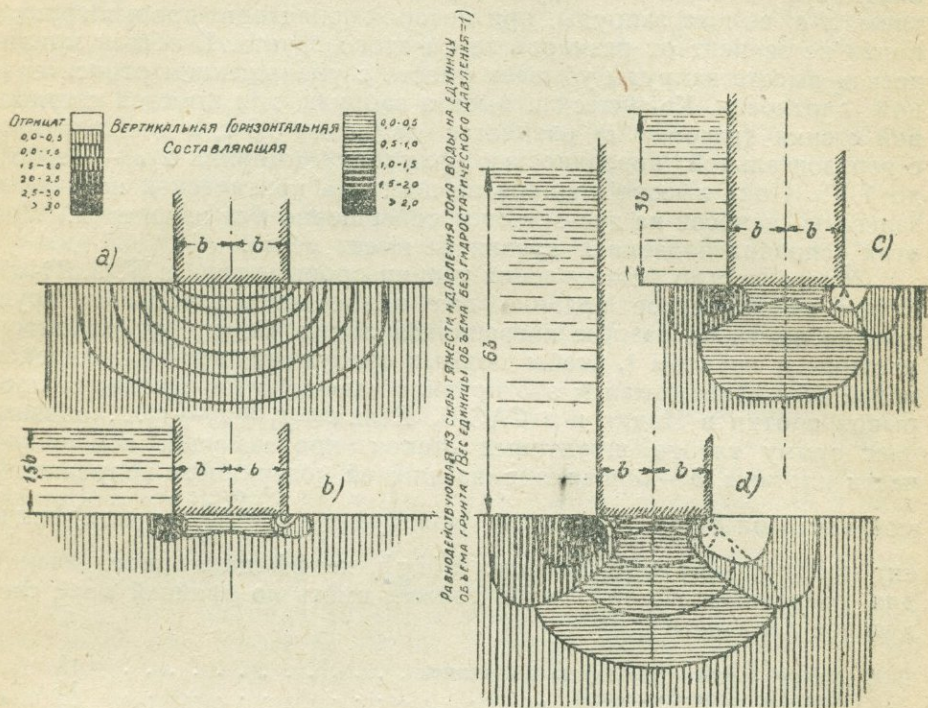


Рис. 65. а) Расположение линий тока воды под плотиной с плоским фундаментом. б—д) Величина давлений, получающихся при совместном действии веса грунта и давления фильтрационного тока на грунт при различной высоте подпора.

у подножия плотины. В первой стадии образования ключа зерна наноса пляшут в ключе вверх и вниз. При дальнейшем увеличении высоты запруды около ключей образуются маленькие песчаные холмики, указывающие на отступающую эрозию. Прорыв дна происходит внезапно и с большой силой, причем под плотиной образуется широкая эрозионная канава с мульдоподобным сечением (эрозионный прорыв грунта)<sup>1</sup>. Внезапное начало прорыва грунта, на-

<sup>1</sup> Подробное изложение теории прорыва грунта находится у Terzaghi. *Erdbaumechanik*, S. 128—131. Wien, 1925. На рис. 62 к стр. 370 той же книги имеется ошибка, на которую любезно обратил внимание автора советник министерства А. Вiegbaumer. Количество воды, просачивающееся под изображенной на этом рисунке плотиной, при высоте воды в 5 м, равняется не 640, а 2230 л в минуту, а количество воды, проникающее между двумя линиями тока, равно 250 л в минуту. Остальные данные верны.

блюдаемое на моделях, неоднократно отмечалось и очевидцами катастрофических прорывов грунта в большом масштабе.

**Влияние условий залегания грунта на вероятность прорыва основания.** Теория прорыва основания, извлечения из коей были здесь даны, приводит между прочим к следующим заключениям, совпадающим с результатами лабораторных опытов, произведенных с равномерно залегающим песком. При одинаковой относительной плотности проницаемого грунта критическая высота подпора у плотины, т. е. высота запруды, при которой происходит прорыв грунта, почти не зависит от размеров зерен этого грунта. В общем критическая высота запруды убывает вместе с уменьшением относительной плотности. Критическая высота запруды для простой шпунтовой стенки (глубина  $t$ ) равняется от 2,4 до 3,5  $t$ , а для плотины с горизонтальной поверхностью флютбета (ширина  $2b$ ) — от 0,95 до 1,4  $b$ . Пока высота подпора не достигла критической величины, залегание наносов на дне остается совершенно без изменения, При этих условиях подземная эрозия не имеет места.

Много лет до установления теории прорыва грунта W. G. Bligh вывел эмпирическое правило для наименьшей длины, которую должна иметь на разрезе пограничная линия между фундаментом плотины и грунтом <sup>1</sup>, чтобы подмыв сооружения просачивающейся водой был невозможен <sup>2</sup>; это правило выведено на основании прорывов плотин в Индии и в САСШ. Если  $t = t_1 + t_2 + t_3 \dots$  обозначает сумму глубин шпунтовых стенок, пререзающих подземную часть плотины,  $b$  — общая ширина нижней поверхности непроницаемой части плотины,  $h$  — высота подпора и  $c = \frac{2t + b}{h}$  коэффициент просачивания <sup>3</sup>, то, согласно Bligh, коэффициент просачивания для различных видов грунта должен иметь по крайней мере следующие величины:

Мелкий песок и пылевидный суглинок . . . . .	18
Мелкий песок со слюдой . . . . .	15
Грубый песок . . . . .	12
Гравий и песок . . . . .	9
Глыбы со щебнем и песком . . . . .	от 4 до 6

Если же вычислить коэффициент просачивания, при котором должна наступить катастрофа прорыва грунта как на основании теории такого прорыва, так и из опытов с совершенно однородным песком, то получим для простой шпунтовой стенки  $c$  от 0,57 до 0,85 и для запруды с плоским основанием  $c$  от 1,43 до 2,1, причем значение  $c$  не зависит от размеров зерна и является функцией только от относительной плотности. Это дало бы, при четырехкратном коэффициенте безопасности, для шпунтовых стенок значения  $c$  от 2,3 до 3,4 и для плотин с плоским флютбетом значения  $c$  от 5,7 до 8,4.

<sup>1</sup> Прим. ред. Ширина флютбета.

<sup>2</sup> W. G. Bligh. Dams, barrages and weirs on porous foundation. Engin. News, III, p. 708, 1010.

<sup>3</sup> Прим. ред. Обратная величина  $1/c = \frac{h}{2t + b}$  является несомненно гидравлическим уклоном или градиентом ( $J_{кр}$ ).

Часть очевидного противоречия между теорией и правилом, выведенным из опыта, можно объяснить тем, что теория предполагает правильно спроектированное и безукоризненно выполненное сооружение, тогда как Blich брал свои данные из прорывов плотин, которые в конструктивном отношении были столь же мало безукоризненны, как изображенные на рис. 64с и d. Чем мельче зерно наноса и в особенности, чем однороднее грунт (низкий коэффициент неоднородности), тем легче он становится подвижным, и тем опустошительнее действуют конструктивные ошибки. Дальнейшая причина противоречия лежит в том обстоятельстве, что как теория, так и опыт относились исключительно к вполне однородным грунтам, тогда как в природе грунт никогда не бывает однородным, а состоит из слоев разной проницаемости. В таком грунте поток просачивающейся воды сосредоточен в сравнительно узко ограниченных путях. Сюда присоединяется еще то обстоятельство, что на границе между мелкозернистыми и грубозернистыми слоями наносов может проявляться действие эрозии, что в совершенно или почти однородном материале невозможно по чисто механическим причинам. Ход такой эрозии и роль, которую играют пузырьки воздуха при ее возникновении, были изучены A. Læfeg<sup>1</sup> на опытах.

Существующая при неравномерном грунте возможность постепенного изменения структуры наноса и условий проницаемости, благодаря перемещению и осаджению материала, является обстоятельством, имеющим очень большое значение. Вполне однородный, например, состоящий из песка грунт, плотно прилегающий к нижней поверхности фундамента плотины, при данной высоте запруды или пропускает воду, не испытывая с течением времени ни малейшего изменения, или же немедленно после достижения высоты критического подпора уносится из-под плотины. Промежуточного состояния нет, время не входит в рассмотрение как фактор. Это вытекает из чисто теоретических соображений и было подтверждено опытами.

В противоположность этому структура и проницаемость грунта, состоящего из различных наносов, меняются с течением времени, причем поверхности, разграничивающие отдельные пласты наносов, являются поверхностями наибольшего перемещения материала. Грунт становится или лучше или хуже, по крайней мере в течении первых лет действия плотины, и стационарное состояние устанавливается только постепенно. Изменения, идущие в грунте, отражаются на результатах наблюдений над пьезометрическими трубками, как видно, например, из наблюдений, организованных U. S. Reclamation Service для двух плотин, сооруженных на фильтрующем основании<sup>2</sup>.

Имея в виду ненадежность предположений, на которых основывается проектирование фундаментов плотин и большую вероятность постепенного изменения условий проницаемости, следовало бы снабдить все плотины, сооруженные на проницаемом грунте, пьезоме-

<sup>1</sup> Lassenbildung und deren Verheilung. Die Wasserwirtschaft, Jg. 1927, Heft 24.

<sup>2</sup> I. Hind. Upward Pressure under Dams. Proc. Am. Soc. of Civ. Eng. März, 1928. Diskussion, Terzaghi, loc. cit. August, 1928.

трическими трубками и следить за ними до наступления хотя бы приблизительного стационарного состояния.

Чтобы показать, насколько сильно может влиять слоистость грунта на размеры опасности прорыва и оседание основания, обратимся к рис. 64e — g. В случае „e“ мы имеем вполне однородный грунт. В случае „f“ было предположено, что грунт содержит почти горизонтальную линзу более грубого материала, в случае „g“ эта линза поднимается в сторону течения реки. Чертежи для линий тока в этих трех случаях почти не имеют ничего общего между собой, и то же самое можно сказать и относительно безопасности обвала основания. В первом случае наиболее опасное в смысле прорыва место находится у самой шпунтовой стенки, во втором случае оно распространяется на широкую зону, причем, кроме того, присутствие более грубого слоя почти уничтожает значение увеличенной толщины плотины. В третьем случае прорыв может произойти в точке А, на значительном расстоянии от подножия плотины с воздушной стороны и при гораздо меньшей высоте подпора, чем в двух первых случаях.

Чтобы уменьшить опасность обвала основания, Terzaghi предложил устраивать в защищенном месте плотины фильтр (F) и отвести таким образом часть просачивающейся воды от угрожаемых мест к такому участку, где давление потока воды компенсируется весом сооружения <sup>1</sup>. Рис. 64h изображает действие такого фильтра на ход линий тока. Оно состоит главным образом в уменьшении густоты линий тока в тех частях грунта, где давление потока воды могло стать опасным. Это действие не зависит от условий напластования и выражается поэтому в процентном уменьшении опасности прорыва.

Кроме того, постоянные измерения высоты воды в пьезометрических трубках фильтра дают сведения относительно существующих в подземной части плотины условий гидростатического давления; по изменению этих условий можно своевременно заметить размывание, которое может быть началось в грунте под плотиной. В Австрии такими фильтрами были снабжены плотина бумажной фабрики Gratwein, плотина Kellner-Partington Paper Pulp Co в Hallein и перестроенный шлюз в Erlauf.

При конструктивной разработке фильтров нужно однако принимать в расчет, с одной стороны, опасность вымывания мелких частиц через поры фильтра и, с другой стороны, возможность заполнения пор в фильтре образующимися вновь химическими осадками.

Первую опасность можно обойти соответственным подбором величины зерен. Вторая опасность угрожает тогда, когда вода содержит значительное количество растворенных веществ. При постройке шлюза на канале Hemelingen-Bremen для уничтожения гидростатического давления под подошвой шлюза был устроен фильтрующий слой <sup>2</sup>. Три года спустя после пуска в ход дно шлюза было

<sup>1</sup> Австрийский патент 1923 г.

<sup>2</sup> O. Franzius. Der Unfall an der Schleppzugschleuse Hemelingen-Bremen, dessen Ursachen und die Wiederherstellung der Schleuse. Zentralbl. d. Bauverwal., S. 146, 159, 1914.

поднято вверх гидростатическим давлением и взорвалось. Обследование, произведенное после этого случая, показало, что поры фильтра были совершенно заполнены красноватым железистым шламмом. Этот железистый шламм образовался при происходившем в фильтре смешении железистой грунтовой воды и воды из р. Weser, содержащей воздух. Для плотин такая возможность имеет меньше значение, потому что фильтр устраивается исключительно в качестве меры предосторожности, для уменьшения гидравлического действия грубозернистых прослоек. Если в фильтре образуется железистый шламм, то он образуется и в естественных грубозернистых прослойках, потому что грубозернистые прослойки являются не чем иным, как фильтрами, установленными природой помимо нашей воли и часто без нашего ведома в невыгодных местах и уменьшающими безопасность сооружения в отношении прорыва основания. Это уменьшение безопасности по сравнению с надежностью плотины, поставленной на однородном грунте, не поддается более или менее точному расчету.

Если поры естественных фильтров тоже заполняются шламмом, то наша мера предосторожности становится автоматически ненужной. По причинам, приведенным выше, хорошо устроенный и разработанный фильтр в худшем случае не влияет на опасность прорыва основания.

Вредным он не может быть ни при каких обстоятельствах, поскольку в нем нет никаких конструктивных ошибок.

**Примеры прорыва основания.** В виду большой неопределенности наших расчетов степени благонадежности в отношении прорыва грунта; проистекающей от невозможности точного предварительного определения условий залегания и проницаемости грунта, всякий катастрофический прорыв основания прибавляет ценный вклад к нашему запасу знаний в этой области. Ниже следует сводка поучительных случаев.

Плотина Puentes на реке Guadalantín в Испании, 1792 г. Высота запруды 50 м, ширина основания 46 м с водобойной частью (Sturzbett) шириной в 40 м, непосредственно соединенной со стеной плотины. Грунт состоял из грубого щебня, заполнявшего расщелину в скале, шириной в 20 м. Водобойная часть и тело плотины покоились на сваях длиной 6,7 м. Вскоре после окончания стройки в сбросном канале появилось просачивание воды, а потом в русле реки образовались ключи. Пять лет спустя после пуска в ход, постройка была разрушена прорывом основания. Плотина образовала арку над размытой брешью <sup>1</sup>.

Pittsfield Mass. Железобетонная постройка, высота подпора 12 м, ширина основания 14,4 м, зуб со стороны воды глубиной 2,1 м, зуб с воздушной стороны глубиной 2,7 м. Грунт до глубины около 10 м состоял из гравия и глинистого песка. Эрозионный прорыв основания; эрозионный канал глубиной 7 м, шириной 16 м. Часть плотины повисла над ним в виде моста <sup>2</sup>.

Hauserlake, плотина с высотой подпора 21 м. Грунт до глу-

<sup>1</sup> P. Ziegler. Die tatsächlichen Gefahren des Unterdruckes. Zeitschr. f. Bauwesen, S. 408, 1918.

<sup>2</sup> P. Ziegler. Ibid.

бины 20 м состоял из галечника. Шпунтовая стенка со стороны воды до глубины 11 м. С воздушной стороны приподнятая кверху железобетонная диафрагма, подпертая железной конструкцией с цокольным основанием (рис. 64с). Наброска комня в пространстве между диафрагмой и подошвой русла шириною в 15 м, высотой 4,5 м. Прорыв основания в апреле 1908 г., через год после постройки; перед этим у нижнего подножия каменной наброски— образование ключей. Прорыв грунта образовал канал глубиной по крайней мере в 15 м.

Плотина Elwha около Fort Angeles (рис. 64d) длиною 30 м, высота подпора 37 м, ширина основания 29 м. Коренная порода 25 м ниже дна долины. Грубый, сильно пропускающий воду гравий. Вследствие большого притока воды плотина заложена неглубоко, без шпунтовых стенок. Эрозионный прорыв основания в 1912 г., после удавшегося опускания стальной шпунтовой стенки глубиной от 9 до 12 м. Прорыв грунта образовал канал не менее 20 м глубиной<sup>1</sup>.

Dansville. Залегающий плотно гравий. Железобетонная плотина. Высота подпора 3,8 м, ширина основания 4,36 м, зуб со стороны воды 0,97 м, зуб с воздушной стороны 1,52 м глубины. Отверстия, промытые просачивающейся водой в плоскости основания. Разрушена в декабре 1909 г., два дня после подъема воды, вследствие гидростатического давления (провал в плоскости основания)<sup>2</sup>.

Причины прорыва основания у плотин Hauserlake и Elwha ясны без дальнейших объяснений из рис. 64с и d и из сравнения этих рисунков с рис. 64а и b.

Неправильные технические мероприятия вызвали местное сгущение линий тока, и эти искусственно вызванные места наибольшей густоты линий тока образовали исходные точки для катастрофы. Плотина Dansville дает пример того, что отдельные разрежающие отверстия еще далеко не могут заменить действие фильтра.

В качестве примеров прорыва основания для плотин с глинистым грунтом следует упомянуть плотину Stony River в West Virginia и плотину Macdonalton в Pennsylvania.

Плотина Stony-River. Железобетонная постройка. Наибольшая высота 15 м, наибольшая глубина зуба 12 м, наибольшая ширина основания около 22 м. В месте прорыва на глубине 10 м коренная порода еще не встречена. Грунт состоял из „Hardpan“, чрезвычайно плотно залегающей смеси глины, песка и гальки. Внутреннее ядро плотины толщиной 0,9 м, глубиной 1,5 м. На 2,4 м под плотиной находилась горизонтальная трещина, заполненная углем и глинистым песком. Несчастье, повидимому, произошло от начавшегося от трещины размягчения грунта (см. рис. 62b), вблизи места прорыва „Hardpan“ был совершенно размягчен и оказался почти без связи<sup>3</sup>.

Плотина Macdonalton, Pa., массивная каменная плотина. Высота подпора 5 м; основание 4,5 м. Две трети сооружения, длиной 130 м,

<sup>1</sup> Engin. News, April 30, 1908.

<sup>2</sup> P. Ziegler. Loc. cit.

<sup>3</sup> Failure of Stony-River Dam. Engin. Record, I p. 115, 1914.

покоились на жесткой глине, одна треть на мергеле. Глубина основания 1,4 м, без шпунтовой сценки.

Трещины в грунте заполнены шламмом и глиной. Полтора месяца после пуска в ход образование трещин в плотине и вскоре после того обвал дна. Эрозионный канал шириной 7,5 м и 1,8 м глубины, плотина образует над ним свод. Трещины в плотине во всяком случае вызваны размягчением глины, согласно рис. 62 б, а эрозия произошла вследствие вымывающего действия воды вдоль пересекающей плотину трещины.

**Потери воды вследствие просачивания.** Благодаря основным работам Forchheimer<sup>1</sup> мы имеем возможность вычислить потери воды из запруженного бассейна, вызванные просачиванием в грунт. Формулы Forchheimer предполагают, однако, вполне однородный характер грунта, как это принято и в наших формулах для вычисления безопасности относительно прорыва основания. Чтобы сделать шаг от теории к практике, нужно прежде всего вывести из данных геологических и физических предварительных изысканий среднее значение для проницаемости грунта; другими словами, необходимо знать коэффициент проницаемости вполне однородного грунта, который в отношении проницаемости ведет себя приблизительно так же, как встреченный в действительности нанос с неправильным напластованием. Для решения этой задачи необходимо вскрыть геологическое строение района разведочным бурением или разведочными шурфами, установить последовательность залегания пластов, определить проницаемость отдельных пластов на опыте и, наконец, вывести из данных этих опытов среднее значение проницаемости свиты пластов. Рис. 66 и 67 служат для выяснения этого метода.

В случае, соответствующем рис. 66, нужно было спроектировать плотину высотой 18 м для водоснабжения Chicopee, Mass. Грунт состоял до глубины около 25 м ниже дна долины из мелкозернистых песков, залегающих очень плотно и в то же время очень подвижных. Геологически этот комплекс пластов являлся состоящим из последнедевонских отложений дельты реки Chicopee, текущей с востока. Уровень воды в озере Springfield-See, в котором образовалась дельта, стоял около 50 м выше современного дна долины. Между подошвой отложений дельты и поверхностью твердой породы залегает прослой песка и щебня мощностью около 1 м, содержащий артезианскую воду. После обследования склонов долины при помощи разведочных шурфов были заложены буровые скважины №№ 1—9. Как только менялся характер грунта, буровой аппарат поднимался вверх и заменялся приспособлением, подававшим породу песка в неразмытом состоянии<sup>2</sup>. Опыты над водопроницаемостью, произведенные с пробами, дали цифровой материал, нужный для вычерчивания схемы проницаемости (рис. 66). Из этой схемы были прежде всего получены средние значения, необходимые для расчетов; затем при помощи формулы Forchheimer была вычислена глубина, до которой нужно опустить шпунтовую

<sup>1</sup> Ph. Forchheimer. Zur Grundwasserbewegung nach isothermischen Kurvenschaaren. Sitzber. Akad. d. Wissensch. Abt. IIa, Bd. 126, Heft 44, 1927.

<sup>2</sup> Прим. ред.—грунтоноска.

стенку, чтобы утечка воды оставалась в допустимых пределах. При расчетах, конечно, делались самые невыгодные предположения,

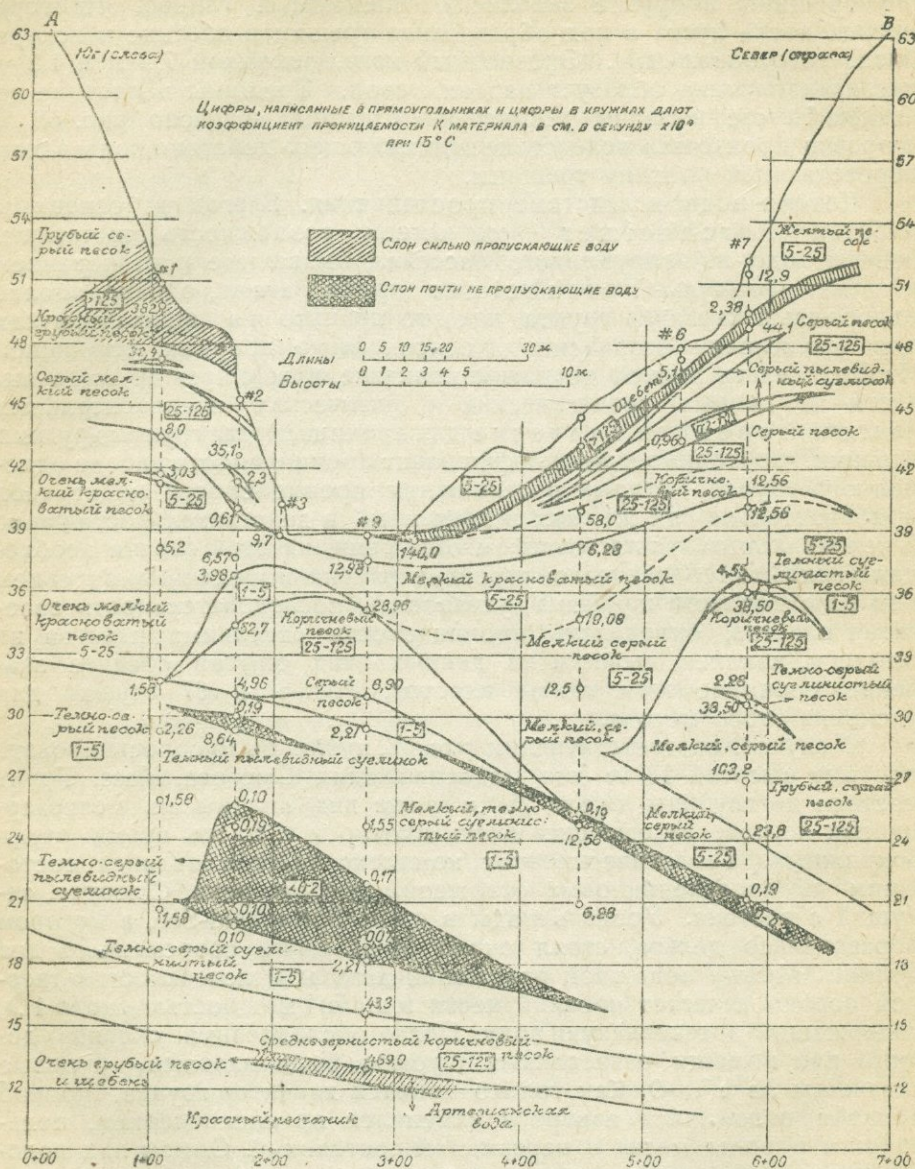


Рис. 66. Наглядное изображение водопроницаемости грунта для плотины Chicopee, Mass. (по Терзаги).

которые можно принять при данных геологических условиях. Плотина уже выстроена, и измерения показали, что утечка воды значительно ниже той границы, которая считалась допустимой <sup>1</sup>.

<sup>1</sup> K. Terzaghi. Un-veröffentlichtes Gutachten.

Рис. 67 характеризует данные по западному склону одной долины в Massachusetts. Этот склон должен был служить западной границей запруды и в то же время опорой для западного плеча плотины высотой 30 м. Нанос, из которого состоит этот склон долины, является отложением перемытого материала оз и переходит на севере в типичные озы. Состав отложений меняется особенно в вертикальном направлении самым неожиданным образом. Кроме того, нанос содержал большое количество валунов гранита и гнейса, которые, очевидно, сваливались с тающих льдин во время образования наноса и падали на дно. Поверхность низкого плато, отделяющего область этой долины с западной стороны от соседней долины, покрыта ложбинами, имеющими вид слепых долин, указывающих места, на которых оседали айсберги и, наконец, таяли. Целью предварительных изысканий было отыскание места, наиболее благоприятного для заложения плотины, а также оценка утечки воды вследствие просачивания из запруженного бассейна под плато в соседнюю долину. Буровые работы пришлось бросить из-за многочисленных препятствий, находящихся в грунте. Выемка проб грунта производилась в разведочных шурфах, расположенных на склоне долины вдоль профилей I до VIII. Механический анализ ясно показал, что направление и скорость течения во

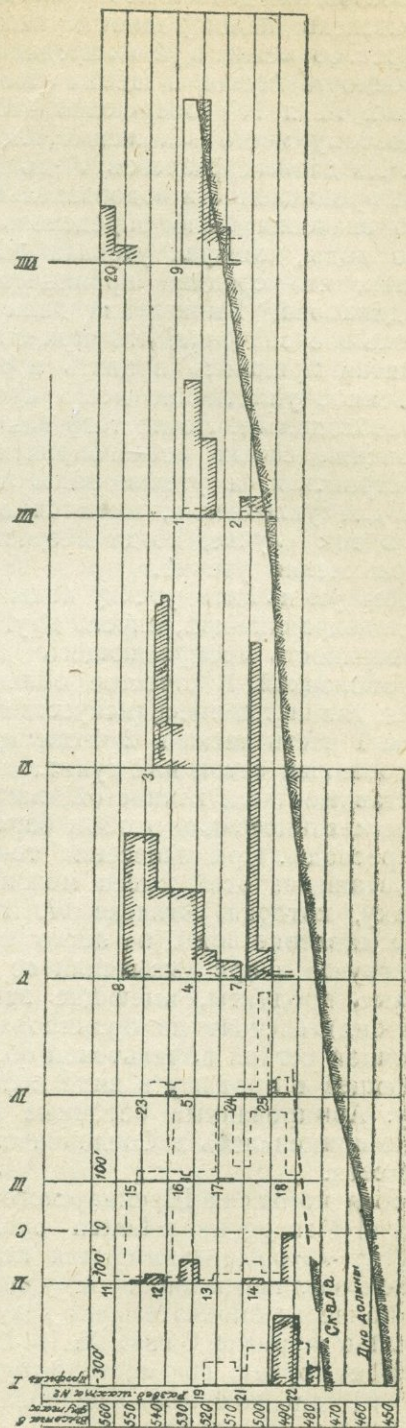


Рис. 67. Нарядное изображение грунта для западного склона водохранилища Granville, Mass. Абсциссы сплошных линий дают коэффициенты проницаемости (1 см = 0,03 см в секунду при 15° C), а пунктирные линии — коэффициенты неоднородности (1 см = 120) по Терцаги.

Время образования дельты постоянно менялись в самых широких пределах. Степень неоднородности песков и пылевидных суглинков дельты (рис. 66) лежит в узких пределах от 1,5 до 4, в то время как неоднородность песков и щебня (рис. 67) доходит от 1,5 до 100. В разрезах III и IV совершенно отсутствуют пропускающие воду слои. Поэтому место заложения плотины было выбрано на этом отрезке. Из данных разрезов V до VIII было определено среднее значение проницаемости водораздельного плато, при помощи этого среднего значения было определено по правилам гидравлики количество воды, которая утекала бы в соседнюю долину в предположении, что средняя проницаемость водораздельного плато везде одинакова. Вычисления дали для потери на просачивание такое большое значение, что при составлении финансовой сметы предприятия пришлось принять в расчет возможность того, что искусственное уплотнение всего пропускающего воду склона окажется необходимым. После того как потери воды были вычислены на основании самых неблагоприятных предположений, плотина начала строиться, и утечка воды измеряется на опыте. Суммы, нужные для уплотнения, имеются в распоряжении, но их тратят только в том случае, когда возрастающий спрос на воду требует ограничения утечки.

Чтобы уменьшить утечку воды в существующих уже или будущих водохранилищах, ничего другого не остается, как покрыть всю поверхность пропускающего воду материала водонепроницаемой оболочкой. В качестве облицовочного материала особенно пригодны глинистая смесь (искусственная смесь из 1 части по объему глины на 1 часть песка и 2 части гравия), асфальтовые продукты и армированный бетон или гунит.

Составные части глинистой смеси (Lehmpuddle) должны быть смешаны механически в особом барабане, что значительно увеличивает расходы. При нанесении тонким слоем и укатывании или утрамбовании из этой смеси можно во всяком случае получить облицовку, которая, согласно W. Hugentobler, „выдерживает большое давление воды, не легко трескается при небольших движениях грунта и при высыхании не дает глубоких разрывов“. Асфальтовые продукты, имеющие значение для целей уплотнения (асфальтоид), состоят из бронированной английским джутом или проволочной сеткой асфальтовой оболочки толщиной от 2 до 10 мм, поступающей в продажу в виде полос в 1 м ширины и от 6 до 10 м в длину. Армированные бетонные и гунитовые облицовки неоднократно применялись в Соединенных Штатах и, повидимому, оправдывают себя.

Особая комиссия Швейцарского союза водного хозяйства содержит в Manegg и в Letten около Цюриха исследовательские институты, которые занимаются главным образом сравнительным изучением различных способов уплотнения. Хотя до сих пор еще нельзя привести окончательных результатов, тем не менее опубликованный в журнале Союза № 15 1927 г. и составленный W. Hugentobler отчет об исследованиях, произведенных от 1915 до 1926 г., содержит много ценного относительно свойств разных уплотняющих материалов.

Земляные плотины. Не считая разрушения плотин, происходящих

от переливания воды через гребень, разрушение земляных плотин может произойти от просачивания воды сквозь тело самой плотины, от просачивания через грунт, или же от прорыва основания в чистом виде. Первая из упомянутых причин не имеет ничего общего с инженерной геологией, потому что существует лишь небольшое число сортов земли, из которых при правильном проектировании и при соответственном принятии в расчет физических свойств материала нельзя было бы соорудить прочной плотины. Причина разрушения насыпных плотин состоит или в чрезмерной крутизне откосов (земляная плотина Charmes высотой 15 м)<sup>1</sup>, или же в слоистости тела плотины, происходящей от утрамбования насыпаемого материала; вследствие этой слоистости между поверхностями наибольшего сжатия образуются многочисленные горизонты, пропускающие воду (запруды Апила в южной Венгрии, Weisse Desse в северной Богемии)<sup>2</sup>. Хуже всего поддаются расчетам плотины, построенные гидравлическим способом (намывные), неоднократно примененным в Соединенных Штатах. По Allen Hazen, действующая величина зерна средней части плотины не должна быть меньше 0,01 мм. Если следовать этому правилу, то появляется опасность, что сердцевина плотины будет содержать песчаные прослойки, пронизывающие ее по всей толщине и могущие послужить начальной точкой для разрушения плотины отступающей эрозией. Если, с другой стороны, действующий размер зерна значительно меньше предельной величины Hazen, то затвердевание сердцевины идет крайне медленно. Terzaghi имел возможность исследовать сердцевину трех плотин, построенных гидравлическим способом. Все три плотины были старше десяти лет, и владельцы считали их вполне затвердевшими. Во всех трех случаях содержание воды в ненарушенных пробах было выше, чем предел текучести<sup>3</sup>.

Повидимому, откосы плотины, сооруженной гидравлическим способом, должны быть значительно более пологи, чем откосы простой насыпанной плотины с той же степенью благонадежности, так что экономия, связанная с применением гидравлического способа, связана с уменьшением благонадежности. Во всяком случае сейчас еще рано высказывать окончательное мнение относительно этого способа возведения плотин.

В качестве примера второго из упомянутых выше процессов разрушения можно привести обвал плотины Hatchtown в Utah<sup>4</sup>. Высота 18 м, откос со стороны подпора 2:1, с воздушной стороны — 2,5:1. Грунт на глубину 0,6 до 2,4 м — мелкий песок и гравий, восточный склон — слоистая последовательность песков и гравия. В 1910 г. после постройки заметный приток воды и оползни на восточном склоне. Последние ликвидированы каменными подпорными стенками. Западная сторона долины насыщена водой благодаря искусственному орошению плоскогорья. В 1914 г. появился сильный ключ у подножия плотины с нижней стороны недалеко

<sup>1</sup> J. Résal. Poussés des terres, 2-me parte. Paris, 1910.

<sup>2</sup> Schaffernack, F. Über Standsicherheit durchlässiger, geschütteter Dämme. Mittheilung der Versuchsanst. für Wasserbau im k. k. Min. f. öffentl. Arbeiten. 3. Folge, Wien, 1918. См. также Allgemeine Bauzeitung, Heft IV, 1917.

<sup>3</sup> Terzaghi. Erdbaumechanik, S. 378—382.

<sup>4</sup> J. Jenson. Break in Hatchtown dam. Engin. Record, 1, p. 726, 1914.

от спускной трубы. Два часа спустя—прорыв плотины вследствие отступающей эрозии, связанной с оползанием массы земли, лежащей выше места эрозии. После обвала на западном склоне на 12 м выше подошвы и в 30 м от места образования первого ключа обнаружен ключ, дававший 7 л в секунду.

Третий процесс (прорыв грунта в чистом виде) случается в земляных плотинах так же часто, как и в плотинах массивных, и идет тем же путем.

Рис. 68 изображает действие прорыва основания на плотину Langewald. Прорыв случился при сооружении плотины в долине, параллельной тому оврагу, разрез которого изображен на рис. 66,

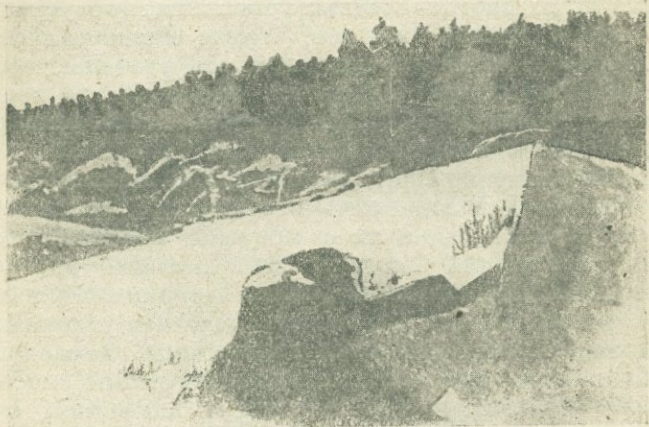


Рис. 68. Прорыв основания плотины Langewald у Chicopee, Mass.

Прорыв грунта начался с образования ключей у нижнего подножия плотины и произошел через несколько лет после постройки. Остаток плотины образует свод над местом обвала.

Плотина Jumbo, около Sedgwick, Colorado, высотой 15 м, на горизонтально залегающих пластах песчаника. Гнезда песка в трещинах между слоями. Прорыв плотины вследствие гидростатического давления внутри породы с нижней стороны подножия плотины. Объем поднятых кверху глыб песчаника 30 м<sup>3</sup>.

Причина прорыва плотины Horse-Creek в Colorado подобна предыдущим. Высота 12 м, откос со стороны подпора 1,5 : 1, с воздушной стороны 2 : 1. Грунт—песчаник с горизонтальным напластованием. Прорыв дна при первом заполнении, высота подпора 5,1 м. Обвал прорыл в грунте брешь шириной в 55 м и глубиной в 9 м<sup>1</sup>.

Так как вторая и третья возможности разрушения, приведенные выше, в большой мере зависят от строения грунта, т. е. от того, в какой последовательности залегают слои, пропускающие и не пропускающие воду, то проектирование мер предосторожности требует тщательного обсуждения местных геологических условий. Коль скоро имеется ясное представление об условиях проницаемости

<sup>1</sup> N. L. Hall and J. E. Field. Failure of Horse Creek Dam in Colorado. Eng. Record, I, p. 205, 1914.

и строении грунта, то имеется и возможность успешно бороться с грозными опасностями.

В качестве примера упомянем плотину, выстроенную по указаниям Terzaghi<sup>1</sup> на грунте, подобном указанному на рис. 66. Грунт был настолько подвижен, что строительная выемка для фундамента (Sperrschieberturm) башенного водоспуска два раза проваливалась вследствие прорыва основания. Даже в выемке, находившейся на 15 м выше дна долины, наблюдался плавучий песок, вследствие восходящих ключей, питавшихся от склона. Материал, имевшийся в распоряжении для сооружения плотины, состоял также из чрезвычайно однородного мелкого песка, легко переходящего в плавучее состояние. Чтобы помешать просачиванию сквозь плотину, последняя, высотой в 18 м, была снабжена железобетонной диафрагмой (Kerndamm) толщиной в 30 см, продолжением которой служила стальная шпунтовая стенка, накрепко с ней соединенная и опущенная на 6 м ниже дна долины. Глубина шпунтовой стенки была установлена методом, описанным на стр. 192, причем были приняты в расчет допустимые потери воды от просачивания. Независимо от этого были приняты меры для ограждения тела плотины от действия просачивающейся воды и от размывания снизу. Из расположения слоев в склоне долины было найдено, что наибольшая опасность образования ключей существует в левом склоне, на границе между мелким серым песком и грубым красным песком. Поэтому в пограничной области между этими песками уже сразу были устроены дренажи. Далее, ключи, встреченные при копании выемок на дне долины, были каптированы и отведены в дренажные трубы. Вся часть плотины, обращенная вниз по течению, была сооружена из самого грубого песка, имевшегося в распоряжении, так что тело плотины всюду лучше пропускает воду, чем грунт, на котором оно покоится. Наконец, после заполнения запруды ниже плотины были заложены буровые скважины, чтобы убедиться, что ни в одном из слоев грунта нет избытка гидростатического давления. В одном месте руководители постройки упустили из виду подобрать, согласно указаниям автора, величину зерна в фильтрах, уложенных вокруг дренажных труб. В этом месте произошел небольшой обвал, который затронул плотину от гребня до основания и ясно показал подвижность материала. Все другие мероприятия выполнили свое назначение, как это и ожидалось.

Из сказанного в этой главе вытекает, что степень благонадежности двух идентичных плотин, выстроенных на геологически как будто подобных грунтах, может быть весьма различна. Составление проекта должно производиться на основании самых неблагоприятных возможностей, вытекающих из данных геологических условий. Для оценки этих возможностей необходимо, во-первых, основательное знакомство с теориями давления токов воды и прорыва грунта, а во-вторых, производство обширных изысканий при помощи бурения и опытов над нагнетанием воды.

---

<sup>1</sup> M. G. Mansfield. Sand Ebankment impounding dam at Chicopee, Mass. Journal of the New England Water Works Ass., p. 244, 1927.

# ГЛАВА ПЯТАЯ. РАБОТЫ ПО ЗАКЛАДКЕ ФУНДАМЕНТОВ НА ТОРФЯНИСТЫХ ГРУНТАХ

К. ТЕРЦАГИ

Органические почвы, называемые торфянистыми отложениями или торфяниками, относятся к самым неблагоприятным строительным грунтам, потому что они соединяют большую сжимаемость со сравнительно высокой водопроницаемостью<sup>1</sup>. Почти так же плохи и глинистые осадки (гнилой ил, Faulschlamm), весьма часто встречающиеся под торфяниками. Эти осадки большею частью находятся в состоянии неполного затвердевания и ведут себя под влиянием местной нагрузки почти как вязкие жидкости.

К малой способности выдерживать нагрузку в случае торфяников присоединяется еще опасность вредного действия болотной воды на бетон.

Благодаря однообразию причин образования, торфяники в различных зонах и странах настолько схожи по своим физическим свойствам, что строительный опыт, накопленный в одной болотистой местности, можно перенести почти без изменений на все другие.

## § 1. КЛАССИФИКАЦИЯ ТОРФЯНИСТЫХ ГРУНТОВ.

Для технических целей удобна классификация торфяных грунтов, предложенная А. Р. Dachnowski<sup>2</sup> и приведенная в табл. IX<sup>3</sup>.

**Кашеобразный торф.** Образуется в стоячих водах (осадок с органическими частицами). Большею частью неслоистый, однако обладает большими колебаниями в составе. Содержание воды от 70 до 95% общего веса.

**Волокнистый торф.** Содержание воды от 85 до 95%. Часто слоистый. Переходы к кашеобразному торфу.

**Древесный торф.** Встречается слоями или образует целые залежи торфа значительной мощности. Все промежуточные члены между порошком, похожим на опилки, и до грубоволокнистых агрегатов, состоящих из ветвей. Образуется на влажных лесных почвах, периодически затопляемых водой. Иногда более длительные периоды роста леса и образования торфа сменяют друг друга.

**Озерный мел (Seekreide).** Коллоидальный или мелкозернистый торфяник с колеблющимся содержанием богатых известью растений и остатков раковин.

**Гнилой ил (Faulschlamm).** Неслоистый, состоит по большей

<sup>1</sup> Прим. ред. См. о водопроницаемости объяснение автора ниже.

<sup>2</sup> А. Р. Dachnowski. Stratigraphic Study of Peat Deposits. Soil Science, vol. XVII, № 2, 1924.

<sup>3</sup> Прим. ред. Табл. IX. не вполне соответствует описанию грунта в тексте.

Таблица IX.

## Классификация торфяных грунтов по А. Р. Dachnowski

Торфообразующие растения	Типы грунтов	Свойства	Цвет	Степень дисперсии	Структура
Водяные растения	Кашеобразный, коллоидальный	Кашеобразный	Оливково-зеленый, коричневый до черного	Крупнозернистый до коллоидального	Плотная непроницаемая гибкая пластичная до очень рыхлой
Болотные растения	Тростник, ситник, коричневый мох	Волокнистый	Серый, красный или желто-коричневый до красно-коричневого	Тонкий до грубоволокнистого	Плотная и войлокоподобная до пористой и губкообразной
Торфяные растения	Торфяной мох				
	вереск				
Древесная растительность	Ива и ольха, лиственный лес, хвойный лес	Деревянистый	Темнокоричневый до черно-коричневого	Крупнозернистый или стебельчатый	Плотная и зернистая до рыхлой и грубоволокнистой

части из минеральных частиц, богатых кремневой кислотой, и из кизельгура. Серый до серо-синего, пластичный и липкий, высокое содержание воды.

## 2. ДОРОЖНЫЕ И ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЕ НАСЫПИ НА ТОРФЯНОМ ГРУНТЕ.

Вследствие малой способности торфяников выдерживать нагрузку даже невысокие насыпи вдавливаются глубоко в почву или совершенно выжимают пласт торфа, так что объем части насыпи, находящейся ниже первоначальной поверхности земли, обычно значительно превышает объем надземной части.

В качестве классического примера упомянем прекрасно описанные F u e l c h e r постройки дамб по обе стороны от канала Kaiser-Wilhelm<sup>1</sup>. В Австрии были собраны наблюдения в этой области при постройке железной дороги из Bregenz в Götzis и в Vorerleberg. Данные о физических свойствах торфяников можно найти в уже много раз упомянутом заключительном отчете шведской Геотехнической комиссии.

Для подсчета стоимости железнодорожных насыпей, покоящихся на грунтах с малой способностью выдерживать нагрузку, в Америке были планомерно заложены буровые скважины, чтобы получить данные для определения общей кубатуры насыпей. Заключительный отчет оценочной комиссии содержит ценные данные, касаю-

<sup>1</sup> F u e l c h e r, Der Bau des Kaiser-Wilhelm--Kanales. Zeitschr. f. Bauwesen, 1897.

щиеся этого вопроса<sup>1</sup>. Указания относительно наблюдений при постройке железных дорог на тропических болотах можно взять из опубликованной статьи Нейл<sup>2</sup>.

При пересечении бразильских береговых болот, большей частью подстилаемых гнилым илом (Faulschlamm), поверхность торфяника до начала засыпки покрывалась деревянными решетками, опирающимися на длинные шпалы, на расстояниях от 1,5 до 2 м друг от друга. После укрепления решеток с обеих сторон покрытой ими полосы земли прорезали верхний слой торфяника, пронизанный корнями и представляющий некоторое сопротивление разрыву, и погружали решетку, постепенно насыпая на нее землю. Большие трудности представляли торфяники, расположенные у подошвы склонов и состоящие из мелких органических и неорганических частиц, потому что, вследствие их неоднородной консистенции, к ним нельзя было применять однообразных методов.

Иногда является необходимость устраивать и плотины на торфяных грунтах. Это имело место, например, при закладке плотины для электрической станции Andelsbuch<sup>3</sup>. Грунт состоял из пласта торфа, толщиной от 1 до 4 м, отделенного от способного выдерживать нагрузки грунта, состоящего из слоев озерного мела (Seekeide).

Насыпь высотой в 6 м состояла из гравия и была снабжена ядром из суглинка (Lehm kern), утрамбованным тонкими слоями и связанным с озерным мелом зубом. Насыпь проявила немедленную и значительную осадку. Дно запруженного бассейна поднялось у подножия плотины, и равновесие наступило только тогда, когда площадь основания насыпи была увеличена изменением наклона откосов.

В этом месте мы заметим, что высота, которую можно придать насыпи на мягком грунте, не рискуя провалом насыпанного материала, очень быстро возрастает с уменьшением крутизны откосов насыпи. Это явление можно обосновать теоретически, и оно вытекает из многочисленных наблюдений на практике.

Инженера интересуют, во-первых, данные, с помощью которых можно рассчитать излишки кубатуры, необходимые для сооружения насыпей на торфяниках, и методы, позволяющие ускорить осадку насыпанных масс земли. Такого рода указаниями мы обязаны работам Управления дорожного строительства штата Мичиган. Изыскания этого Управления между прочим состояли в проведении буровых скважин глубиной от 83 до 20 м в восьми различных торфяных отложениях и в изучении насыпей, устроенных на этих торфяниках<sup>4</sup>.

Торфянистые отложения заполняют овраги и впадины флювиогляциальных отложений в области отступления северо-американского ледникового покрова, к западу от озера Мичиган. Изыскания пока-

---

<sup>1</sup> Subsidence of Earthfills as a factor in Valuation. Eng. News Rec., p. 434, March 10, 1921.

<sup>2</sup> D. R. A. Neill. Eisenbahnen in den Tropen. Berlin, 1902.

<sup>3</sup> Das Elektrizitätswerk Andelsbuch im Bregenzerwald. Schweizerische Bauzeitung, I (Bd. 55), S. 1, 15, 33, 61, 78, 1910.

<sup>4</sup> V. R. Buton. Fill Settlements in peat marshes. Proceedings of the Sixth Annual Meeting of the Highway Research Board, p. 93—113, 1926.

зали прежде всего, что оседание насыпей только в малой степени зависит от состава торфяных отложений. При сводке результатов поэтому ограничились тем, что грунты распределили на четыре группы: торфяники, мягкий озерный мел, мягкий гнилой ил (lake clay) и чистый твердый озерный мел. Насыпи, сооруженные на этих отложениях, имели в ширину от 7,2 до 9,0 м. Высота насыпи, по-видимому, только в том случае влияла на величину осадки, когда

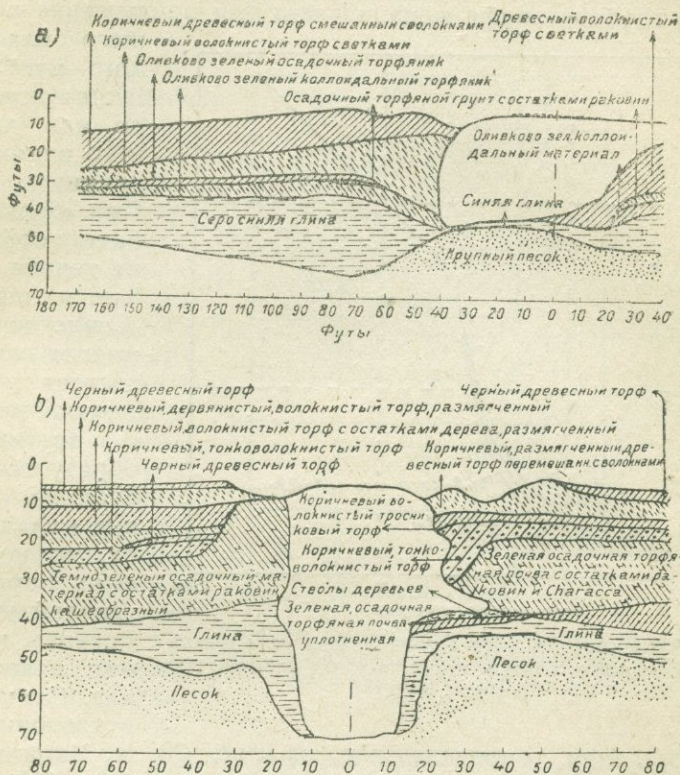


Рис. 69. Опускание искусственных насыпей на торфянистом грунте (по Буртону).

толщина пласта торфа превышала 3 м. При мощности торфа от 3 до 7,5 м величина оседания заметно зависела от высоты насыпи, а в пластах торфа мощностью больше 7,5 м насыпь, как правило, проваливалась через пласт торфа до твердого грунта. Рис. 69а и б изображают разрез насыпей, нижняя поверхность которых достигла твердого грунта, пройдя сквозь торф. Этот рисунок кроме того заставляет обратить внимание на необходимость производить бурения торфяных отложений до разбивки трасы, чтобы избежать мульдообразных углублений в торфе. В тех случаях, когда твердый подстилающий пласт под насыпью обладал крутым падением, обычно получалась значительно большая осадка, чем при горизонтальном подстилающем пласте той же глубины залегания.

Оседание продолжалось обычно в течении по крайней мере

пяти лет. Это вытекает и из шведских отчетов. Инженеры в Мичигане считают равновесие достигнутым, когда величина годового оседания меньше 18 см. Если насыпь окончена осенью, то обычно ближайшей весной наступает временное значительное увеличение скорости оседания. На основании результатов наблюдений была вычерчена диаграмма оседания, изображенная на рис. 70, служащая для вычисления оседаний насыпей шириной от 7,2 до 9,0 м. Абсциссы дают глубину залегания торфа, а ординаты — величины оседания. При глубине торфа меньшей чем 8 м присутствие подстилающего пласта „гнилого ила“ (Faulschlamm) оказывает мало или даже никакого влияния на величину оседания. При большей глубине торфа насыпь не только продавливается через торф „гнилого ила“, но во многих случаях вытесняет и самый „гнилой ил“ (рис. 71). В других случаях образуется лишь впадина, имеющая вид мульды. Глубину, до которой насыпь проникает в „гнилой ил“, можно оценить на основании качества проб ила. Самые большие отклонения от значений оседания, определенных из рис. 70, в Мичигане равнялись 100% при предполагаемом оседании в 1,5 м, 60% — при 3 м, 30% — при 6 м, 20% — при 7,5 м и 10% — при 9 м. Обычно же отклонения бывают значительно меньше.

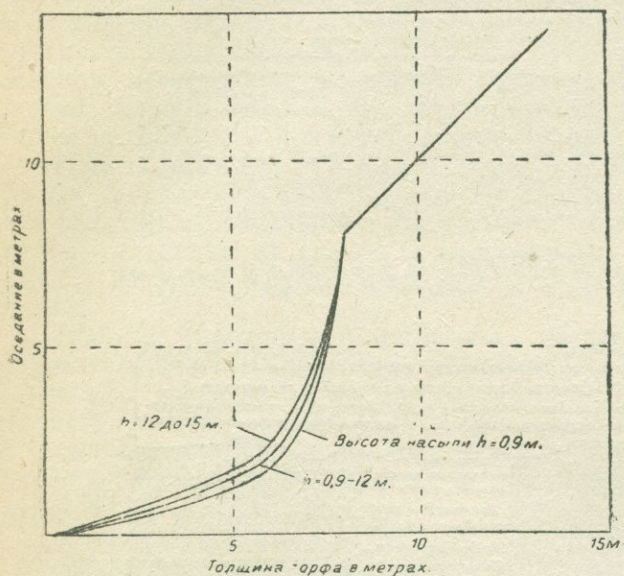


Рис. 70. Зависимость между глубиной залегания пласта торфа и величиною осадки искусственных насыпей (по Буртону).

Расчет массы земли, нужной для сооружения насыпи, производится по схеме рис. 71. Если  $F$  означает высоту насыпи над поверхностью земли,  $H$  — полученную из рис. 71 предполагаемую глубину опустившейся части,  $W$  — ширину гребня дамбы и  $\frac{F}{3F} = 1:3$  — заложение откоса, то общая кубатура на единицу длины насыпи равняется  $(W + 3F) \times (F + H)$ .

Для уменьшения количества земли, потребного для сооружения насыпи, и для ускорения осадки поступают по следующим правилам, выведенным на основании собранного в Мичигане опыта.

1. Глубина пласта торфа меньше 1,8 м. Длина насыпи меньше 90 м. Ширина дороги от 9 до 12 м, откосы 1:4; бермы 3 м, канава вдоль дороги глубиной 0,3 м, шириной 0,6 м, с откосами 1:1,5.

щего пласта „гнилого ила“ (Faulschlamm) оказывает мало или даже никакого влияния на величину оседания. При большей глубине торфа насыпь не только продавливается через торф „гнилого ила“, но во многих случаях вытесняет и самый „гнилой ил“ (рис. 71). В других случаях образуется лишь впадина, имеющая вид мульды. Глубину, до которой насыпь проникает в „гнилой ил“, можно оценить на основании качества проб ила. Самые большие отклонения от значений оседания, определенных из рис. 70, в Мичигане равнялись 100% при предполагаемом оседании в 1,5 м, 60% — при 3 м, 30% — при 6 м, 20% — при 7,5 м и 10% — при 9 м. Обычно же отклонения бывают значительно меньше.

Для уменьшения количества земли, потребного для сооружения насыпи, и для ускорения осадки поступают по следующим правилам, выведенным на основании собранного в Мичигане опыта.

1. Глубина пласта торфа меньше 1,8 м. Длина насыпи меньше 90 м. Ширина дороги от 9 до 12 м, откосы 1:4; бермы 3 м, канава вдоль дороги глубиной 0,3 м, шириной 0,6 м, с откосами 1:1,5.

2. Глубина пласта торфа от 1,8 до 6,0 м. Судя по опыту, с этим случаем всего труднее иметь дело. Сначала насыпают две параллельные земляные дамбы на расстоянии 4,8 м и шириной гребня по 2,4 м каждая и заставляют эти насыпи погрузиться при помощи взрывов торфяника динамитом. Канавы, образовавшиеся вследствие этого на месте насыпей, снова засыпают, причем землю засыпают слоями толщиной в 1,2 м. Как только скорость оседания насыпей начинает заметно убывать, под осями насыпей закладывают подрывные снаряды на расстояниях 1,2 м друг от друга и на глубине от 0,6 до 0,9 м,

одновременно поджигая их на протяжении по крайней мере 30 м. Затем опять ждут, чтобы оседание стало замедляться, и тогда продолжают работу, снова засыпая слои земли толщиной в 1,2 м, причем гребни вспомогательных насыпей получают на вертикальном расстоянии в 30 см от предписанной высоты гребня. Среднюю часть насыпи засыпают только тогда, когда скорость опускания боковых насыпей упадет ниже предела 1,5 см в месяц.

3. Толщина пласта торфа больше 6 м. Разрушение более твердого верхнего слоя торфа взрывами вдоль оси насыпи. Сооружение насыпи поперек всего болота с шириной гребня в 3,6 м, слоями толщиной в 1,2 м до предписанной высоты гребня. Высота гребня получается путем добавочных засыпок до этого уровня, пока оседание не станет меньше 1,5 см в месяц. Тогда снова насыпают слой земли толщиной 1,2 м, ждут, чтобы оседание упало до только что указанного предела, и затем сооружают боковые части насыпи, употребляя для этого материал, снятый с гребня. Обычно к этому времени торф около насыпи настолько уплотнится под влиянием бокового давления этой массы, что он может выдержать вес боковых частей насыпи. Тело насыпи состоит в этом случае из узкого ядра, достигающего до твердого дна болота, и из боковых частей, лежащих на поверхности частично уплотнившегося торфа.

Приведенные только что результаты опытов дают хороший пример практического значения планомерного изучения влияния технических мероприятий на виды грунтов, обладающих в геологическом отношении почти однозначно определяемыми свойствами. Исследования подобного рода, произведенные в различных частях

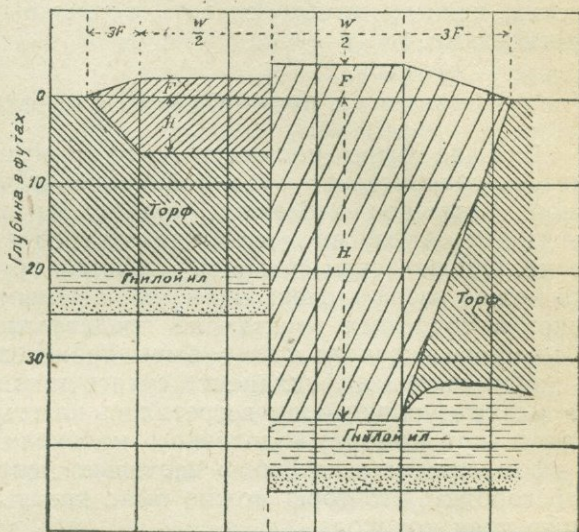


Рис. 71. Схема для примерного подсчета количества потребного материала для сооружения насыпей и земляных дамб (по Буртону).

света, привели бы в короткое время к установлению эмпирических правил с известными пределами применимости, которые оказали бы ценную помощь при составлении проектов и смет.

Очень поучительно сравнение немного грубого метода исследования, применявшегося инженерами Мичигана, со способом детальных исследований, которыми пользовалась шведская Геотехническая комиссия для оценки способности торфяников выдерживать нагрузки. При будущих исследованиях такого рода следовало бы во всяком случае рекомендовать избрать средний путь и пополнять данные относительно поведения насыпей достаточным количеством физических данных, чтобы сделать возможным сравнение с другими местностями.

### 3. ПРОНИЦАЕМОСТЬ ТОРФЯНИКОВ.

Вначале было упомянуто, что торфяные отложения следует считать сравнительно водопроницаемыми, это значит, что затвердевание торфа под давлением происходит в течении немногих лет, тогда как тот же процесс в глинах требует десятки лет или столетий. Однако, если сравнить торфяной грунт с мелким песком, то его можно назвать очень мало проницаемым. Поэтому осушка котлованов в торфяных грунтах не представляет никаких затруднений и во многих случаях может быть произведена ручными насосами.

При закладке фундамента сухого дока в Киле на глубине около 21 м ниже уровня воды встретились пласты торфа. Выемка продолжалась при помощи водолазного колокола<sup>1</sup>. Ил, находящийся над торфом, представлял собою настолько непроницаемую для воздуха перегородку, что торф можно было копать по вертикали на 2 м ниже края колокола.

### 4. ЗАКЛАДКА ВЫСОКИХ ЗДАНИЙ И МОСТОВ НА ТОРФЯНИКАХ.

При закладке более значительных сооружений фундаменты безусловно нужно доводить до выдерживающего нагрузку дна торфяника. Как это производится, было указано при описании почвенных условий города Берлина (стр. 144). То же самое справедливо и относительно выдерживающих нагрузку грунтов, поскольку эти грунты содержат прослойки торфа.

В качестве примера малой способности таких пластов выдерживать нагрузку приведем наблюдения, полученные при закладке фундамента ткацкой фабрики Hohenems в долине Рейна<sup>2</sup>. Грунт состоял из последовательных пластов суглинка и торфа, переходящих снизу в очень мягкий (Laufletten) подвижной суглинок. Так как грунт, выдерживающий нагрузку, находился на глубине 20 м, то здание было поставлено на продольной железобетонной подушке. Хотя нагрузка грунта равнялась всего 0,35 кг, и пласты торфа не могли отдавать свою воду наверх, благодаря малой проницаемости

<sup>1</sup> O. Franzius. Der Bau des neuen Trockendocks auf der Kaiserlichen Werf in Kiel. Zeitschr. f. Bauwesen, S.201 u. 497, 1903.

<sup>2</sup> M. Heimbach. Flachgründungen auf Schlamm und Moorboden und Rekonstruktionen mit Hilfe dieses Verfahrens. Beton und Eisen, S. 343, 370, 386, 1913.

суглинков, здание все-таки осело неравномерно; однако, благодаря конструктивным особенностям подземной части здания, скольконибудь значительных трещин в нем не образовалось.

При высоких постройках второстепенного значения нельзя избежать глубоких фундаментов даже тогда, когда грунт состоит до значительной глубины из торфяника. В таких случаях пользуются одним из способов закладки, которые были выработаны в болотистых местностях в течении столетий.

Хорошие примеры таких методов можно найти в Восточной Пруссии, где встречаются как глубокие, так и мелкие болота, покрывающие большие пространства<sup>1</sup>. Если торфяник, как это случается при большой его мощности, покрыт прочным покровом, то здание ставят прямо на поверхность этого покрова, стараясь не нарушить его целость и не взирая на мощность незатвердевшего слоя. В других случаях делают попытки различными способами укрепить верхнюю часть торфяника. Если это происходит путем засыпки песком, то песок насыпают постепенно, от периферии строительного участка к его середине. Мелкие фабричные здания ставят на уширенную подошву фундамента (Oldenburg) или на деревянные решетки, с подстилкой песка толщиной в 25—30 см. На торфянике Matkars в Ганновере установилась практика при постройке массивных зданий рыть на месте будущих стен канавы шириной в 1 м, глубиной 2 м, заполнять их песком и покрывать поперечными брусьями длиной в 2 м на расстоянии 1,3 м друг от друга. Для трубы делается особый фундамент на решетке из брусьев, и трубу пристраивают плотно к стене, но без связи. Несмотря на эти меры предосторожности при устройстве фундаментов, случается, что одноэтажные здания за несколько лет оседают на 1,5 м. Поэтому здания нередко ставят на подушку, состоящую из высушенных и смешанных с песком торфяных кирпичей; толщина подушки делается равной ожидаемому общему оседанию.

Так как перечисленные способы постройки дают только опоры для стен, то часто случается, что грунт под полом оседает. Во избежание этой неприятности на болоте Augstmal около Heyedekrug участки, подлежащие застройке, предварительно осушают сетью дренажных канав глубиной 1,2 м, шириной 0,4 м. На следующий и на третий год на участке сооружают насыпь на песке слоями толщиной по 1 м каждый раз, которые искусственно затем нагружают. Первый слой совершенно уходит в торфяную почву, второй бывает более устойчивым, однако все-таки еще опускается. Дренаж вызывает опускание поверхности торфяника примерно на 1 м, а нагрузка песком дает добавочное опускание примерно на 80 см. На второй указанный выше слой песка насыпают третий слой толщиной 0,5 м, который после временной искусственной нагрузки служит опорой для поддерживающего стены бетонного рамного фундамента, имеющего вид колодезного сруба. При сооружении дорог на болоте Augstmal поступают подобным же образом (засыпка гравия между сетью дренажных канав).

В большом болоте в округе Labiau (юго-восточная оконечность

<sup>1</sup> Anlage und Bauart freistehender Gebäude in Ostpreussen. Zentralbl. d. Bauverwalt, S. 329, 1909.

Куришгаффа) глубина торфа равняется 7—8 м. Высокие здания основывают там на свайных ростверках, и опыт показал, что деревянные сваи не гниют и выше уровня грунтовой воды, если только головки свай находятся на 30—50 см ниже поверхности торфа<sup>1</sup>.

Особенного внимания заслуживает заложение мостов на мощных торфяниках. Во избежание опасности последующего смещения забитых в торфяник свай для фундамента необходимо сначала произвести насыпку въездов на мост (Zufahrtsgampe) и продолжить насыпь через место постройки будущих устоев к середине моста, так, чтобы выемки для устоев проходили сквозь насыпанный материал.

Несоблюдение этого важного правила послужило причиной происшедшего в 1916 г. в Мичигане провала мостового устоя, опиравшегося на сваи длиной в 15 м, при 12 м ширины. Устои моста были сооружены до начала насыпных работ. Боковое давление, обусловленное весом насыпи, вызвало сначала значительное смещение фундаментов, а затем и их провал. Остатки исчезли в мягкой массе. Еще один пример был приведен при описании почвенных условий Нью-Йорка (стр. 146).

## 5. ИСКУССТВЕННОЕ УПЛОТНЕНИЕ ТОРФЯНИКОВ.

Вследствие своей неполной упругости органические виды почвы, так же как и глины, расширяются лишь очень незначительно после уплотнения от нагрузки или от испарения, даже если нагрузка исчезает или почва попадает под воду. По этой причине можно было, например, при постройке Рейнского канала в Голландии (20 м ширина дна, 3,3 м глубина воды) соорудить дамбы высотой до 4 м из материала, добытого на месте<sup>2</sup>.

Грунт состоял из мягкого торфа или болотистой почвы (вероятно кашеобразный торфяной грунт D a c h p o w s k i, табл. IX) с содержанием воды, равным 80% и при высыхании уменьшался в объеме на четверть своего первоначального объема. Чтобы обеспечить водонепроницаемость, дамбы снабжались глиняным ядром. Однако дальнейшие опыты показали, что дамбы, сооруженные из высушенной торфяной почвы, даже без глиняного ядра почти водонепроницаемы при давлении воды, равном 1,45 м.

Способность уплотняться, присущая органическим почвам, иногда имеет место и при устройстве фундаментов для искусственных сооружений.

В Берлине пришлось устраивать газгольдер диаметром в 38 м на грунте, состоявшем, сверху вниз, из 1 м мелкого песка, от 3 до 6 м очень мягкого торфяника и, наконец, из остроугольного плотно залегающего песка<sup>3</sup>. Основание было сооружено по системе Kompressol. Отверстия имели в глубину 7 м и верхний диаметр в 0,74 м и были расположены на расстоянии от 3 до 4 м. Их прежде всего забивали жирной глиной, чтобы остановить приток

<sup>1</sup> Schurzholzbauten im grossen Moorbruch (Kreis Labian). Zentralbl. d. Bauverw. S. 585, 1899.

<sup>2</sup> Dämme und Deiche aus Moorboden. Zentralbl. d. Bauverw. S. 163, 1894.

<sup>3</sup> Anwendung neuer Gründungsarten. Deutsche Bauzeitung. S. 303, 1905.

воды. Эта операция удалась, несмотря на то, что уровень грунтовой воды находился на 0,3 м ниже поверхности земли. Заполнение отверстий производилось известным образом при помощи камней и бетона. Кубатура введенного материала равнялась пятикратному объему отверстий.

Грунт между сваями стал настолько плотным, что его с трудом можно было копать лопатой, тогда как до работ по уплотнению его можно было проткнуть зондом до песчаного дна. Фундаменты для моста железной дороги Breslau—Schweidnitz—Freiburg в долине р. Одер около Stettin пришлось закладывать на „наполовину пльвучем, отчасти торфяном болотном пласте“ мощностью от 8 до 10 м, залегавшем на выдерживающем нагрузку песке<sup>1</sup>. Во избежание опасности выдавливания в стороны свай, забитых через торф в песок, был придуман способ укрепления толщи торфа сваями из песка. Для этой цели в грунт ввинчивались железные трубки диаметром в 40 см; полученные таким образом отверстия после удаления трубок заполнялись песком. Число песочных свай зависело от сопротивления материала. Твердость пласта торфа после уплотнения стала такой, что больше уже нельзя было ввинчивать в него трубки<sup>2</sup>.

Условия бывают более благоприятны, если природа уже до начала строительных работ позаботилась об уплотнении залежи торфа.

На месте постройки дамб для одной рыбацкой гавани на острове Urk в Zuidersee грунт состоял из пласта торфа мощностью 4 м, подстилаемого песком и гравием. Торфяной пласт, залегающий ниже уровня воды, оказался настолько прочным, что не представлялось никакой надобности снимать его землечерпательной машиной или вытеснять его песком<sup>3</sup>. Уплотнение произошло очевидно вследствие высыхания в период временного поднятия почвы, подобно образованию „верхних“ корок на глине в Швеции, упомянутому на стр. 133.

## 6. ДЕЙСТВИЕ БОЛОТНОЙ ВОДЫ НА БЕТОН.

При постройке сборного сточного канала в Osnabrück (длиной 2 300 м, яйцевидный профиль 170 на 130 см и 180 на 140 см) на левом берегу Hase были вскрыты песчаные пласты с местными прослоями торфа умеренной мощности<sup>4</sup>. Состав бетона для дна и боков канала 1:4:7, для свода 1:4:6. После бетонирования котлован был заполнен вынутым материалом. Канал был открыт в сентябре 1903 г. В мае 1904 г. на внутренней облицовке были обнаружены местами коричневые пятна и продольные трещины. Около продольных трещин бетон был совершенно разрушен, переливался всеми

<sup>1</sup> Dichtung und Tragbarmachung lockeren, aufgeschütteten Baugrundes. Zentralbl. d. Bauverw., S. 485, 1899.

<sup>2</sup> В противоречии с этим указанный способ совершенно не удался при работах по закладке фундаментов для дренажа на железнодорожной линии от d' Aberville на Eu и для вокзала St. Omer между Calais и Dunquerque вероятно вследствие недостаточной проницаемости илистого грунта.

<sup>3</sup> Fischeihafen auf der Insel Urk im Zuidersee. Zentralbl. d. Bauverw., S. 161, 1904.

<sup>4</sup> F. Lehmann. Der Bau des Abwassersammelkanals in Osnabrück und die in demselben beobachteten Zerstörungsercheinungen. Zentralbl. d. Bauverw., II, S. 466. 473, 511, 522, 1908.

цветами и резался ножом. Разрушение шло по направлению от наружных частей к внутренним. Водные вытяжки из проб грунта, взятых около канала и над ним, дали кислую реакцию и содержали значительные количества сернокислой закиси железа и свободной серной кислоты.

В Швейцарии разрушение бетонных труб приняло во многих мелиорационных районах такие размеры, что исследование причин этого явления было поручено особой комиссии. Химическое исследование установило почти без исключения во всех случаях повреждений присутствие в почве веществ, которые должны были оказывать химическое воздействие на бетон. В качестве вредных веществ были установлены:

1. Кислая реакция почвы вследствие присутствия ненасыщенных гумусовых веществ. Эти почвы действуют на бетон как слабые кислоты. Высокая концентрация углекислоты в почвенной воде ведет к полному разрушению бетона, причем весь имеющийся кальций переходит в бикарбонат кальция и растворяется.

2. Высокое содержание гипса в мелкоболотном торфе ведет к отложению гипса в бетоне и таким образом к разрушению.

3. Высокое содержание магнезии в богатых известью почвах (более 2 % MgO) приводит к повреждению бетона, причина которых еще не вполне выяснена <sup>1</sup>.

Качество бетона оказывает только влияние на скорость реакции, но не на направление ее. На основании этих результатов исследования комиссия предлагает для более значительных дренажных проектов требовать испытания почвы, которое дало бы возможность судить об имеющейся опасности разрушения бетона. Камень, употребляемый при постройке, должен быть свежим. В качестве извести годятся лишь богатые глиноземом кислотоупорные цементы (глиноземистые цементы).

---

<sup>1</sup> G. Wiegner und Gessner. Der heutige Stand der schweizerischer Forschungen über die Korrosionserscheinungen an Zementröhren in Mellorationsböden. Выдержки из отчетов I Международного конгресса по почвоведению, Washington, D. C. Juni, 1927 VI, Комиссия, S. 19.

Геология дорожного строительства является самой молодой и в то же время одной из самых трудных отраслей инженерной геологии. Планомерной разработкой относящихся к ней вопросов до настоящего времени занимались только в САСШ и в Союзе Советских Социалистических Республик (СССР). Задача этой научной отрасли заключается в исследовании и классификации грунта с точки зрения пригодности его в качестве основания для устройства искусственных дорог и в выборе наиболее дешевых типов дорог, отвечающих требованиям, предъявляемым к ним при данных геологических и климатических условиях, главным образом со стороны автомобильного движения.

## ОПЫТ ПРЕЖНИХ ЛЕТ И ЭМПИРИЧЕСКИЕ ПРАВИЛА.

Труды американцев в направлении более точной оценки достоинства грунта в качестве основания для устройства дорог продолжают уже примерно в течении свыше пятнадцати лет. Из числа практических выводов, к которым успели прийти путем опыта за этот промежуток времени, можно отметить нижеследующие.

В Клевеланде, Огио, дороги, состоящие из кирпича на бетонной постели мощностью в 15 см и имеющие в качестве основания глину, в течении нескольких лет совершенно разрушились, между тем как дороги подобной же конструкции, проложенные в грунтах, бедных глиною, при толщине бетонной постели в 10 см, оправдывают себя очень хорошо. Обследование состояния дорог, предпринятое в Калифорнии (2000 км), показало, что все дороги, основанные на песчаных грунтах, находятся в безупречном состоянии. Из общего протяжения дорог, отличающихся разными дефектами, 76% приходится на дороги, заложенные в грунтах, состоящих из глин и очень мелкого песка, и 24% на дороги, проложенные на суглинках.

Из этих и подобных им данным казалось возможным вывести заключение, что достоинство основания дороги в первую очередь зависит от количества и качества мелких составных частей грунта. Основываясь на этом предположении, пришли к некоторым эмпирическим правилам, при помощи которых пытались вывести заключение о достоинствах основания дорог, исходя из результатов лабораторных исследований. Этих правил в некоторых районах САСШ придерживаются и по настоящее время. Так, например, в сев.-зап. части САСШ пришли к выводу, что основание для дорог может быть признано хорошим, среднего достоинства или плохим в зависимости от величины эквивалента влажности, равного соответственно 20, от 20 до 30 или свыше 30. Если значение этого коэффициента превышает 30, то считают необходимым подмести-

вать к основанию будущего дорожного покрова песок, гранитный щебень или другие подобные им грубозернистые материалы. Пригодность грунта для устройства дороги в Калифорнии также оценивается, исходя из величины эквивалента влажности. На грунтах с высоким эквивалентом влажности и высоким показателем усадки устраиваются дорожные покрытия из бетона (Орегон). На грунтах с показателем усадки, превышающим 5%, твердый дорожный покров снабжается постелью из крупного песка, мощностью от 6 до 25 см, в зависимости от величины эквивалента влажности.

#### ОПЫТ ПОСЛЕДНЕГО ВРЕМЕНИ И МЕТОДЫ РАБОТ.

Опыт последних лет с неопровержимой ясностью показал, что продолжительность существования дорог зависит не только от материала, примененного для устройства их постели, но в значительной степени также от природного состояния грунта и от режима грунтовых вод. Это состояние грунта изменяется в зависимости от рода покрывающей его растительности и времен года.

При наблюдениях, произведенных над одной из дорог штата Нью-Йорк, было замечено, что дорожный покров тех частей дороги, которые залегают в выемках, расположенных в грунте, состоявшем из глины, совершенно разрушился, тогда как покров дороги на участках ее, проложенных в насыпях и сооруженных из того же материала, взятого из карьеров, остался неповрежденным. Над некоторыми другими дорогами, также проложенными в местности с глинистой почвой, было сделано наблюдение противоположного характера.

Лабораторные испытания какого-нибудь грунта характеризуют его только со стороны его состава и потому должны быть пополнены наблюдениями, произведенными над грунтом в природных условиях данной местности.

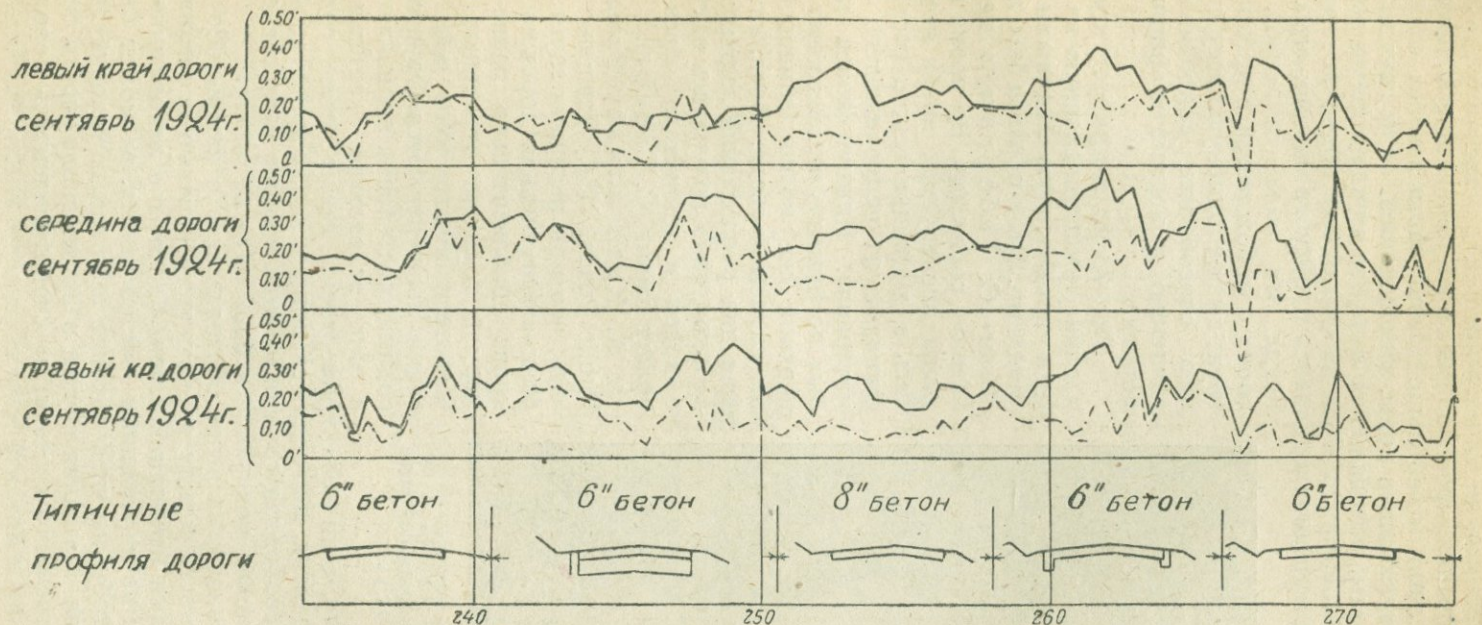
Одна и та же глина, например, может в природных условиях в одном случае обладать почти полной водонепроницаемостью, в другом — быть пронизана корневыми трубочками и другими отверстиями, в которых вода будет циркулировать свободно.

Эти условия существования грунта, не зависящие от качеств его природного состава, играют важную роль и в том случае, когда дороги подвергаются действию мороза <sup>1</sup>.

В некоторых частях на севере Соединенных Штатов уличный

---

<sup>1</sup> Для того чтобы умерить влияние мороза, нужно данный грунт или в достаточной мере осушить, или же заменить подверженный влиянию мороза грунт, расположенный по соседству с оберегаемым, грубозернистым материалом (чистым песком, щебнем или шлаком). В Швеции фундаменты окружают канавами, которые заполняются золой, торфом и другими крупнопористыми, дурно проводящими тепло материалами, а на границе, доступной действию мороза, осушаются при помощи дренажных труб. В Канаде при проведении железнодорожного полотна избегают насыпать водонепроницаемый материал рядом с водопроницаемым. В Новой Англии инженеры, строящие дороги, утверждают, что можно значительно понизить разрушительное действие мороза на дороги, если под твердый дорожный покров класть подстилку из крупного песка или щебня, толщиной от 10 до 30 см. Образующиеся на дорогах от мороза лучины (Frostbeulen) обезвреживаются различными способами, например, путем взрывов и разрыхления этих грунтов в заведомо ненадежных местах, или путем подсыпки в грунт щебня для того, чтобы облегчить сток воды. В некоторых районах дорожного строительства Соединенных Штатов при наступлении оттепели в песчаные грунты проводят водяной пар.



Сплошные ломаные линии изображают высоту положения полотна дороги в 1924  
 Пунктирные " " " " " " " " " " в 1925г.

Рис. 72. Деформация бетонированной дороги от действия мороза (опытная дорога Ланесборо у Албани; максимальное  
 вспучивание 14 см). (Графики N. S. Bureau of Public Roads).

покров под влиянием мороза вспучивается на величину до 30 см. (рис. 72). Исследования, производимые в настоящее время, показали, что это пучение лишь в небольшой своей части зависит от увеличения объема замерзающей воды, заполняющей поры грунта. Наибольшая часть воды, находящейся в грунте в виде горизонтальных ледяных прослоек, приходится на долю той воды, которая во время процесса замерзания поднялась кверху из нижних его слоев.

Когда эта вода оттаивает, она снова освобождается и превращает грунт в кашеподобную массу, лишенную способности сопротивляться давлению и вредящую прочности дороги.

Рис. 73 иллюстрирует колонку каолина, выштампованную из грунта и пронизанную ледяными прослойками. Этот образец был исследован С. Табергом в ненарушенном состоянии. Во время испытания исследуемая проба помещалась в цилиндрическом сосуде со стенками из непроводящего тепло материала. Нижний конец пробы был погружен в незамерзшую воду, верхний же конец помещался в охлаждаемой среде. Вода, служившая для образования ледяных прослоек, явно получалась из сосуда с водой и проникала через всю толщу глины (С. Таберг).

А. Казагранде (Bureau of Public Roads, USA) удалось показать, что при песчаных грунтах величина вспучивания дорожного покрова приблизительно равна суммарной толщине отдельных ледяных прослоек. Зоны кристаллизации льда питаются грунтовыми водами, постепенно проникающими в них вследствие капиллярного

поднятия. Поэтому, если зона промерзания лежит выше границы капиллярного поднятия, или если вследствие слабой пропускной способности грунта свободная грунтовая вода вообще отсутствует, то значительного пучения поверхности произойти не может.

Вследствие описанных выше обстоятельств о какой-либо определенной зависимости между доброкачественностью основания дороги и результатами испытаний, произведенных в лаборатории над пробами, взятыми из нарушенных частей грунта, не может быть и речи. Для того чтобы изучить влияние природных условий данной местности (условия залегания грунта в противоположность особенностям его качественного состава) на сопротивляемость дорожного полотна, прибегают к анализу его состояния. Выбирают подходя-

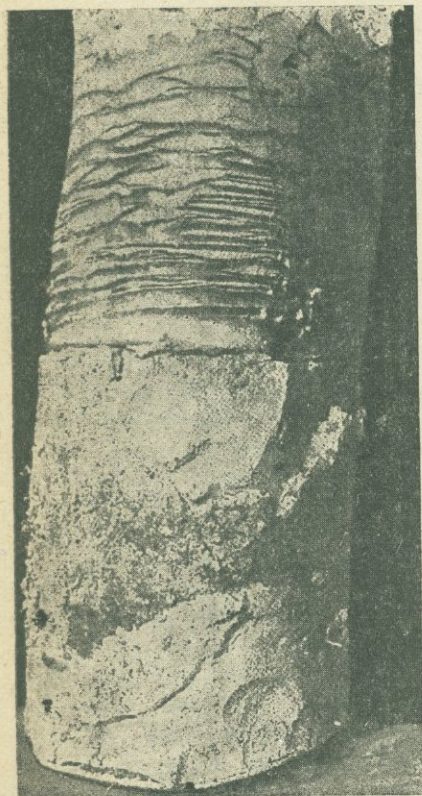


Рис. 73. Расширение трещин в породе от давления замерзающей воды (по Табергу).

щие участки дороги, предшествующая история которых и степень сопротивляемости известны; затем устанавливают тщательное наблюдение за их состоянием (рис. 74) и регистрируют все факты, которые могли оказать влияние на это состояние (профиль грунта, физические свойства природного состава отдельных горизонтов грунта, структура грунта, режим грунтовых вод, условия атмосферных осадков, температурных изменений, промерзаемости и т. д.).

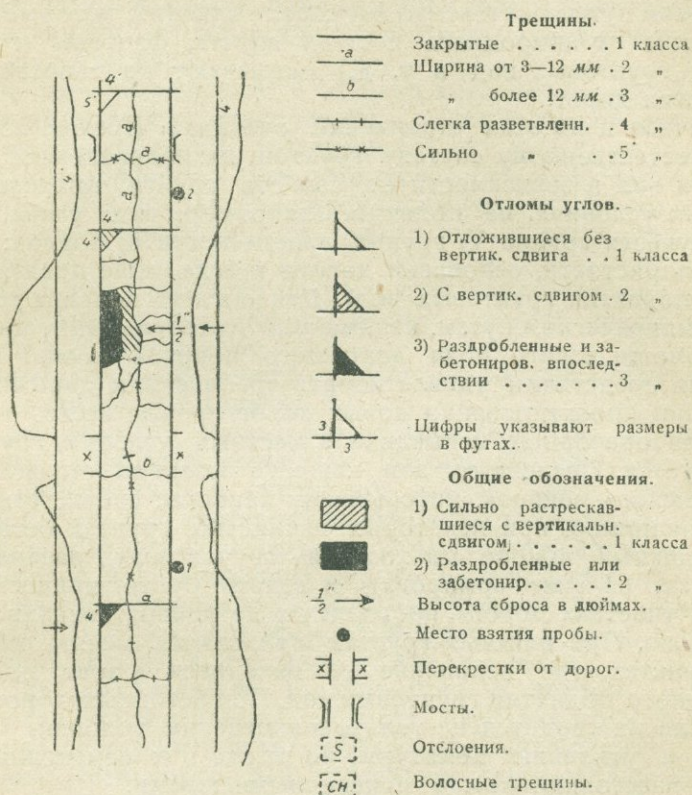


Рис. 74. Условные обозначения для повреждений бетонных дорог (по U. S. Bureau of Public Roads) (трещины от растяжения показаны прямыми поперечными линиями).

На основании анализа создают рабочую гипотезу относительно причин, вызвавших обнаруженные изменения дороги, и эта гипотеза затем проверяется и уточняется на основании данных, полученных или при вторичном анализе, или путем опытов, произведенных над опытными дорогами.

Кроме того собирают дополнительные данные следующим образом: участковые инженеры (Sektionsingenieure) сообщают центральной организации данные о всех выдающихся, обнаруженных на их дорожных участках, повреждениях, сопровождая свои рапорты пробами грунта. Эти пробы подвергаются центральной организацией лабораторному испытанию, и грунты классифицируются. Грунты, показавшие при испытании в лаборатории приблизительно

одинаковые свойства, относят к одному и тому же классу, вне зависимости от того, в каком состоянии они находились в местных условиях. В случае, если, несмотря на одинаковые свойства грунтов, последние в природных условиях ведут себя различно, то центральная организация командует на соответствующие участки дороги специалиста и таким образом устанавливаются причины обнаруженного различия путем непосредственных наблюдений на месте. Таким путем постепенно изучают те влияния, которые местные, независимые от природного состава грунта, факторы (структура, уровень грунтовых вод и т. д.) оказывают на свойства сопри-  
вляемости дорог.

Конечная цель этих стремлений очевидна. Прежде всего, смотря по естественному составу грунтов, их подразделяют на виды и каждый вид в зависимости от свойств грунта, проявленных им в местных условиях, на подвиды (например, вид: глина, по пределу текучести группа V, группа пластичности 6; подвид: высокая степень пористости, основание дороги всегда выше предела капиллярного поднятия грунтовых вод). Для каждого подвида устанавливается эмпирическим путем, какими подготовительными операциями и при помощи какого рода дорожного покрова можно наиболее дешевыми средствами удовлетворить требованиям дорожного движения. При проектировании новых дорог прежде всего, исходя из данных лабораторных испытаний и местных условий, грунт классифицируется. После того для каждого подвида определяют тот род дорожного покрова, который ему наиболее соответствует.

Так, например, при некоторых глинистых грунтах бетонированный дорожный покров приходится на участках, расположенных в выемках, сильнее армировать и делать более мощным, чем на соседних участках дороги, проводимых на ровной поверхности данного района. При илстых грунтах приходится менять тип дороги в тех пунктах, где основание ее находится в зоне возможного капиллярного поднятия грунтовых вод. При бетонных дорогах изменение типа их сводится не только к изменению толщины бетонного покрова и усилению арматуры, но также и к изменению максимальных расстояний между поперечными швами.

**Организация.** В геологии дорожного строительства труд исследователя состоит главным образом в установлении направления коллективной работы и в извлечении из получаемых с мест данных соответствующих выводов. Центр тяжести работы при этом заключается в истребовании возможно большего числа отдельных фактов от организаций, деятельность которых распространяется на дорожную сеть всей страны и которые при своих исследованиях должны руководствоваться одной общей программой.

В САСШ верховное руководство исследовательскими работами сосредоточено в руках Государственного управления общественными дорогами (Bureau of Public Roads).

Это Управление содержит в Арлингтоне особую лабораторию для исполнения текущих испытаний грунтов, а научно-исследовательские работы производятся в лабораториях Кембриджского технологического института в штате Массачусетс. Исполнительные программы работ вырабатываются центральным учреждением в Вашингтоне при содействии Комитета по изучению дорожного стро-

ительства (Highway Research Board) при Национальном совете исследований (National Research Council).

Одобренные Комитетом исполнительные программы прежде всего проверяются специалистами Бюро на отдельных дорожных участках и опытных дорогах, расположенных по соседству с Вашингтоном, и затем проводятся в жизнь в различных штатах инженерами государственных управлений дорожного строительства при содействии опытных специалистов из центрального учреждения.

Исследование состояния дорожных участков заключается в исполнении следующих работ.

1. Предварительная работа. Обход важнейших дорожных участков представителями центрального учреждения и выбор мест, наиболее подходящих для исследований.

2. Обход избранных мест инженером-строителем и специалистом грунтоведом, составление предварительного отчета о состоянии дороги в связи с местными геологическими и гидрографическими условиями.

3. Обмер и регистрация повреждений дорог, бурение по обеим сторонам дороги до глубины 1,5 м, установление профилей основания дороги и взятие проб.

4. Испытание проб грунта в лаборатории, обработка результатов произведенных наблюдений.

При составлении предварительного отчета (2), а также при установлении профилей основания дороги (3) пользуются также данными, имеющимися в грунтовых картах Бюро почвоведения (Bureau of Soils). Так как широкое освещение геологических условий в районах дорожного строительства производится всего лишь в течении примерно двух последних лет, то методы работ до сего времени еще не установлены во всех подробностях. Эти методы разрабатываются в настоящее время в Мэриленде в связи с сооружением опытной дороги в Виргинии (Crane Highway).

В СССР геологические исследования в области дорожного строительства сосредоточены в руках основанного в 1924 г. при Народном комиссариате путей сообщения Центрального управления местного транспорта. Это Управление имеет отделы: по исследованию состава грунтов, по изучению экономических условий и технической стороны сооружения дорог, а также по обследованию состояния дорог. В то время как в САСШ главное внимание обращено в первую очередь на изучение дорог стоящих автомобильных дорог, в СССР занимаются преимущественно изучением дорог более дешевого типа (Хмызников).

В Германии внимание инженеров путей сообщения посвящено, повидимому, почти исключительно выработке конструкции проезжей части дорог. Устройство опытных дорог имеет целью главным образом сравнительную оценку доброкачественности различных дорожных покрытий.

**Литература.** Всестороннее сжатое описание современного состояния дорожно-геологических исследований можно найти у С. А. Hogentogler и К. Terzaghi. *Interrelationship of Load, Road and Subgrade*. Public Roads, 1929 (Соотношение между конструкцией дороги, грузом и грунтом). См. также: Terzaghi. *Concrete Roads—a problem of foundation Engineering* (Терцаги. Бетонные дороги—проблема инженерного дела). *Journal Boston Society of Civ. Eng. Mai*, 1927. — Terzaghi. *The methods and possibilities of Road Soil Investigations* (Терцаги. Методы исследований

дорожных грунтов и возможные достижения). Proceedings of Sixth Annual Meeting of Highway Research, Board, National Research Council. Washington, 1926.—A. C. Rose. Practical Tests for Subgrade Soils (А. Розе, Практические испытания грунтов под основания). Public Roads, August, 1924. См. также Terzaghi, Simplified Soiltests for Subgrades and their physical Significance (Терцаги, Упрощенные испытания грунтов под основания и их физическое значение). Public Roads, November, 1926.—Terzaghi. The first International Soil Congress and its Message to the Highway Engineer. (Терцаги, Первый международный конгресс по исследованию почв и его значение для инженеров дорожного строительства). Public Roads, 1927.—Terzaghi, A. C. Hogentogler and A. M. Wintermayer. Present Status of Subgrade Testing (Терцаги, Гогентоглер и Винтермейер. Современные положения испытания грунтов). Public Roads, 1928.—Bates experimental road (Малые опытные дороги). State of Illinois Dept. of Public works, Division of Highways, Bulletin № 18, 1922.—Report on Highway Research at Pittsburgh, California, 1921/22 (Отчет об испытаниях больших дорог в Питтсбурге).—Report of a Study of the California Highway System by the U. S. Bureau of Public Roads to the California Highway Commission and Highway Engineer, 1920 (Отчет об изучении системы больших дорог в Калифорнии, Бюро общественных дорог САСИИ).—C. A. Hogentogler, J. B. Mullis and A. C. Benkelman. Subgrade Studies of the U. S. Bureau of Public Roads. Proc. of the Sixth Ann. Meeting of the Highway Research Board, Washington, D. C., 1926, p. 113—133 (Гогентоглер, Муллис и Бенкельман. Труды по изучению грунтов С.-А. Бюро общественных дорог).—P. K. Khmiznikov Verfahren für die Kartierung der Bodenformationen für Strassenbauzwecke. Geomorpologische und Pedobotanische Karten der Saratov Kolonie bei Leningrad, für Strassenbauzwecke (П. К. Хмызников: Способы картирования почвенных формаций для целей дорожного строительства). V. S. Makarevitch. Die Strasse als Studienobjekt des Geographen (Макаревич. Дорога как предмет исследования для географа). Ср. также труды: D. P. Krupine, A. E. Nazarenko. Ueber die Wahl der Zuschlagsstoffe für die Verbesserung ungünstigen Untergrundes D. П. Крынин и А. Е. Назаренко, Овыборе присадочных материалов для исправления неблагоприятных грунтов).—B. V. Gervais und V. V. Nikitin. Strassenbauhefte Ibis 4 der Zeitschr. des Österr. Ing. und Arch. Ver., 1926 und 1927 (Б. В. Жервей В. В. Никитин. Выпуск по дорожному строительству 1 до 4. Журн. Австр. объедин. инженеров и архитект). Данные о влиянии мороза можно между прочим найти в следующих статьях: Ingersoll-Zobel. Mathematical Theorie of Heatconduction. Ginn and Co, Boston (Ингерсоль—Цобель. Математическая теория теплопроводности). Данные о существующих в грунте температурных условиях можно найти в следующей литературе о грунтах. См., например, Ramann. Bodenkunde, 3 Aufl. 1914, S. 403. Wärmeaustausch im Boden (Раманн. Грунтоведение, стр. 403. Обмен тепла в грунте).—Gründungsarbeiten in Sibirien. Zeitschr d. Ver. deutsch. Ing 1905, 1, S. 535 (Строительные работы в Сибири).—A. M. Wintermayer. Percentage of water freezable in soils. Public Roads, vol. 5, № 12. А. М. Винтермейер. Процентное содержание замерзающей в почве воды).—G. I. Vouyoucos. The amount of unfree water in soils at different moisture contents. Soil Science, vol. XI, p. 255—260, Jan., 1921. (Боюкос. Количество несвободной воды в почве при разном содержании ее).—S. Taber, Ice Formation in Clay Soils will lift Surface Weights. Eng. News Rec., III, 80, p. 262—263 (С. Табер. Образование льда в глинистых почвах) См. также: Pressure Phenomena accompanying the growth of crystals. Proc. of the Nat. Academy of Sciences, vol. 3, p. 297—302, April, 1917 (Явления давления, сопровождающие рост кристаллов).—The Growth of Crystals under external Pressure. American Journal of Sciences, 4—th series, vol. 41, p. 532—556 (Рост кристаллов при внешнем давлении).—Surface Heaving caused by Segregation of Water, forming Ice Crystals Eng. News Rec., vol. 81, p. 683—684 (Причины замерзания воды).—Terzaghi. The Science of foundation, its present and future. Proc. of the Am. Soc of Civ., Eng November, 1927 (Терцаги. Наука о фундаментах, ее настоящее и будущее).—H. J. Gilkey Freezing Ground acts like hydraulic jack. Eng. News-Rec., vol 79, p. 360—361.—L. B. Wykoff. Some Observations on Effect of Frost in raising Weights. Eng. News-Rec., vol. 80, p. 627—628.—C. D. Norton. Water Expansion in Grund Cause of Heaving in Winter Eng. News—Rec., vol. 80, p. 1058.—M. C. Cready. Action of Frost in Heaving Concrete Pier. Eng. News—Rec., August 30, 1923, p. 360.—G. Dahlbert. Action of Frost on Foundation. Eng. News-Rec., vol. 91, p. 776, 8 Nov. 1923.—W. F. Rosenwald. Minnesota Fights „frostboils“ with live steam, Eng. News—Rec., 1927, 1, vol. 98, p. 29.



Связанные с туннелями предварительные геологические исследования имеют целью ознакомить нас с теми геологическими факторами, знание которых необходимо для того, чтобы иметь возможность наметить наиболее выгодную трасу туннеля и произвести оценку строительных расходов и необходимого для проведения туннеля времени. Строительные расходы, между прочим, зависят от следующих строительно-технических факторов: от сопротивления породы выемке, от давления пород, от местных обрушений крепи и притока воды к стволу туннеля. К этому в качествеотягающих условия работ факторов могут присоединяться еще прорывы газов и высокая температура. Соответственно с этим задачу геологии туннелей составляет выявление отношений, существующих между геологическими особенностями района и вышеперечисленными строительно-техническими факторами.

## I. СОПРОТИВЛЕНИЕ ПОРОД ПРИ ВЫЕМКЕ.

Таблица X дает представление об относительном сопротивлении пород выемке для главных разновидностей грунтов. Между петрографическим характером какой-либо горной породы и ее сопротивлением при выемке нет определенной связи, так как каждая порода (в петрографическом смысле) обнимает разновидности с весьма различным сопротивлением выемке. Это в особенности справедливо в отношении сланцеватых и мергелистых пород. Кроме того сопротивление одной и той же породы может варьировать в весьма широких пределах в зависимости от степени ее выветрелости и трещиноватости.

При проведении напорного туннеля при гидросиловых сооружениях у Партенштейна (5740 м) был пройден гранит богемского массива. На протяжении некоторых участков туннеля гранит был крупнозернистого сложения, устойчив и тверд, слабо трещиноват; на других же он оказывался хотя тонкозернистым, но трещиноватым, истертым и в высокой степени водопроницаемым. В наиболее слабых участках приходилось вести работы при помощи забивной железной крепи<sup>1</sup>. С подобными же условиями пришлось встретиться при проведении туннеля в гранит-гнейсах через Каскадные горы в Вашингтоне. В Англии разложившиеся части гранита известны под названием „rot grawen“ и пользуются, вследствие развиваемого ими давления, плохой репутацией. В туннеле силовых установок у озера Шпуллерзее (1895 м) главный доломитовый массив на отдельных участках проявлял устойчивость, ясную слоистость,

<sup>1</sup> Randzio. Neuere Stollenbauten. Die Bautechnik, S. 343, 374, 1925.

иногда же снова оказывался сильно трещиноватым, местами перетертым <sup>1</sup>.

В глинах сопротивление выемке, между прочим, обусловливается силою сцепления между самой глиной и орудием добычи. Сила сцепления зависит от качества глины и содержания в ней воды. Согласно опытам, производившимся в испытательной станции в Ротгамстеде, для исследованных там жирных глин наблюдаются

Таблица X <sup>2</sup>.

Класс грунта	Название разновидности грунта	Число поденщин на 1 м <sup>3</sup> выемки	Динамита № 1 на 1 м <sup>3</sup> выемки	Количество работы на 1 м <sup>3</sup> выемки (в кг/м)	Коэффициент крепости
Ia	Milder Stichboden Мягкий лопатный грунт . .	0,08	—	10 400	1,0
Ib	Schwerer Stichboden Плотный лопатный грунт . .	0,12	—	15 600	1,5
IIa	Milder Hackboden Мягкий кайловый грунт . .	0,16	—	20 800	2,0
IIb	Schwerer Hackboden Плотный кайловый грунт . .	0,20	—	26 000	2,5
IIIa	Mildes gebräches Gebirge Мягко-ломкая порода . . .	0,30	—	39 000	3,8
IIIb	Festes gebräches Gebirge Твердо-ломкая порода . . .	0,50	0,1	72 500	7,1
IVa	Festes Sprenggestein Твердая взрывная порода . .	0,70	0,2	106 000	10,2
IVb	Sehr festes Sprenggestein Очень твердая взрывная порода . . . . .	1,00	0,3	152 500	15,0
IVc	Höchst festes Sprenggestein Особенно твердая взрывная порода . . . . .	1,60	0,5	245 500	24,0

в отношении силы их сцепления два явно выраженных максимума примерно при водосодержании в 22 и 32%, между которыми сила сцепления снижается почти вдвое, между тем как для тощих глин обнаружен был только один максимум (примерно при 18%) <sup>3</sup>.

Особенные затруднения при выемке могут быть вызваны наличием в породе включений кварца (цементированные кварцевым инфильтратом разрывы, волосяные трещины и расслоения пластов),

<sup>1</sup> O. Ampferer und H. Ascher. Jahrb. der Geol. Bundesanstalt, Bd. 75, H. 3 u. 4, Wien, 1925.

<sup>2</sup> По Rziha. Die Gewinnungsfestigkeit der Erd-und Felsmassen in Einschnitten. Zentralbl. d. Bauverw., S. 176, 1889; Rziha оценивает дневную производительность в 130 000 кг/м и полезное действие 1 кг динамита № 1 в 75 000 кг/м.

<sup>3</sup> W. B. Haines. Studies in the physical properties of soils. I Mechanical properties concerned in cultivation. The Journal of Agricultural Sciences, vol. XV, part II, April, 1925.

грубых глыб, роговообманковых пород или флинта (Flint). В случае, если кварцевые жилы пересекают вкось забой штольни, они вызывают скольжение и искривления стальных буров.

Так, например, затруднения, обусловленные наличием кварцевых жил, были встречены в местности Porcupine Gold Mining District в Канаде, или, по данным Stiny, в гнейсах области Тейгитш в Швейцарии. В туннеле Brandleitertunnel железной дороги Эрфурт—Гримменталь—Ритшенгаузен пришлось внедриться в „кристаллические роговообманково-порфириновые штоки“, и продвижение забоя (при ручных работах) снизилось до 0,4—0,8 м в сутки<sup>1</sup>. Несколько лет тому назад при проходке одного туннеля в Малой Азии большие потери денег и времени были причинены наличием мощных внедрений флинта, пересекавших туннель в поперечном направлении. В Персии одно английское предприятие при подготовке нефтяного участка встретило залежи флинта, представлявшие трудно преодолимое препятствие для буровых инструментов. При проведении Рондо-туннеля (Rondont-Tunnels) Кэтскильского водопровода в Нью-Йорке наиболее трудно проходимой породой оказалась силурийские конгломераты, связанные кремнистым цементом. Конгломерат состоял почти исключительно из округленных кварцевых зерен и галек, размерами в пределах от доли миллиметра до 10 см. Так как расходы по выемке этой породы составляли существенный пункт в предварительных сметных предположениях, то до начала работ было приступлено к определению сопротивления породы добыче путем проведения пробной штольни в 30 м длиной<sup>2</sup>.

При проведении туннелей в несцементированных ледниковых отложениях на стоимости выемочных работ неблагоприятно может отражаться наличие крупных валунов.

## 2. ДАВЛЕНИЕ ПОРОД НА СТВОЛ ТУННЕЛЯ.

Давление, которое породы производят на крепь и ствол туннеля, зависит от столь разнообразных факторов и теоретически столь трудно поддается определению, что в деле предсказания размеров давления приходится в лучшем случае довольствоваться грубой приблизительной оценкой его. Более точные данные могут быть получены только путем опыта, извлекаемого при ведении впереди забоя пробной штольни (Richtstollen). Для определения давления, производимого породами на крепь, А. Бирбаумер предлагает<sup>3</sup> включать в места сочленений деревянных крепежных брусьев калиброванные по давлению пробные деревянные бруски и наблюдать производимые в них давлением зазубрины или изломы Табл. XI дает представление о значениях, которые могут принимать давления пород различного качественного состава. Значения эти были полу-

<sup>1</sup> Der Brandleitertunnel der Eisenbahn Erfurt—Grimmental—Ritschenhausen. Zentralbl. Bauverw., S. 192, 200, 1881.

<sup>2</sup> L. White. The Catskill Watersupply of New York City. New York, 1913. См. также Ch. P. Berkey. Geology of the New York City (Catskill) Aqueduct. Education Dept. Bulletin 489, Albassy N. Y., p. 45.

<sup>3</sup> A. Bierbaumer. Die Dimensionierung des Tunnelmauerwerkes, S. 25—28. Leipzig, W. Engelmann, 1913.

Таблица XI.

Характер породы	Давление на кровлю		Крепление туннеля		Примечание
	во время производства горных работ	в течении последующего времени	Род крепления	Характер давления	
	Тонны на м <sup>2</sup>				
Скала более или менее хрупкая	0	8—12	Редкое и легкое	Отсутствует или незначительное	Незначительное разрыхляющее давление
Связанный гравий, очень хрупкая скала. Мягкие породы, незначительной мощности	10	35	Редкое и сильное	Незначительное	Довольно сильное разрыхляющее действие давления, незаметное во время производства горных работ
Окатанный гравий, очень хрупкая скала (обрушения кровли)	20—25	35	Частное и сильное	Не чрезмерное	Довольно сильное разрыхляющее действие давления, заметное уже во время производства горных работ. Заранее предвидимая трудность в достижении устойчивости
Мягкие породы, довольно значительный покров, наблюдается давление (также плыучесть)	35	50	Очень частое и сильное	Значительное	—
Мягкие породы, очень значительный покров, очень сильное давление	50	120	Возможно более частое и сильное (жесткие подушки) (Schwellen)	Вплоть до обрушения	—

чены чисто эмпирическим путем на основании данных, извлеченных из практики туннельного строительства.

Для того чтобы до приступа к работам на основании геологического изучения местности вывести заключение о размере возможных давлений, необходимо прежде всего составить более или менее ясное представление о сущности горного давления. В наших

знаниях в этой области, несмотря на достигнутые за последние двадцать лет успехи, все еще наблюдаются значительные пробелы. В целях исследования сущности давления пород, согласно Rziha, представляется целесообразным подразделить породы на четыре главных типа, в зависимости от механических факторов, обуславливающих давление. Эти типы следующие: а) сухие сыпучие породы, б) пльвучие породы, с) твердые (однородные) породы и d) пластичные породы (неправильно называемые также „пучающимися“, „blähendes“, или „вздувающимися“, „quellendes“).

а) Сухие сыпучие породы (сухой песок или гравий). Свойства этих пород были теоретически охарактеризованы уже много лет тому назад. Как только верхняя часть крепления штольни сдает, напряжения автоматически распределяются в самой породе, налегающей на крепь, и крепь разгружается так, что давление в ее верхней части принимает значение, не зависящее от высоты расположенного над ней покрова (за исключением случая, когда высота покрова очень незначительна). Среди главных основателей современных теорий можно назвать Форхгеймера и Бирбаумера. Оба исследователя приходят к заключению, что давление, приходящееся на единицу поверхности верхней части крепления, увеличивается прямо пропорционально ширине штольни и зависит исключительно от удельного веса  $\gamma$  и угла внутреннего трения  $\varphi$  обнаженной породы. Оносительно величины давлений в обеих теориях, однако, приводятся весьма различные значения.

Форхгеймер принимает, что в песке образуются две вертикальные плоскости скольжения, отстоящие одна от другой на расстоянии, равном удвоенной ширине штольни ( $2b$ ). Соответственно этому стремящаяся к обрушению и задерживаемая сопротивлением крепи масса породы имеет форму вертикальной призмы, опирающейся на потолок крепи своим основанием. Силе веса призмы сопротивляются развивающиеся в плоскостях скольжения силы трения. Обрушение призмы вызывается разностью между этими противоположно действующими силами. Если выразить эту разницу в функции от высоты призмы, то оказывается, что значение ее при определенной высоте призмы достигает максимума. Этот максимум равен

$$p = \gamma \frac{1 + 2 \operatorname{tg}^2 \varphi}{\operatorname{tg} \varphi} \cdot \frac{b}{2}.$$

Как видно отсюда, теория Форхгеймера предусматривает условия, имеющие место в случае весьма рыхло сложенной песчаной массы. В случае плотного сложения массы последняя лишена надлежащей подвижности, необходимой для образования плоскостей скольжения Форхгеймера. Вместо призмы из нависшей массы освобождается сначала один только клин, и давление, вызываемое собственным весом этого клина, согласно А. Бирбаумеру, равно

$$p = \frac{1}{2} \gamma b \operatorname{tg} \varphi_1$$

Если принять  $\gamma$  равным 1,6 и угол  $\varphi_1 = 33^\circ$ , то для давления на потолке выемки (Ausbruch) шириной в 8 м получаются следующие значения:

По Форхгеймеру . . . . .  $p = 9,1 \text{ т на м}^2$   
По Бирбаумеру . . . . .  $p = 4,9 \text{ „ „ „}$

Давление на потолок должно выразиться величиной, лежащей между этими двумя пределами.

Из опыта, почерпнутого при работах, производившихся в Сило (Silobau), выяснилось, что условия давления и перераспределение напряжений при медленном оползании материала в пустое пространство меняются лишь в незначительной степени.

Удельный вес и угол внутреннего трения встречающихся в природе сухих сыпучих горных пород также лишь мало отличаются от указанных значений. Поэтому и давление на потолок при ширине выемки в 8 м никогда не могло бы превзойти примерно 10 т на  $\text{м}^2$  в том случае, если бы статические условия в других породах подчинялись тем же законам, чего, однако, не наблюдается.

**в) Плывучие породы.** Плывучие породы во многих случаях состоят исключительно из чистого мелкого песка, поры которого заполнены водой (пывун). При совершенно ненарушенном залегании такой песок в отношении давления подчинялся бы тем же законам, как и песок сухой. Пришлось бы только в формулах добавить к удельному весу еще и давление потока (Strömungsdruck), которое на песчинки оказывает вода, просачивающаяся по направлению к стволу туннеля. На практике, однако, ведение добычных горных работ в мокром песке без нарушения находящегося позади крепи материала не представляется возможным. Вода, протекающая через зазоры, вымывает песок в выемочное пространство. Образующиеся таким путем пустоты заполняются новым материалом, причем разрыхление песка распространяется в направлении от выемки внутрь массива. Поры разрыхленного материала заполняются притекающей к нему водой, и коэффициент внутреннего трения пропитанной водой разрыхленной песчаной массы снижается до небольшой дробной части своего значения в отношении той же массы в условиях ее ненарушенного состояния. Это явствует из многочисленных наблюдений, сделанных в условиях открытых горных работ, производившихся в области грунтовых вод. Разрыхленный мелкий песок в состоянии пропитанности водою течет по плоскостям, занимающим почти горизонтальное положение, а в горных местностях при образовании муров то же свойство проявляет и пропитанный водой грубозернистый гравий<sup>1</sup>. Если значение  $\varphi$  в формуле Форхгеймера снижается с  $\text{tg } 33^\circ = 0,65$  до 0,2 или 0,1, то величина давления на потолок увеличивается с 9,1 до 17,3 и даже 32,5 т на  $\text{м}^2$ , а напор, обусловленный потоком подступающей воды, вызывает большее повышение давления. Таким образом явления, наблюдавшиеся в пывучих породах, отнюдь не находятся в противоречии с теорией Форхгеймера, поскольку имеется в виду снижение коэффициента внутреннего трения, вызываемое разрыхлением песка в области грунтовых вод. Как только причина сниже-

<sup>1</sup> См. главу II об оползнях.

ния трения—капельно-жидкая вода—устраняется путем дренажа или приводится в твердое состояние замораживанием, затвердевает также и порода. Этим фактом пользовались уже более полувека тому назад во Франции при проведении Габаского туннеля (Habastunnels) длиной 286 м.

Хороший пример затруднений, вызываемых встречей с водоносными залежами песка, представляют собой затруднения, имевшие место при проведении на линии Швейцарской северо-восточной железной дороги Эммерсбергского туннеля (рис. 75), который на участке между станцией Шаффгаузен и Рейном пересекает горную возвышенность, состоящую из моренных отложений<sup>1</sup>.

Морена состояла из синего супеска с включениями валунов известняка, поверхность которых имела штрихи, и крупных гнезд—частью сухого, частью водоносного мелкого песка. Супесок был плотным и добывался взрывными работами<sup>2</sup>. Сухой песок был настолько плотно сложен, что его можно было выбирать без крепления отвесным забоем высотой в несколько метров. Мокрый же песок в разрыхленном состоянии приходил в равновесие лишь при откосе 1:10. Главное затруднение заключалось в том, что, несмотря на самое тщательное крепление и плотную заделку, при продвижении работ нельзя было воспрепятствовать вытеканию с водой мелкого песка. Приток воды на северной стороне возрос до 160 л в минуту, а затем снизился до 60 л. Вода по многократным измерениям содержала одну треть мелкого песка. Таким образом, количество вытекающего песка составляло объем около 1 м<sup>3</sup> в час, что повлекло за собой последующую осадку расположенного выше сыпучего щебня и поверхности на глубину до 6 м. Осадка материала в расположенные над крепью пустоты совершалась иногда внезапно, причем крепи приходилось временно выдерживать чрезвычайно высокое давление. В одном месте, где песок был перекрыт не щебнем, а плотным супеском, между последним и выемкой образовалась пещера высотой 6, длиной 16 и шириной 8 м. В целях преодоления строительных затруднений была сделана попытка продолжать выемку под давлением сжатого воздуха. Однако вместо того, чтобы довести давление воздуха, как намечалось, до упругости в 0,5 атм., оказалось невозможным поднять его свыше 0,1 атм. Утечки воздуха через песок, правда, не наблюдались, но воздух высушивал песок вдоль кладки, обнажал швы вследствие выдувания песка и уходил через щели кладки в туннель.

При прохождении плавучих пород лишь в редких случаях можно получить надежные данные относительно плотности сложения песка в ненарушенном состоянии. Из опыта, приобретенного в деле устройства фундаментов, можно однако заключить, что один и тот же песок может проявлять большую или меньшую склонность к „текучести“, в зависимости от того, имеет ли он рыхлое или плотное сложение..

<sup>1</sup> Der Emmersberg-tunnel bei Schaffhausen. Schweizer Bauztg., II, S. 67, 75, 1894 u. I, S. 135, 1895.

<sup>2</sup> Прим. ред. Взрывные работы в вязком суглинке повидимому были обусловлены присутствием многочисленных валунов.

Известен также рыхло залегающий галечник, хотя он и редко встречается. В Вене во время земляных работ на углу улиц Берг и Вассергассе был вскрыт не содержащий песка рыхлый галечник<sup>1</sup>. Слой галечника был настолько подвижен, что часть крепи пришлось оставить в котловане. При устройстве коллектора на улице Иоганнисстрассе в Кельне пришлось внедриться в пласт, состоящий из пльвуна и галечника (мелкое зерно до размера яйца и более грубые включения). Материал этот оказался настолько подвижным (rollig), что пришлось работать с забивной крепью и оставить в грунте все крепление до свай включительно<sup>2</sup>.

Подобные неустойчиво залегающие скопления галечника могут образоваться в природе, повидимому, только в том случае, если он с большой скоростью осаждается из несущего его потока, образующегося при быстром спаде катастрофического половодья, или же вследствие того, что из промежутков когда-то плотно залегавшей массы гравия водой с течением времени выносятся находившиеся в нем тонкие частицы (выносы путем эрозии, как это имеет иногда место при углублении рекой своего ложа, или путем растворения тонких частиц в известковистом гравии).

Склонность к текучести по причинам, обусловленным законами гидравлики, увеличивается с уменьшением крупности зерна. Наиболее неприятными являются некоторые, обладающие слабым сцеплением, непластичные или слабо пластичные и слабо проницаемые разновидности грунта, поскольку они не подверглись уплотнению путем высыхания.

К этим разновидностям между прочим относится „курцавка“ (Kurzwacka), смесь глины (супеска) и мелкого песка, встречающаяся в угольных районах Силезии и требующая со стороны рабочих-крепильщиков проявления величайшего умения. Еще не выяснено, происходит ли оживание (Flüssigwerden) этой и подобных ей разновидностей грунта тем же путем, как и пльвучесть песков — вследствие постепенного, вызванного нарушением структуры увеличения объема пор, или же оно является следствием связанного с нарушением структуры уменьшения сил сцепления при постоянном водо-содержании (по рис. 3, стр. 32).

Особый род оживания имеет место в том случае, когда не особенно мощная свита пород, состоящая из глинистых слоев, в сухое время года под влиянием туннельных работ становится сильно трещиноватой. Осенью трещины заполняются водой. Кажущееся сцепление становится равным нулю, заключенные между трещинами целики растрескиваются, материал перемешивается с водой, и порода становится склонной к оплыванию.

Построенный в 1843 — 1844 г.г. Стэмплтонский туннель на железнодорожной линии Бристоль—Глочестер длиной в 500 м (углистый мергель каменноугольной формации, покров мощностью в 12 м) был начат постройкой ранним летом, причем давление пород было незначительно. Поздней осенью, вследствие затяжных ливней, давление очень быстро возросло, поверх туннеля образовалась

<sup>1</sup> F. D e h m e. Zeitschr. d. Österr. Ing. u. Arch. Ver., S. 393. Wien, 1899.

<sup>2</sup> Ausführung eines Sammelkanales in der Johannisstrasse in Köln. Zentralbl. d. Bauverw., S. 365, 1893.

мульда, и часть туннеля обрушилась <sup>1</sup>. Обрушение Алтенбекенерского туннеля также произошло в связи с имевшими место затяжными ливнями <sup>2</sup>.

В нормальных случаях наличие пльвучих пород возможно предсказать на основании результатов геологической съемки и данных двух или трех буровых скважин. Исключения представляют гнезда и линзы мелкого песка, нередко встречаемые в отличающихся устойчивостью ледниковых отложениях. Форма залегания этих включений настолько неопределенна, что установить их наличие и размеры оказывается возможным только путем систематического бурения (рис. 75).

Такие гнезда, например, повторно и неожиданно встречались при проведении шахты и устройстве водопроводного туннеля

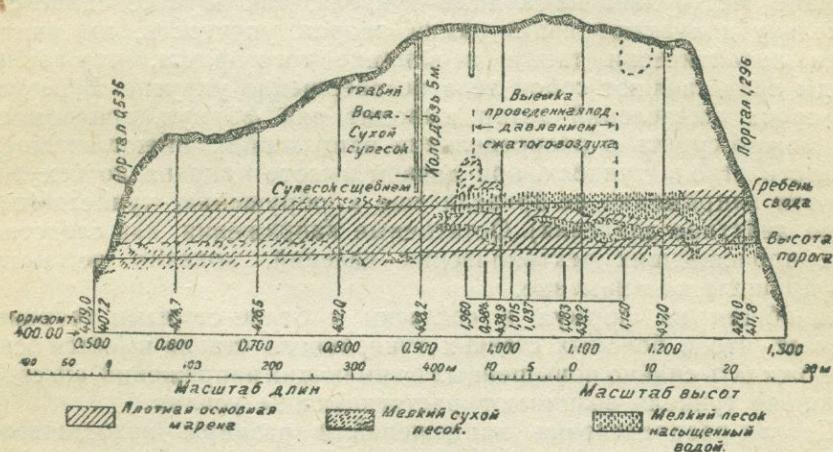


Рис. 75. Геологический профиль Эммерсбергского туннеля (по Hannings).

в Чикаго. С ними встречались также при работах по заложению фундаментов в серых плейстоценовых глинах в Вашингтоне.

Если при проведении туннеля неожиданно внедряются в обширную водосодержащую залежь мелкого песка, то значительные сверхсметные расходы становятся неизбежными.

с) Твердые однородные породы. В отношении этого рода пород формулы, выведенные для сыпучих и пльвучих пород, неприменимы, так как распределение напряжений, обусловленное выемкой породы в туннеле, подчиняется в данном случае не законам равновесия сил трения, а законам упругих напряжений и растяжений. При равновесии сил трения взаимному сдвигу отдельных частиц сопротивляются исключительно силы трения, действующие по поверхности соприкосновения частиц, причем величина этих сил зависит только от давления и не зависит или зависит лишь в слабой степени от изменения положения частиц, происходящего в сухих агрегатах.

<sup>1</sup> F. W. Simms. Practical Tunneling, 4 Aufl. New-York, 1896.

<sup>2</sup> E. v. Willmann. Zur Frage der Tunnelerhaltung, Zentralbl. d. Bauverw., S. 521, 1909.

В противоположность этим условиям в упругих телах при изменении их формы возникают сопротивления, величина которых является функцией этих изменений. Поэтому в несвязанных массах, с одной стороны, и в твердых упругих породах—с другой, совершенно одинаковые внешние условия, как равно и действие идентичных сил вызывают в корне различные состояния напряжения.

На основании предварительных работ Кирша (1898)<sup>1</sup>, полуэмпирических данных Е. Виллмана<sup>2</sup> и экспериментальных исследований Ф. Виллгейма и Леона<sup>3</sup>, И. Шмидту из Базеля удалось более точно теоретически осветить проблему распределения напряжений в горном массиве, имеющем туннельное отверстие<sup>4</sup>. В своих исследованиях он исходит из основных уравнений высшей теории упругости и принимает во внимание предельные условия, имеющие место как на концах туннеля, так и в середине его. Поскольку допускают наши рамки теории упругости, им учитывается аналитически также и влияние того факта, что горные породы представляют собой тела несовершенно упругие. В результате своих вычислений автор выводит ряд формул, при помощи коих можно судить о распределении напряжений, имеющих место в области ствола туннеля, при данной высоте покрова до тех пор, пока эти напряжения не привели еще к обрушению туннеля (первичное действие давления). Остаточные напряжения, как следствия ранее происшедших тектонических явлений, конечно не могли быть приняты во внимание.

В общем из формул в согласии с более старыми теориями вытекает, что в боковых стенках туннельного ствола имеется основание ожидать сильно повышенных сжимающих напряжений, а в своде и подошве туннеля возникают растягивающие усилия.

Детали распределения напряжений и размеры находящегося над сводом туннеля, обуславливающего давление „вытянутого тела“ (gezogenen Körpers)<sup>5</sup>, зависят не только от высоты покрова, но в значительной степени также и от коэффициента поперечной контракции  $\mu$  горной породы.

Этот коэффициент представляет собой частное от деления величины сжатия, испытываемого телом, на величину расширения тела в нормальном к этому давлению направлении. Он может быть определен путем испытания на давление свободно стоящего, сделанного из горной породы цилиндра. Величина этого коэффициента определяет обусловленное давлением изменение объема. По измерениям, произведенным в Вашертаунском арсенале, величина  $\mu$  для горных пород изменяется в пределах от 4 до 11. Для совершенно несжимаемого тела  $\mu$  равно 2. Чем выше значение  $\mu$ , тем больше обусловленное давлением изменение объема.

<sup>1</sup> G. Kirsch. Die Theorie der Elastizität und die Bedürfnisse der Festigkeitslehre. Zeitschr. d. Ver. Deutsch. Ing., II, 1898.

<sup>2</sup> E. v. Willmann. Ueber einige Gebirgsdruckerscheinungen und ihre Beziehungen zum Tunnelbau. Fortschr. d. Ing. Wiss., 2 Gruppe, H. 26, Leipzig, 1911.

<sup>3</sup> F. Wilhelm und Leon. Ueber die Zerstörungen in tunnelartig gelochten Gesteinen. Oesterr. Wochenschr. f. öffentl. Baudienst, H. 44, 1910, H. 16, 1912.

<sup>4</sup> I. Schmid. Statische Probleme des Tunnel- und Druckstollenbaues. Berlin I. Springer, 1926.

<sup>5</sup> Прим. ред. „Разгружающийся свод“—по принятой в СССР специальной терминологии.

К сожалению, до настоящего времени нет еще никаких определенных данных относительно значения, которое коэффициент поперечной контракции принимает под влиянием высокого давления, действующего в трех главных направлениях. Пока сопротивление окружающих пород и упругие свойства последних в условиях всестороннего давления в достаточной степени еще не выяснены, все наши расчеты не выходят из пределов области спекуляций, и исследования Шмидта лишь тогда приобретут практическую ценность, когда будут более точно выявлены значения приводимых в его уравнениях постоянных величин. Шмидт, на основании полученных до настоящего времени скудных опытных данных, считает себя вправе заключить, что  $\mu$  с увеличением мощности покрова приближается к 2, т. е., что породы на значительной глубине несжимаемы. Он кроме того разделяет мнение А. Гейма о том, что породы переходят в пластическое состояние, подобно вязкой жидкости, как только разница между максимальным и минимальным значением главного напряжения превзойдет величину предельного сопротивления сжатию  $K$ . Что породы под влиянием всестороннего давления способны принимать пластическое состояние путем перекристаллизации и не сопровождающегося изломом скольжения частиц, уже с убедительностью доказано многочисленными исследованиями. Подлежит, однако, сомнению допущение, что разница в давлении, обуславливающая переход в пластическое состояние, с одной стороны, и определенное опытным путем значение сопротивления сжатию  $K$  — с другой, представляют собой величины более или менее идентичные. Недавно А. Брандзаэрт<sup>1</sup> в механической лаборатории Государственного университета в Иллинойсе производил опыты всестороннего давления над бетонными цилиндрами. Оба горизонтальных давления достигались посредством масла, а вертикальное производилось поршнем испытательной машины. В среднем сопротивление материала сжатию составляло 175 кг на 1 см<sup>2</sup>. При повышении горизонтального давления, действовавшего на боковую поверхность цилиндра, от нуля до 286 и 460 кг на 1 см<sup>2</sup>, сопротивление (разница между горизонтальным и вертикальным давлением) бетона сжатию возрастало со 175 до 1260 и 1720 кг на 1 см<sup>2</sup>.

Результаты этих испытаний приводят к предположению, что разница в давлениях, при которой начинается переход породы в пластичное состояние, в условиях более значительных глубин земного шара гораздо значительнее, чем это можно было бы ожидать на основании давно господствующего представления о твердости горных пород.

Тем непонятнее представляются те факты, которые были выявлены исследователями тектоники Альп и которые послужили для Гейма основанием для занятия им своей радикальной позиции в проблеме облицовки туннелей. Тектонические движения, проявляющиеся, например, на поперечных профилях Швейцарских Центральных Альп, по меньшей мере не согласуются с известными в настоящее время механическими свойствами горных пород, и

<sup>1</sup> A. Brandzaert. Failure of a material composed of non-isotropic elements. Det kgl. Norske Videnskabers Selskabs Skrifter, № 3, 1927. Trondheim, 1927.

попытки объяснить тектонические черты Альп при помощи классической теории сопротивления материалов представляются, повидимому, довольно безнадежными.

Это открытие направляет наше внимание на одну область учения о сопротивлении материалов, в пределах которой мы до настоящего времени не имеем еще никакой опытности. Дело в том, что господствующие представления о сопротивлении были основаны без исключения на исследованиях, при которых химическая природа материала не претерпевает изменения. В действительности сопротивление представляет собой не что иное, как одно из многочисленных проявлений состояния определенно установившегося порядка расположения молекул, т. е. проявление определенной пространственно-сетчатой структуры. Поэтому с физической точки зрения возможно предположить, что материал, находящийся в фазе изменения своей пространственно-сетчатой структуры, другими словами, изменения своего петрографического характера, вызванного переменой физических условий существования, совершенно утрачивает способность сопротивления и принимает промежуточное состояние, подобное состоянию жидкости с высоким коэффициентом вязкости вполне аморфного тела. В этом случае комплекс пластов, находящихся в фазе изменения своего петрографического состава, оказался бы подчиненным только законам гидромеханики, и тем самым было бы устранено противоречие, наблюдаемое между учением о сопротивлении материалов и результатами исследований тектоники Альп. С такой точки зрения процесс образования структуры покровов (*Deckenstruktur*) и подобных им тектонических форм представлял бы собой противоположность по сравнению с процессом образования ландшафтов (*Landformen*). Согласно законам статики слой грунта, покрывающий поверхность земной коры, как правило, должен находиться в состоянии равновесия даже и в том случае, когда он имеет угол наклона в  $30^\circ$ . Однако, вследствие происходящих в грунте едва заметных перемещений мелких частиц, грунт все-таки движется даже при весьма малых уклонах. Если бы это движение можно было кинематографически уловить и воспроизвести в условиях увеличенной скорости, то получилась бы картина движения вязкого жидкого слоя, но отнюдь не картина движения скопления зерен, подчиненного законам статики. Дело в том, что законы статики и сопротивления материалов утрачивают свое значение, как только вопрос сводится к исследованию тел, физическое и химическое состояние которых в течении времени действия на них сил претерпевает изменение.

Проверку этой и подобных ей гипотез можно будет произвести, повидимому, только на основании результатов, которые будут получены по окончании опытов по исследованию сложения пород, принятых Сандером и проводимых им с точки зрения строго физических принципов<sup>1</sup>.

Таким образом, казалось бы, можно было думать, что отмеченная выше физическая возможность наличия гидростатического

---

<sup>1</sup> B. Sander. Zur petrographisch-tektonischen Analyse. Jahrb. d. geol. Bundesanstalt, Bd. 74, H. 3 u. 4, 1923, Bd. 75, H. 1. u. 2, 1905. Zum tektonischen Festigkeitsverhalten. Neues Jahrb. f. Mineralogie u. s. w., Beilage — Bd. L, 11, Abt. B.

состояния пород в том смысле, как это понимает Гейм, создает угрозу для глубоко залегающих альпийских туннелей. На самом деле этого ни в коем случае быть не может, так как гидростатическое состояние, так же как и процесс движения оползающего грунта, проявляется лишь в течении весьма значительных промежутков времени. В практическом отношении, а именно применительно к туннельному строительству, грунт, находящийся в стадии химического изменения, должен проявлять свойства твердого тела, подобно тому как „оползающий“ плоский склон, нарушенный выемкой, подчиняется законам статики. Поэтому в даче суждения об устойчивости туннельных сводов нет основания относиться с недоверием к выводам, вытекающим из данных лабораторных исследований и законов классического учения о сопротивлении материалов.

Теоретическое разрешение проблемы напряжений в настоящее время получило уже свое осуществление; тем желательнее является дополнение его недостающими еще эмпирическими данными.

Существенных отклонений от теоретических выводов возможно ожидать лишь в том случае, когда в земной коре имеются неуравновешенные остаточные напряжения, находящиеся в связи с предшествовавшей историей тектоники данного горного участка. Наличие подобных остаточных напряжений в областях сильных тектонических нарушений с механической точки зрения не только возможно, но и в высшей степени вероятно в том случае, когда горный участок, образовавшийся вследствие бокового сдвига, выводится из состояния продолжительного покоя боковым давлением, значительно превосходящим своей интенсивностью давление, вызываемое силой тяжести. При последующем ослаблении напряжений (боковой разгрузке) при неравномерно деформированной массе в ней неизбежно местами в виде островков сохраняются участки, еще находящиеся под влиянием сил напряжения. Эти остаточные напряжения проявляются в форме „горного стреляния“ (Bergschläge), т. е. в самопроизвольном, сопровождающемся громким выстрелом, отделении осколков горной породы в несколько сантиметров толщиной. В породах, совершенно лишенных напряжений, это явление может иметь место только там, где породы сжаты давлением силы тяжести вплоть до пределов своего сопротивления сжатию. Однако, „горное стреляние“ неоднократно наблюдалось в таких местностях, где о достаточном для этого давлении от силы тяжести не могло быть и речи, например в порфирировых каменоломнях Квенаст<sup>1</sup> в Бельгии, в каменоломнях гнейса в Монсоне<sup>2</sup> штата Массачусетс САСШ, в гранитах Стормкингского напорного туннеля, Касткильского<sup>3</sup> водопровода в Нью-Йорке, при наличии налегающей толщи не свыше 330 м, и т. д. Поэтому в возможности проявления местами существенных остаточных напряжений, повидимому, не приходится сомневаться. Детальным освещением вопроса о горном „стрелянии“ и его при-

<sup>1</sup> H anker-Urban. Note sur les mouvements spontanés des roches dans les carrières. Bull. Soc. Belge de Geol., de Pal. et d'Hydrol., t. XIX; Mém. Bruxelles, p. 527—540, 1905; там же: t. XX, p. 56—61, 1906; t. XXI, p. 21—42 etc., 1907.

<sup>2</sup> W. H. Niles. Some interesting Phenomena observed in Quarryng, Proc. Boston Soc. of Nat. History, vol. XIV, p. 80, 1870/71. Boston, 1872; vol. XVIII, p. 472, 1875/76.

<sup>3</sup> L. White. The Catskill Water Supply of New York City, New York, 1913.

чинах мы обязаны К. А. Вейтгоферу<sup>1</sup>. К. Ротплец справедливо характеризует „горное стреляние“ как „наиболее жуткое из известных туннельному строительству явлений, так как защита от последствий его чрезвычайно затруднительна, и мер к предупреждению этого явления нет“. Обусловленное остаточными напряжениями „горное стреляние“ особенно жутко потому, что наличие этих напряжений в лучшем случае можно предсказать лишь в форме предположения.

Уравнения теории упругости предусматривают исключительно действие первичных сил давления. Если действие этих сил ни в одном из пунктов пройденных пород не превосходит сопротивления пород сжатию, то влияние выемки выражается только в упругом растяжении тех пород, которые залегают в неповрежденной части горного массива и находятся под влиянием всесторонне действующего на них давления. Потолочной части крепления в худшем случае приходится тогда выдерживать только давление веса расположенного над туннелем „вытянутого тела“.

В том случае, однако, если сжимающие напряжения в боковых стенках туннеля превзойдут сопротивление породы сжатию, породы будут раздавлены, и процесс разрушения распространится в направлении от туннеля к внутренней части массива (вторичное действие давления). При этих условиях с течением времени наблюдается изменение картины действия напряжений, выражающееся в том, что граница между неповрежденной и разрушенной частями пород отодвигается от ствола туннеля внутрь массива. По Шмидту, можно таким образом в окружающем туннель горном массиве различать четыре зоны:

- 1) зону быстрого разрушения;
- 2) продвигающуюся вперед зону медленного разрушения;
- 3) пластичную зону, надвигающуюся сзади без разрушения,
- 4) породы, находящиеся в покое.

Если ствол туннеля остается незащищенным, разрушение вокруг него продолжается до тех пор, пока вся выемка заполнится обломками разрушившейся породы. Если же, наоборот, туннель огражден сводом, то наступает как бы состояние вторичного равновесия; при этом давление пород воспринимается частью самим сводом туннеля, частью разгружающим сводом, образующимся внутри разрушенной части зоны (подобно действию сводчатости, проявляющемуся над замочной частью туннеля, проведенного в песке). Распределение вторичных напряжений имеет с распределением первичных почти столь же мало общего, как и с распределением тех напряжений, которые проявляются при сооружении туннеля в породах, лишенных сцепления. Растягивающие напряжения в своде туннеля в этом случае замещаются напряжениями сжатия, в боковых же стенках интенсивность давления увеличивается в направлении к внутренней части горного массива, тогда как в случае первичных напряжений это давление в указанном направлении уменьшается.

Возникают единственные два вопроса: а) почему давления, производимые зоной разрушения на сводовую часть крепления, так

<sup>1</sup> К. А. Weithofer. Ueber Gebirgsspannungen und Gebirgsschläge. Jahrb. der Geol. Reichsanstalt Wien, Bd. LXIV, S. 99—142, 1914.

часто значительно превышают то предельное значение, которое устанавливается формулой Форхгеймера, и b) каким образом движения, имеющие место в нарушенных породах, во многих случаях заменяются состоянием покоя даже в том случае, если подошва туннеля не снабжена обратным сводом (Sohlgewöbelle).

Первый вопрос можно разрешить тем, что формула Форхгеймера устанавливает только ниже предельное значение для того давления, которое может производить на туннель масса, лишенная сцепления. Если нижнюю часть слоя совершенно лишенной сцепления массы заменить подвижным клапаном, то этот клапан должен прежде всего выдерживать полное давление находящегося над ним столба породы ( $\gamma h$  на единицу поверхности клапана), и давление снижается до Форхгеймейрского предельного значения лишь постепенно, как только напряжения в нависшей части, вследствие опускания клапана, ослабнут. Это ослабление напряжений требует, однако, известной подвижности элементов массы, и в момент раздавливания объем пор раздавленной массы практически равен нулю. Прежде чем раздробленная порода окажется в состоянии, подобно песку, разрядить в самой себе господствующие в ней напряжения, она должна перейти из состояния сплошности (rogeploser Zustand) в состояние относительной подвижности. При этих условиях для снижения давления в сводовой части от величины  $\gamma h$  до нижнего предельного значения необходимо, чтобы свод опустился на значительную величину. Так как крепление штольни при сильном давлении пород следует непосредственно вслед за проведением ее, в то время как раздробление пород по статическим причинам распространяется полностью внутрь массива лишь медленно, то изменение крепью своей формы на величину, обуславливающую появление стадии минимального давления, представляется невозможным; поэтому она ломается прежде, чем давление достигнет этого минимума. Это давление, таким образом, соответствует не конечному своему, но промежуточному значению. К этому присоединяется еще следующее обстоятельство, которое в водоносных породах может иметь решающее значение.<sup>1</sup> Если порода при раздроблении измельчается до степени минеральной пыли, как это имеет место при некоторых разновидностях сланцев, то в пределах зон „быстрого и медленного разрушения“ эти породы вследствие доступа воды оплывают (schwimmendes Gebirge). Это явление обуславливает снижение величины  $\varphi$  и увеличение нижнего предельного давления  $p$ . Принимая во внимание, что промежуточное давление представляет собой статически неопределимую реакцию<sup>2</sup>, для вычисления которой в настоящее время у нас еще не имеется важнейших данных, вычисление давления по способу Форхгеймера или иным путем становится делом невозможным, и его приходится находить только эмпирически на основании данных практического опыта.

Второй вопрос (неизбежность устройства подошвенного свода при проявлении признаков вторичного давления) был несколько

<sup>1</sup> L. White. The Catskill Water Supply of New York City, p. 210—211. New York, 1913.

<sup>2</sup> Сила, величина которой зависит от степени податливости опоры.

лет тому назад предметом оживленного спора между швейцарским геологом А. Геймом<sup>1</sup> и швейцарскими специалистами по проведению туннелей Е. Висманом<sup>2</sup> и К. Брандау<sup>3</sup>.

А. Гейм придерживался того взгляда, что своды туннеля должны конструироваться настолько прочно, чтобы противостоять полному давлению находящегося над ним столба пород. При крепком граните на глубине 500 м в устройстве подошвенного свода быть может еще не встречается необходимости. Но при больших глубинах устройство такого свода неизбежно. В противном случае горные породы с течением времени вследствие своей пластичности вросли бы в полость выемки.

Гейм подтверждает свои соображения указанием на тот факт, что штольни старинных горных разработок смыкаются, что противолежащие элементы крепи некоторых туннелей (Hauensteintunnel) медленно приближаются друг к другу и что подошва туннеля постепенно поднимается. Много подобных случаев в самом деле известны. В соляных разработках около Дюрнберга у Галлейна (Hallein) можно видеть эксплуатационные штольни, поперечное сечение которых вследствие постепенного врастания в них горных пород сузилось до величины менее 1 м<sup>2</sup>. В действующих штольнях крепь только вставляется, но не расклинивается для того, чтобы предоставить породе некоторый простор для расширения, и стойки сменяются, как только прогиб их превзойдет известный предел. Следы постепенного смыкания наблюдались также в Яблункауском (Jablunkauer) туннеле, где раздавленные и надвинутые друг на друга сланцеватые глины постепенно были вдавлены в туннельную выемку<sup>4</sup>. Многие из этих явлений несомненно обязаны своим происхождением давлению пород и приводят к заключению о возможности полного зарастания туннельных стволов. Вопрос сводится только к выяснению причин, вызывающих эти явления. Если давление значительно превосходит сопротивление породы раздавливанию, то, согласно опыту, устройство подошвенного свода является необходимым, для того чтобы предупредить вспучивание почвы выемочного пространства. При умеренном же перевесе давления над прочным сопротивлением породы вследствие избыточной нагрузки (Ueberlast) устройство подошвенного свода необходимо лишь в том случае, когда раздавленная порода оказывается не в состоянии воспринимать давление. При этих условиях нарушение сплошности пород должно было бы продолжаться в направлении внутрь

<sup>1</sup> A. Heim. Tunnelbau und Gebirgsdruck (Устройство туннелей и горное давление). Vierteljahrsh. der Naturforsch. Ges. Zürich, 1905. Nochmals über Tunnelbau und Gebirgsdruck und über die Gesteinsumformung bei der Gebirgsbildung (Еще об устройстве туннелей, давлении горных пород и об изменении пород при горообразовании). Там же. 1908. — Zur Frage der Gebirgs und Gesteinsfestigkeit (К вопросу о прочности гор и горных пород). Schweiz. Bauztg., Bd. 59, 1912. — Einiges aus der Tunnelgeologie (Кое-что из геологии туннелей). Mitt. d. Geol. Ges. Wien, 1908.

<sup>2</sup> E. Wiesmann. Ein Beitrag zur Frage der Gebirgs- und Gesteinsfestigkeit (К вопросу о прочности гор и горных пород). Schw. Bauztg., Bd. 53, 1909. — Ueber Gebirgsdruck (О давлении пород). Ibid., Bd. 60, 1912.

<sup>3</sup> K. Brandau. Der Einfluss des Gebirgsdruckes auf einen tief im Erdinnern liegenden Tunnel (Влияние давления пород на глубокие туннели), Bd. 59, 1912.

<sup>4</sup> V. Pollack. Ueber Unzulänglichkeiten und Rückständigigkeiten im praktischen Erd- und Stollenbau (О недостатках и отсталости в практическом выполнении земляных работ и устройстве штолен). Zeitschr. d. Oesterr. Ing. u. Arch. Ver. 1927.

массива до тех пор, пока выемочное пространство заполнится продуктами разрушения. Этого, однако, не бывает. После того как давление превысило границу пропорциональности (Proportionalitätsgrenze), изменяется распределение напряжений в частях массива, смежных со стволом туннеля. Образуется „защитная оболочка“ (Schutzhülle), воспринимающая большую часть давления пород, и туннельный свод служит исключительно для восприятия остаточного давления. К заключению о наличии подобных защитных оболочек уже в 1909 г. пришел Е. Висман<sup>1</sup> на основании опыта, вынесенного им из практики туннельного строительства. О снижении напряжений в нарушенной зоне было указано А. Леон и Ф. Виллгеймом<sup>2</sup>. Наконец, Терцаги была сделана попытка проследить математическим путем происхождение этих защитных оболочек при допущении упрощенных условий процесса (рис. 76).

Для того чтобы составить численное представление о форме напряжений, возникающих в горном массиве, имеющем сквозное отверстие, было подвергнуто исследованию распределение напряжений в бесконечно растянутой пластине, снабженной круглым отверстием, которое находилось под влиянием давления  $p$ , равномерно действующего на него в радиальных направлениях. Решение основных уравнений упругости применительно к рассматриваемому случаю распределения напряжений в твердом, совершенно упругом материале изображено на рис. 76а в виде диаграммы. Так как напряжения в каждом месте плоскости чертежа распределены симметрично по отношению к центру, то достаточно задаться напряжением в одном из лучей, проходящих через центр отверстия, чем вместе с тем определится состояние напряжения в любом пункте плоскости чертежа. На рис. 76 ординаты пунктирной кривой I изображают давления, действующие в каждом пункте данного луча в направлении к центру отверстия. Так как на внутреннем крае отверстия в радиальном направлении никакие внешние силы не действуют, то напряжение здесь должно снижаться до нуля, между тем как в бесконечном отдалении оно увеличивается до размера внешнего давления  $p$ . Ординаты кривой II

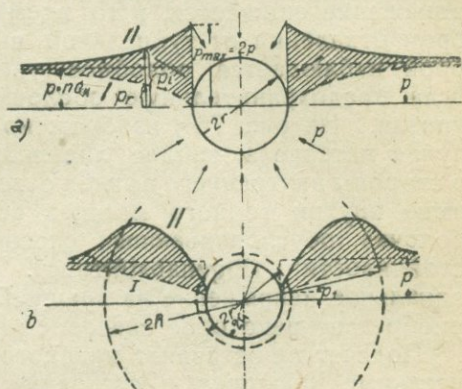


Рис. 76. Распределение напряжений в частях, смежных с цилиндрическим отверстием, а — в твердом упругом материале, б — в материале, не связанном сцеплением, при равномерном давлении в радиальном направлении.

<sup>1</sup> E. Wiesmann. Ein Beitrag zur Frage der Gebirgs- und Gesteinsfestigkeit (К вопросу о прочности гор и горных пород). Schw. Bauztg., Bd. 53 1909 — Ueber Gebirgsdruck (О давлении горных пород). Ibid, Bd. 60 1912.

<sup>2</sup> F. Willheim, A. Leon. Ueber die Zerstörungen in tunnelartig gelochten Gesteinen. (О разрушениях в горных породах с туннельобразными отверстиями. Oesterr. Wochenschr. f. öffentl. Baudienst, N. 44, 1910. N. 16, 1912.

на рис. 76а изображают собой тангенциальные давления (Ringspannungen), действующие в каждом пункте луча в нормальном к нему направлении; для вполне упругого материала они на внутреннем крае отверстия принимают значение  $p_{\max} = 2p$ , а в бесконечном отдалении снижаются до того же внешнего давления  $p$ . Если тангенциальное напряжение  $p_{\max} = 2p$  превышает сопротивление материала сжатию, то, вследствие раздавливания его, туннель разрушается.

Существенно отличная форма распределения напряжений получается тогда, когда предметом исследования является материал, подверженный упругим и пластичным деформациям. Если в этом случае напряжение на краю отверстия превосходит предел упругости, то здесь материал начинает течь (fließen), и тангенциальное напряжение снижается, в то время как то же напряжение в некотором отдалении от туннельной выемки увеличивается. Зона, в которой наблюдается подобное увеличение напряжений, образует тогда предохранительную оболочку, препятствующую обрушению туннеля. На рис. 76б изображено распределение напряжений для случая материала, вполне лишенного сцепления, поддерживаемого со стороны внутреннего выгиба отверстия легким креплением. Здесь также внутри горного массива образуется эта предохранительная оболочка, обуславливающая способность горной породы к „самостоятельности“ (Eigenabstützung). Благодаря легкому креплению радиальное напряжение на внешней границе этого крепления также приобретает некоторое значение  $p_1$ , отличное от нуля.

Подсчет не оставляет никакого сомнения в том, что предохранительные оболочки в состоянии воспринимать на себя значительную часть общего давления пород<sup>1</sup>.

Таким образом условие, принимаемое А. Геймом в отношении необходимости устройства подошвенного свода, представляется повидимому преувеличенным, так как при этом не приняты во внимание благоприятные обстоятельства, обусловленные свойствами сопротивления уже разрушенной горной породы, а также породы, находящейся в стадии упругого изменения формы. Правила для определения формы и размеров сводов глубоко залегающих туннелей могут быть выведены только на основании практических данных туннельного строительства, которые согласно с данными теории учат, что предохранительные оболочки при умеренном перенапряжении породы не допускают воздействия давления на подошву туннеля. Углубления наших знаний в отношении тех факторов, от которых зависит эффективность вырабатываемых нами строительных мероприятий, возможно ожидать лишь тогда, когда геологические профили туннелей будут дополнены надежным данными о сопротивлении давлению горных пород, разрушенных отверстием, а также об их пространственной упругости (Raumelastizität, сжимаемость в условиях затрудненного расширения в стороны).

**д) Пластичные породы** (неправильно называемые также „пучащимися“ или „разбухающими“). При прохождении глин, мергелей и мягких сланцеватых пород часто приходится наблюдать, что грунт

<sup>1</sup> Terzaghi. Erdbaumechanik, S. 211 — 215. Wien, 1925.

разбухает (глина) или крошится и разрушается (мергель, сланец) и внедряется в выемку, причем давление на крепь сильно возрастает. Уже в старейших отчетах из области туннельного строительства имеются многочисленные указания на подобные затруднения, встреченные при проведении железнодорожных туннелей. Эти старинные отчеты поучительны еще и потому, что затруднения, причинявшиеся указанным свойством пород, как совершенно новые, описаны очень подробно.

При постройке первых английских железных дорог „явления вспучивания“ наблюдались главным образом в лондонской глине и в частично отвердевшей мергелистой вэлдерской глине (Wälder-Ton, „blue bind“). Лондонская глина „сильно пучится“ даже в том случае, когда она подвергается воздействию воздуха в течение хотя бы нескольких часов. В Ричмонде один колодец диаметром 1,2 м был за ночь совершенно заполнен „пучащейся массой“. В туннелях железной дороги Манчестер-Болтон крепление неоднократно раздавливалось пучащейся глиной, несмотря на то, что этот материал был „повидимому совершенно сух“. В Бакстуннеле (Bax-Tunnel) большой Западной жел. дор. (Great Western Rv.) между глиной и креплением, как правило, всегда оставлялось свободное пространство размером в 15 см, для того чтобы дать глине возможность расширяться; однако этот промежуток оказывался едва достаточным. Встреченная в Блэчингли-туннеле (Blechingly-Tunnel) мергелистая вэлдерская глина была жирна на ощупь и при выемке ее приходилось применять взрывные работы. В контакте с воздухом она пучилась и распадалась. Давление пород принимало столь значительную величину, что дубовые стойки, диаметром 35—40 см, надламывались. Интенсивность давления в разных местах была различна. В некоторых местах давление даже совершенно отсутствовало. Обычно близ концов туннеля давление проявлялось главным образом в его сводовой части, между тем как в середине туннеля (наибольшая мощность налегающей толщи) большая часть давления приходилась на боковые стенки. Большое давление в сводовой части всегда находилось в связи с образованием над ней поверхностного углубления (obertägige Mulde). При проведении вспомогательных шахт наблюдалось, что глина была пересечена многочисленными трещинами и сбросами. В Примроз-Хилл-туннеле (Primrose-Hill-Tunnel) пучащаяся глина выдавливалась из швов кладки свежую известку и, в конце концов, раздавливала кирпичи. В Незертонском туннеле (туннель под каналом Netherton-Dudley Port, 1856—1858) пучением „blue bind“ (вэлдерской глины) на протяжении участка около 40 м длиной был поврежден подошвенный свод туннеля. В одном месте пучение достигло 200 см и сопровождалось раздавливанием кирпичей<sup>1</sup>. При проведении Мильзебургского туннеля (Milseburg-Tunnel) вспомогательной железной дороги Фульда—Тан (Fulda—Tann, 1158 м) были пройдены известняк Röth—179 м, пестрый песчаник (700 м) и пестрый песчаник (279 м), а также несколько базальтовых жил. Условия залегания пород были в общем благоприятны. Однако Röth оказался обладающим неприятным свойством—при доступе

<sup>1</sup> F. Simms. Practical Tunneling. 4 издание. New York, 1896.

воды и воздуха быстро выветривался и совершенно разрушался, причем, вследствие происходящего при этом расширения, развивалось непреодолимое давление. Так, например, случалось, что передовую штольню почти не приходилось крепить. По прошествии же некоторого времени развивалось такое давление, что сильнейшая деревянная крепь ломалась, и приходилось прибегать к усиленному креплению потолка. На всем протяжении Röth пришлось устроить подошвенный свод. В противоположность этому в пестром песчанике, оказавшемся местами мягким, давление или не проявлялось вовсе или же наступало тотчас вслед за выемкой породы <sup>1</sup>. При предварительных работах по восстановлению туннеля у Бюдингена (Büdingen, 535 м, линия Giessen—Gelnhausen) оказалось, что налегающая толща состоит из мергелистых глинистых сланцев, которые в верхней части подверглись сильному выветриванию, а с глубиной становилось крепче. Мергель был доломитизирован и содержал около 35% глины. В контакте с воздухом и водой он распался на тонкие сланцеватые пластинки, причем развивал очень сильное давление (максимальная мощность налегающей толщи 33 м; залегание почти горизонтальное и равномерное; несколько поперечных трещин). Выемка невыветрившейся породы требовала применения взрывных работ <sup>2</sup>. При работах по проведению туннеля Гейлбронн-Вейнсберг (Heilbronn-Weinsberg) давление было вызвано, повидимому, процессом присоединения воды, связанным с превращением ангидрита в гипс <sup>3</sup>. При устройстве Гохштрасского туннеля (Hochstrass-Tunnel) на линии железной дороги Фридберг—Пинкафельд (Friedberg—Pinkafeld, 523 м, наибольшая мощность пород 35 м) причиной встретившихся при работах затруднений явились водосодержащий суглинок и „пучающаяся синяя глина“ (blauer Tegel). Давление пород по мере продвижения работ настолько возросло, что крепления сплошными дверными окладами оказалось недостаточно. После того как попытку продолжать работы при помощи предохранительного щита равным образом постигла неудача, пришлось от продвижения забоя с этой стороны совершенно отказаться. В двух местах произошли обрушения, сопровождавшиеся провалами на дневной поверхности <sup>4</sup>. Согласно Стапфу, линейное удлинение разложившегося слюдянистого гнейса в Готтардском туннеле при вспучивании составляло 2,9% <sup>5</sup>.

<sup>1</sup> Der Bau des Milseburg-Tunnels der Nebenbahn Fulda—Tann (Работы по проведению Мильзбургского туннеля вспомогательной железной дороги Фульда—Тан). Zeitschr. f. Bauwesen, 1892.

<sup>2</sup> Walloth. Wiederherstellung und Trockenlegung des Tunnels von Büdingen (Восстановление и осушение туннеля у Бюдингена). Organ für den Fortschritt des Eisenbahnwesens, Bd. 50, S. 415, 1913.

<sup>3</sup> Tunnel Heilbronn-Weinsberg. Jahresh. des Vereines vaterländ. Naturkunde, XX S. 165, Württemberg, 1864.

<sup>4</sup> Randzio. Neuere Stollenbauten (Новейшие работы по проведению штолен). Die Bautechnik, S. 343, 347, 1925.

<sup>5</sup> V. Pollack. Über Vorbildung in der praktischen Geologie (О наглядности в практической геологии). Die Steinindustrie, Halle a. d. S., по Стапфу, Jahr b. d. preuss. geol. Landesanstalt für 1888. По Стапфу, в Готтардском туннеле на участке между 7478 и 7540 м тянулся разрушенный, большею частью несколько разложившийся слюдянистый гнейс. Еще свежий по внешнему виду, но разрушенный слюдянистый гнейс имел уд. вес 2,71, потеря от прокаливания составляла 0,41%. Он впитывал без заметного увеличения объема 1,95% воды. Вполне разложившийся,

Из горных пород, которые, повидимому, особенно сильно реагируют с водой, в сухом же состоянии обнаруживают большей частью нормальное сопротивление нагрузке, можно назвать следующие: суглинок (Liegendletten), залегающий в лежащем боку большинства буроугольных копей сев.-зап. Богемии (третичный); разложившийся филлит в альпийских буроугольных коях Зеерабена и Гарта (Seegraben und Hart) около Глогница (Gloggnitz), а также „мыльный сланец“ („Steifenschiefer“) в лежащем боку угля буроугольной копи Фонсдорф<sup>1</sup>.

Из сделанного сопоставления можно заключить, что некоторые мягкие породы, в особенности глина или глинистые породы, в частях массива, расположенных вокруг туннелей, размягчаются и с большой силой внедряются в выемку, причем во многих случаях давление развивается лишь постепенно. Уже много лет тому назад Поллак, на основании обширного опыта, вынесенного им из практики туннельного строительства и земляных работ, пришел к заключению, что явления, известные под названиями „разбухания“ или „вспучивания“, отчасти, а в некоторых случаях даже и полностью представляют собою проявление одного только давления горных пород<sup>2</sup>. Чтобы выяснить вопрос о том, каким образом подобные явления могут вызываться давлением горных пород, нужно прежде всего ближе ознакомиться с теми породами, в которых эти явления обычно происходят. Такими породами являются: 1) глины, 2) мергели, 3) разложившиеся (выветрившиеся) горные породы и 4) разновидности горных пород, претерпевающие при доступе воды химические изменения.

1. *Проявления давления в глинах.* Если в мягкой глине сделать открытый разрез (Schlitz), то нередко случается, что почва разреза поднимается, между тем как стенки продолжают оставаться исключительно под влиянием нормального давления земли (давления силы тяжести). Никому не пришло бы в голову назвать это явление „вспучиванием“. Оно представляет собой исключительно следствие превышения сопротивления материала нагрузке, вызванного весом находящихся по обеим сторонам выемки глиняных масс. И действительно, всегда оказывается возможным остановить это „вспучивание“ путем подвода воды, т. е. заполнением выемки водою. Так бывает в большинстве случаев. В более редких случаях постепенно усиливается давление также и на распорки, и тогда бывает необходимо время от времени заменять их более короткими. В этих случаях можно было бы предполагать

---

имел уд. вес 2,77, потеря от прокаливании составляла 1,87%. Он впитывал 11,1% воды, причем в направлении сланцеватости удлинялся на 2,9%.

<sup>1</sup> V. Pollack. Ueber Frostwirkung, Quellung (Quellungsdruck) u. s. w. [О действии мороза, разбухании (давлении от разбухания) и т. д.]. Technische Blätter. Teplitz-Schönau. 1921.

<sup>2</sup> V. Pollack. Ueber Frostwirkung, Quellung (Blähungsdruck) u. s. w. [О действии мороза, разбухании (давлении от вспучивания) и т. д.]. Technische Blätter. Teplitz-Schönau. 1921. — Ueber Quellung oder Blähen. (О разбухании или вспучивании). Verh. d. Geol. R. A. Wien, 1916, S. 106. — Ueber Unzulänglichkeiten und Rückständigigkeiten im praktischen Erd- und Stollenbau (О недостатках и отсталости в практическом выполнении земляных работ и устройстве штолен). Zeitschr. d. Österr. Ing. u. Arch. Ver., 1927. — Ueber Vorbildung in der praktischen Geologie (О наглядности в практической геологии). Die Steinindustrie, Halle a. d. Saale, 1925.

„вспучивание“. Понятие „вспучивание“, однако, в общепринятом смысле этого слова включает в себе предположение об увеличении объема в связи с доступом влажного воздуха. Между тем, если из боковой стенки извлечь кусок глины и поместить его в пространство, насыщенное водяным паром, как это сделал Терцаги, то объем этого куска не изменяется<sup>1</sup>. Поэтому в данном случае о „вспучивании“ глины не приходится и думать. Явление это представляет собой исключительно процесс упругого расширения глины, вызванный уменьшением испытывавшегося ею бокового давления. Модуль упругости жирной глины на глубине 10 м от поверхности, по Терцаги, составляет примерно 40 кг на 1 см<sup>2</sup> и по мере разгрузки еще значительно снижается. Модуль упругости горных пород — порядка 200 000 кг на 1 см<sup>2</sup>. Если бы модуль упругости гранита был столь же низким как у глины, то и гранит, подобно последней, стал бы также сильно „вспучиваться“ при проведении в нем разреза или туннеля. Но только процесс вспучивания не протекал бы постепенно, а совершался бы немедленно. Замедление, наблюдаемое в процессе вспучивания глины, объясняется тем, что глина состоит из двух компонентов — глины и воды, из коих каждый почти несжимаем. Упругое расширение свежее добытой глины заключается не в упругом расширении ее обоих компонентов, но в упругом изменении ее сложения, связанном с поглощением воды, подобно тому как при поглощении воды происходит увеличение объема губки. Вода ни в коем случае не воспринимается из воздуха, но заимствуется из запасов воды, наиболее близко расположенных от ствола туннеля. Такими ближайшими запасами, как правило, являются воды, находящиеся в водоотводном кювете подошвы туннеля. За ними следуют запасы воды, расположенные в недрах глины. Процесс впитывания воды в зависимости от объема, времени и проницаемости был выражен Терцаги численными показателями<sup>2</sup> и сходен в принципе с процессом, изображенным на рис. 77.

Мелкопористая губка, нижняя часть которой находится под водой, удерживается в сжатом состоянии при помощи нажимной пластинки (рис. 77b). Если открыть отверстие в нажимной пластине (77c), то губка через него выпирает кверху, причем она всасывает воду из находящегося внизу запаса последней.

Чем мельче поры губки, т. е. чем меньше ее проницаемость, тем больше требуется времени для ее разбухания, так как, вследствие поверхностного натяжения воды, губка вынуждена расширяться так, чтобы увеличение ее объема в точности соответствовало проникающему в нее количеству воды<sup>3</sup>. В недрах глины в пустые пространства является таким образом не чем иным, как процессом совместного действия силы тяжести (давление пород, *teiner Gebirgdruck*) и упругого расширения материала в связи с поглощением воды.

Чем мягче консистенция глины, тем более выпирание последней, вызываемое давлением пород, преобладает над движениями материала, обусловленными упругим расширением его. Энергично

<sup>1</sup> К. Terzaghi. *Erdbaumechanik*, S. 215. Wien, Franz Deuticke, 1925.

<sup>2</sup> и <sup>3</sup> К. Terzaghi. *Erdbaumechanik*. Wien, Franz Deuticke, 1925.

„разбухающая“ лондонская глина известна в то же время как пода- тливый строительный грунт. При давлении на грунт в 4—5 кг на 1 см<sup>2</sup> возводимые на лондонской глине постройки весьма часто про- являют опасную осадку, величина которой с течением времени воз- растает. Само собой разумеется, что подобная глина „вращает“ в туннель, если она под боковыми стенками под влиянием веса налегающей толщи пород испытывает нагрузку в 10 кг на см<sup>2</sup> и более. Представление о том, что процесс „разбухания“ глины вызывается соприкосновением ее с влажным рудничным воздухом, должно быть отнесено к области басен.

Принимая во внимание незначительное сопротивление глины давлению и малую величину ее модуля упругости, следует пояснить, почему глины в туннелях не „разбухают“ сильнее и не проявляют более сильного давления, чем это в действительности наблюдается в практике туннельного строительства. Объяснение этого явления, согласно Терцаги, усматривается в том, что напряжений в глине,

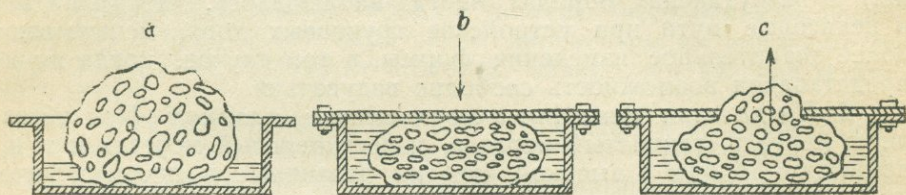


Рис. 77. Процесс впитывания воды глиною, представленный примером губки: *a* — без нажимной пластинки, *b* — с нажимной пластинкой, *c* — с отверстием в нажимной пластинке.

вследствие сводообразного расположения ее над туннелем, разря- жаются внутри ее собственной массы, поскольку высота налегаю- щих пород является для этого достаточной.

Старая система водоснабжения в Мемфисе, в Теннесси, между прочим состояла из системы водопроводных туннелей с поперечным сечением около 1,2 × 0,9 м в свету, которые, на глубине около 30 м под поверхностью, проходились в высоко-пластичной глине. Предел текучести этой глины находится примерно в промежутке между 50 и 90, показатель пластичности (табл. II № 13) между 25 и 60. Штольни выложены дубовыми досками толщиной около 4 см, брусья рам имеют поперечное сечение 25 × 8 см. Туннели служили водопроводом в течении 25 лет и целы еще и поныне. Мемфисское общество „Light and Power Co“ применило подобную же систему туннелей, заложенную на глубине 68 м от поверхности<sup>1</sup>. При проведении туннеля в районе водоудержательной плотины в Чикаго в твердой синей ледниковой глине в общем также не было встречено существенных препятствий, за исключением тех мест, где неожиданно обнажались гнезда сыпучих песков. При работах по проведению шахт в синей глине в Чикаго иногда встречаются пласты глины, поверхность которой в забое сводообразно вздымается. Эта глина очевидно стала бы разбухать и в случае

<sup>1</sup> Согласно письменному сообщению городского инженера В. Фаулера Wm. B. Fowler) от 11 августа 1927 г.

нахождения ее в туннеле. В физическом отношении мягкие и твердые пласты глины почти идентичны. Разница между ними заключается только в консистенции, зависящей от содержания в них воды.

При недостаточной высоте налегающей толщи могут происходить оседания или провалы на дневной поверхности, которые равным образом представляют собой исключительно результаты одного только давления пород. В таких случаях рекомендуется примыкать крепью вплотную к породе. Когда же, напротив, вследствие большой высоты налегающей толщи провалы на поверхности не могут иметь места, разбухание представляет собой побочное явление, сопровождающее переход пород из их первоначального состояния напряжения в то состояние напряжения, при котором смежные породы служат им предохранительной оболочкой. В этом случае выгоднее оставлять породе некоторый простор для расширения. Это было признано уже первыми английскими строителями туннелей при прохождении ими глинистых образований (стр. 241, Вах-Tunnel). В разбухающих породах иногда наблюдалось, что крепление и рельсовые пути при устройстве грунтовых дорог испытывают более значительное изменение формы, в том случае, когда почве представляли возможность свободно вздуться.

2. *Проявления давления в мергелистых пластах.* Под названием мергель (глинистый мергель, известковистый мергель и т. п.) понимают породы в высокой степени различные в петрографическом и физическом отношениях. Терцаг и имел случай подвергнуть исследованию одну темного цвета крепкую разновидность мергеля, которая в туннеле, повидимому, обуславливала явления разбухания. Мергель не менял своего объема ни в сухом состоянии ни при продолжительном лежании в воде, и его можно было десять раз высушивать и снова пропитывать водой без того, чтобы он ломался. Другую крайность представляет разновидность мергеля, который был извлечен из-под воды. В своем естественном состоянии этот мергель находился под влиянием значительного давления пород. Свежая проба его при высушивании показала 10% усадка, причем распалась. Другая, тоже свежая проба, при продолжительном лежании показала увеличение объема в 12%<sup>1</sup>. Вследствие такого разнообразия свойств пород, понимаемых под словом мергель, и наблюдаемые явления отличаются чрезвычайным разнообразием. Так как петрографические исследования мергелей при всей своей кропотливости приводят к разноречивым в техническом отношении результатам, то можно было бы рекомендовать, чтобы описание мергелей для целей туннельного строительства сопровождалось приведением данных: об их сопротивлении давлению; об изменениях объема при высушивании и лежании в воде; о характере и скорости размокания при сменяющихся высушивании и увлажнении, а при очень упругом материале — о результатах испытания действия в условиях возможно затрудненного расширения в стороны. Такого рода данных пока еще не имеется.

Относительно процессов, приводящих к распаду некоторых мергелей, в настоящее время нам также еще мало известно. По

---

<sup>1</sup> Исследования лаборатории Университета Колумбия в Нью-Йорке. Согласно письму Д. Е. Моган в редакцию Отдела новостей журнала.

этому поводу Дееке говорит: „Во всех наблюдениях отсутствуют данные о том, насколько в процессе разрыхления подобных пород не только вода, но и атмосферная углекислота участвуют путем разрушения известковых алюминатов. Обращает на себя внимание, с одной стороны, устойчивость разных глин и мергелей в сухих помещениях (погребях, туннелях), с другой — совершающееся при доступе влаги размокание их, сопровождаемое выделением большого количества известковых корок на швах слоистости отдельных слоев и пластинок. Разбухание вызывается не только действием одной воды, но также и химическим процессом, подобным описанному. Это явление можно уподобить процессу, происходящему под влиянием кислорода в залежах, богатых кремнекислыми соединениями железа (квасцовый сланец, септариевая глина и пр.), причем образование сульфатов, в особенности гипса, сопровождается полным расслоением сланца на тончайшие пластинки. В этом примере является прямым основанием считать причиной увеличения объема присоединение породой кислорода<sup>1</sup>: типичная (несцементированная) глина при „разбухании“ химическим изменениям не подвергается (Терцаги). При некоторых мергелях, однако, это явление может иметь место.

Наиболее неприятными, несомненно, являются те мергели, которые при доступе воды размягчаются, т. е. сопротивление которых обусловлено главным образом кажущимся сцеплением. При проведении туннеля сложение мергеля нарушается, и число имеющих в них трещин увеличивается. При доступе воды, вследствие чрезвычайного увеличения активной поверхности ее, масса превращается в кашу (стр. 230, обрушение Стемплтонского туннеля вследствие размягчения углистых мергелей под влиянием ливней и обрушение Алтенбекенерского туннеля.)

Но и при одной лишь склонности мергелей разламываться на мелкие куски под влиянием давления пород они, при одновременном доступе воды, могут образовать оползающую породу. Быстрое раскрашивание мергелей в туннеле можно, повидимому, во многих случаях считать следствием давления пород, так как на дневной поверхности процесс разрушения тех же мергелей гораздо медленнее распространяется в глубину, несмотря на то, что условия для быстрого выветривания более для этого благоприятны.

3. *Проявления давления в выветрившихся или разложившихся породах.* При оценке способности выветрившихся пород производить давление необходимо обращать внимание на то, вызвал ли процесс выветривания существенное изменение состава данной породы или нет.

Если выветривание не сопряжено с заметным обогащением породы или исчезновением какой-либо из составных ее частей, то порода утрачивает исключительно свою связность и приобретает тогда свойства рыхлой горной породы с весьма малой пористостью. При разрыхлении, вызванном производством горных работ, при одновременном доступе воды, свойство пород производить да-

<sup>1</sup> Dееcke, Vier Kapitel aus der petrographischen Geologie, S. 32 u. 33, 1919; приведено у Pollack, Ueber Vorbildungen in der praktischen Geologie und Wetterständigkeit sowie Quellung der Gesteine. Die Steinindustrie, H. 10, 11, 1925.

вление проявляется в той же примерно форме, как и у пород глыбучих.

Подобный процесс иллюстрируется, например, случаем, наблюдавшимся при восстановлении Мюлтагерского туннеля Бреннерской жел. дор. (наибольшая мощность налегающих пород 150 м). „Глинистый сланец, пройденный туннелем, отличается изменчивыми свойствами. Часто в туннеле в непосредственной близости от твердых пластов залегают такие, которые имели совершенно одинаковую с ним структуру, не были пористы и так легко крошились, что их можно было с легкостью выламывать киркою. На воздухе эта масса распадалась при доступе воды и под давлением превращалась в глиноподобную кашу, почти лишенную всякого сцепления. Мягкие слои глинистого сланца отличались обычно лишь влажным изломом, не будучи, строго говоря, водопроводящими, и вслед за обнажением нуждались только в слабом креплении. Но если сухая вначале стена стояла в течении долгого времени, то она, становясь мокрой, разрыхлялась с поверхности и начинала давить на крепь“. Если образовавшаяся таким образом кашеобразная масса стекает через щели между досками крепления то за ними образуются пустоты, которые вызывают обвалы и разрушение породы, что прежде всего проявляется в форме сильного давления на крепь<sup>1</sup>.

Это описание говорит само за себя. Кажущаяся сухость свежеобнаженной стены явно была обусловлена ее незначительной проводимостью. Твердая глина в выработке также кажется сухой, несмотря на то, что поры ее совершенно заполнены водой. Но как только порода приходит в движение, объем ее пор увеличивается, она начинает присасывать воду из смежной с нею среды наподобие губки, изображенной на рис. 77с, и выветривающийся твердый каменный массив превращается в „пльвучую породу“. Подобными процессами объясняются, повидимому, также и проявления давления, наблюдавшиеся в выветрившихся филлитах Штейрмарка.

При процессе выветривания массивных пород (гранита, андезита и пр.), связанном с выщелачиванием их, может случиться, что масса, вследствие потери некоторого количества вещества, становится пористой и проницаемой. Но можно также допустить существование глубинного процесса выветривания, обусловленного действием ювенильных вод и связанного с увеличением массы вещества. Так как процесс свободного расширения выветрившейся массы встречает препятствие в сопротивлении изгибу вышележащих неизмененных пластов породы, то увеличивающееся в массе вещество разложившейся породы должно в указанном случае находиться под давлением, значительно превышающим давление, соответствующее весу горных пород. В физическом отношении продукт выветривания массивных пород сходен с глиною, смешанною с песком. В случае потери вещества, однако, продукт выветривания, вследствие особенности приобретенного при этом строения, должен проявлять склонность к „пльвучести“, при увеличении же своей массы — развивать

---

<sup>1</sup> Die Rekonstruktion des Mühltaler Tunnels an der Brennerbahn. (Восстановление Мюлтагерского туннеля Бреннерской жел. дор.), Zeitschr. d. Österr. Ing. u. Arch. Ver., s. 29, 1878.

огромное давление, вызываемое упругим расширением материала. Описанные Штапфом явления, наблюдавшиеся при прохождении слюдянистых гнейсов Готтардского туннеля, относятся, по видимому, к этой именно категории. Систематических наблюдений в этой области до настоящего времени еще не имеется.

В некоторых северо-американских горных разработках сделано было наблюдение, что выветрившиеся полевошпатовые породы, в которых каолин частью превратился в церизит, слабо разбухают, между тем как богатые каолином продукты подобного рода выветривания очень сильно „вздуваются“ („treiben“).

**4. Проявления давления вследствие химических превращений.** Чаще всего подобные явления приписывают процессу превращения ангидрита в гипс, и продукты раздавливания, известные под названием змеевидного гипса и кишечного камня, свидетельствуют о том, что давление, развиваемое ангидритом при его разбухании, может быть весьма значительно. Возникает, однако, вопрос, может ли процесс перехода ангидрита в гипс протекать в туннеле с такой скоростью, чтобы в течении нескольких лет в нем могли произойти явления столь сильного разбухания, как это в действительности наблюдается. Дело в том, что в старых зинкверках и отвалах извлеченных из штолен пород приходилось встречать зернистые и листовато-кристаллические ангидриты, которые, несмотря на контакт с воздухом и водою в течении десятков лет, оказывались еще не превращенными в гипс. Согласно Ф. Поллаку, неизменный ангидрит встречается даже в природных обнажениях<sup>1</sup>. Ввиду этого к данным о давлениях, вызываемых химическими превращениями, следует относиться с осторожностью.

Согласно Майеру, плотный глинистый ангидрит разбухает скорее<sup>2</sup>; в Восточных Альпах это особенно хорошо наблюдается в тех местах, где он в смеси с глиной и солью образует так называемое Haselgebirge<sup>3</sup>. Эта порода в сухом состоянии обычно устойчива; во влажном виде, главным образом вследствие содержания глины, она развивает сильное давление, при большем же притоке воды приводит к прорывам ила (Schlammeinbruch).

Сказанное, однако отнюдь не должно означать, что ангидрит сам по себе никогда не разбухает.

В Капеллисбергском тоннеле<sup>4</sup> (Kapellisbergtunnel) у Гайлдорфа, который при налегающей толще в 80 м проходил последовательно по пластам гипсоносного мергеля, ангидрита и гипса, расположенным почти параллельно его подошве, нельзя было воспрепятствовать увлажнению ангидрита, несмотря на то, что в целях преграждения доступа воды было предусмотрено устройство специального водоотлива. Тотчас по окончании постройки в 1880 г.

<sup>1</sup> V. Pollack. Ueber Frostwirkung, Quellung (Quellungsdruck) u. s. w. (О действии мороза, разбухании и т. д.). Technische Blätter, Teplitz-Schönau, 1921.— Ueber Quellung oder „Blähen“ (О разбухании или вспучивании). Vortrag Verh. d. Geol. R. Anst. S. 106, Wien, 1916.

<sup>2</sup> F. Mayer. Berchtesgaden. Geogr. Jahreshft f. 1912, S. 129. München, 1913.

<sup>3</sup> Прим. пер. Глины, переполненные обломками близлежащих пород и кусками гипса и соли.

<sup>4</sup> Tunnelenbau im quellenden Gebirge (Устройство туннелей в разбухающих породах). Bautechnik, S. 437, 452 1926.

почва начала подниматься. Подъем составлял в 1889 г. 37 см, в 1898—55 см, в 1923—уже 64 см. Подошву туннеля пришлось ежегодно углублять примерно на 25 см.

Значительная растворимость гипса и ангидрита обуславливает также появление сульфатных вод, причиняющих большие затруднения при сооружении каменного крепления в туннелях или штольнях, так как они разъедающе действуют на нормальный бетон, а также и другие применяемые при каменной кладке материалы. Подобные же воды кислого характера происходят при разложении и выщелачивании пород, содержащих пирит.

Эти разрушения могут быть предупреждены, если устроить приспособление для отдельного отвода сернокислых вод и кроме того заполнить промежуток между породой и кладкой изолирующим кислотоупорным материалом; наконец, можно рекомендовать применение сульфатостойких глинистых цементов<sup>1</sup>.

В силовой установке „Flamisell Supérieur“, построенной Г. Е. Грунером из Базеля в испанских Пиренеях в 1912—1914 гг., спустя примерно 1½—2 года после постройки на некоторых участках водопроводящей штольни и шлюза (Wasserschloss) появились продольные трещины до 20 м длины и шириной в несколько сантиметров. Подробные исследования показали, что это были так называемые трещины разбухания (Treibrisse), близ которых, главным образом на внешней стороне, обращенной к породе, в бетоне и в каменной кладке известь была совершенно разрыхлена и разъедена. Исследование установило, что причиной этого явления было просачивание воды, содержащей сернокислый кальций, а частью, конечно, также содержание в бетонном щебне и песке кристаллов пирита, из которого при доступе воды образовалась разрушающая серная кислота. Правда, это явление наблюдалось также и на участках, где пирита не было, так что можно считать с несомненностью установленным, что гипс и сам по себе может оказывать на бетон вышеописанное действие. Меры противодействия в первую очередь заключались в том, что были вскрыты и обнажены находившиеся за разрушенными участками места, в которых предполагалось просачивание гипсосодержащих вод. Вода в этих местах была тщательно каптирована и отведена при помощи гальванизированных железных труб в ближайшие отверстия штольни. Затем разрушенные части кладки были выломаны и заменены безупречными. После этого (т. е. с 1916 г.) в реконструированных частях штольни дальнейших повреждений не обнаруживалось.

### 3. ДАВЛЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД НА ШХАТНУЮ КРЕПЬ.

При рассмотрении вопроса о давлении пород на ствол туннеля было обращено внимание на ту разгрузку туннельной крепи, которая в некоторых случаях, в особенности при породах, совершенно лишенных сцепления, наблюдается вследствие разряжения напряжений, господствующих в окружающей горной среде. Подобную

---

<sup>1</sup> E. Bodensseer. Die Ausbesserung des durch Gipsquellen zerstörten Wasserstollens (Исправление водопроводной штольни, испорченной вследствие разбухания гипса.) Sweiz. Bauzig., S. 127, 1927.

же разгрузку испытывает также и крепь вертикальных шахт, но только в этом случае процесс разряжения напряжений в окружающих шахту породах носит несколько иной статический характер.

Как на характерный пример разряжения напряжений вокруг шахт или буровых скважин можно указать на случаи, наблюдавшиеся при гидравлическом бурении в рыхлых песках и глинах, практикуемом в Техасе. Для того чтобы при бурении предохранить стенки незакрепленных трубами буровых скважин от обрушения, промывка производится здесь не чистой водой, но глинистым раствором, причем стенки скважин заиливаются глиной. По извлечении бурового инструмента стенки скважины, в 15—20 см диаметром и в 200—240 м глубиной сохраняют свою устойчивость даже в рыхлом песке<sup>1</sup>.

Сущность процесса разряжения напряжений в буровых скважинах и слабо укрепленных шахтах, находящихся в условиях, предохраняющих их от обрушения, пояснена на схеме, изображенной на рис. 78. Распределение давлений, имевшее место в породе до проведения шахты, изображено треугольником (4—3—2) (горизонтальные давления) и четырехугольником (1—2—5—6) (вертикальные давления  $p$  на уровне подошвы шахты). После проведения шахты напряжения в окружающей ее горной массе разряжаются в пределах цилиндрического объема  $abcd$ , и горизонтальные давления внутри этого объема снижаются до величин, определяемых абсциссами кривой 3—2'. В то же время давление грунта в сечении  $cd$  изменяется на величину, соответствующую заштрихованным площадям. Объем, заключенный в пределах цилиндрического тела  $abcd$ , можно рассматривать как ограниченный рядом сводов, напряжения в коих разряжаются вокруг шахты примерно подобно тому, как это происходит в каменном своде вокруг имеющегося в его замке отверстия. Но как только по одной из приведенных в предшествующей главе причин породы становятся плавучими, разряжение напряжений в нарушенной части пород, а при неблагоприятных условиях и вокруг всей шахты, прекращается; в этом случае затруднения, с которыми приходится бороться, те же, что и при проведении туннеля в плавучих породах; другими словами, для того чтобы воспрепятствовать вторжению материала в выработку, приходится крепить не только пройденный участок ее, но и забой, в нашем случае — подошву шахт (забивная крепь, дверной запор, в безнадежных случаях — дорогой способ замораживания). Если припомнить те затруднения, которые встречаются при работах в рыхлом песке, производимых при помощи опускных колодцев, то не должно удивлять, что при проведении шахт в условиях притока воды вся-

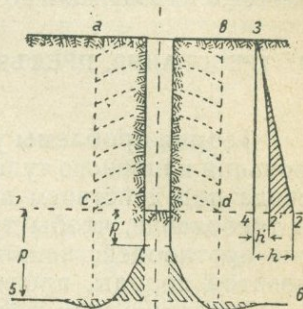


Рис. 78.

<sup>1</sup> J. Bowman, Welldrilling Methods (Методы бурения). Water Supply Paper, 257, U. S. Geological Survey, S. 74. Washington, 1911.

кий мелкий более или менее рыхло залегающий песок становится, вследствие содержания в нем воды, плавучим.

Что касается условий, при которых происходит выпирание подошвы туннеля, то по сравнению с ними те же условия в шахте несколько более благоприятны, так как распределение давлений в частях, смежных с местом разгрузки, имеющим форму четырехугольника, более благоприятно, чем в случае подобного же места в форме полосы. При одинаковых геологических условиях давления и трудности в исполнении горных работ должны с увеличением поперечного сечения шахты быстро возрастать. Затруднения при проведении шахты, причиняемые прорывами воды и газов, того же порядка, как и при прохождении туннеля, и борьба с ними заключается в применении подобных же мер защиты, как и ранее описанные.

#### 4. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К КРЕПЛЕНИЮ НАПОРНЫХ ТУННЕЛЕЙ И ШАХТ.

**Теория проблемы устройства напорного туннеля.** При проектировании напорного туннеля к требованию устойчивости туннельного свода под действием внешнего давления присоединяется также еще и требование, чтобы туннельная крепь в соединении с породой могла противодействовать внутреннему давлению и, в случае трещиноватой породы, препятствовала чрезмерной потере воды.

В техническом отношении устройство напорных туннелей относится к труднейшим задачам туннельного строительства, и расчеты размеров крепи, необходимых для удовлетворения вышеуказанных требований, по меньшей мере столь же ненадежны, как и расчеты размеров каменной облицовки обыкновенных туннелей в условиях сильного давления пород.

Нижеприводимый метод разрешения проблемы устройства напорной штольни путем вычислений заключается в том, что порода совместно с креплением штольни рассматривается как находящаяся под внутренним давлением труба с очень толстыми стенками. Этот способ применяется, повидимому, уже давно. Так, например, он применен был Герцаги в 1909 г. при расчете одного варианта напорной шахты, предназначавшейся для спроектированной фирмой *Adriatique Electricité* силовой установки *Gascka—Kraftwerk* в Кроации (высота напора—400 м, крепление волнистым железом). Результаты подсчета были столь неутешительны, что вариант напорной шахты был отброшен. В 1921 г. И. Буэхи<sup>1</sup> и Л. Мюльгофер<sup>2</sup> опубликовали результаты своих теоретических исследований, основанных на подобных же допущениях. В методе их, однако, имеются некоторые источники ошибок, степень влияния которых на результаты подсче-

<sup>1</sup> J. Buechi. Zur Berechnung von Druckschächten (К расчету напорных шахт). Schweiz. Bauztg., 1, S. 61, 73, 88, 1921.

<sup>2</sup> L. Mühlhofer. Die Berechnung kreisförmiger Druckschachtprofile unter Zugrundelegung eines elastisch nachgiebigen Gebirges (Расчет профилей напорных шахт круглого сечения в предположении наличия упругих податливых пород). Zeitschr. d. Oestr. Ing. u. Arch. Ver., S. 101, 170, 181, 1921. См. также: Theoretische Betrachtungen zum Problem des Drucksollenbaues (Теоретическое рассмотрение проблем устройства напорных штолен), Schweiz. Bauztg., II. S. 245, 1921. Также: E. V. Posch. Kontroverse über die „Spannungsverhältnisse in Druckstollen“ (Дискуссия по вопросу о распределении напряжений в напорных штольнях). Wasserkräft. S. 61, 91, 1923.

тов определить очень трудно. Такими источниками ошибок, между прочим, является неучтенность того состояния напряжения, в которое переходят породы, вследствие проведения в них туннельной выемки, а также ненадежность основных допущений в части, касающейся сопротивления пород растяжению.

До проведения туннеля в породах господствуют исключительно сжимающие напряжения (рис. 79, силы, обозначенные пунктиром), интенсивность которых зависит от высоты налегающей толщи и в различных местах может быть различна. Проведение выемки влечет за собой выключение из общей системы сил тех сил радиальных противодействий, которые действовали на цилиндрическую поверхность (боковую поверхность штольни) со стороны извлеченного ядра туннеля. Вследствие этого ствол туннеля меняет свою форму. Если затем подвергнуть туннель внутреннему давлению (силы, обозначенные сплошными линиями, рис. 79), то тем самым создадутся в массиве пород напряжения, до некоторой степени компенсирующие влияние выемки, т. е. имеющие тенденцию в известной мере восстановить то состояние напряжения, которое имело место в ненарушенном еще горном массиве. Если бы давление, господствовавшее в массиве до проведения в нем туннельной выемки, подобно гидростатическому давлению было одинаково по всем направлениям, то действие внутреннего давления заключалось бы единственно в том, чтобы частично устранять вызванные выемкой нарушения. Но в ненарушенном массиве пород горизонтальное давление несомненно гораздо меньше вертикального. Поэтому разгрузка туннеля, вызванная действующим изнутри гидростатическим давлением, в боках его гораздо существеннее, чем в сводовой части. Еще менее поддаются исследованию условия, в которых находится штольня, заложенная в косогорных участках (Lehnenstollen), так как подобная выемка обуславливает состояние с несимметричным распределением напряжений.

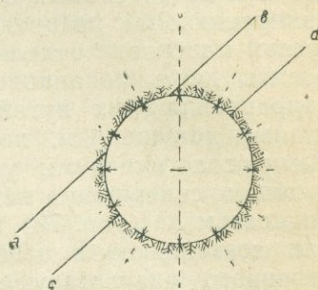


Рис. 79.

Во всяком случае истинное состояние напряжения горного массива представляется более благоприятным, чем то, получаемое вычислением, состояние напряжения, которое обусловлено действием внутреннего давления на толстостенную трубу, находившуюся ранее в ненапряженном состоянии. Эти отклонения теоретически вычисленных значений в сторону большей прочности, однако, должны более чем компенсироваться оптимистическими допущениями теории в части, касающейся сопротивления пород растяжению. Почти все породы на больших или меньших расстояниях пересекаются плоскостями отдельности, в которых силы сцепления полностью или отчасти отсутствуют даже в том случае, если породы при проведении в них туннеля кажутся сухими (см. также главу о плотинах). Это утверждение согласуется с тем фактом, что почти во всех напорных шахтах и штольнях, при испытании их под высоким давлением в необлицованном состоянии, наблюдается заметная утечка воды.

Для того чтобы измерить утечку воды, в испытываемой штольне устанавливают вплотную к ее облицовке два запорных щита (Abschlussdeckel) и при помощи насоса заполняют находящийся между щитами участок штольни водой, причем воздух отводится через вставленную в один из щитов трубку. Затем испытываемый участок подвергается давлению нагнетанием. Количество нагнетаемой воды измеряется при помощи включенного в водопровод водомера, а давление отсчитывается по манометру. При определении утечки воды нужно учитывать те количества ее, которые теряются через щиты и неплотности в стыках между щитами и облицовкой<sup>1</sup>.

Утечка воды свидетельствует о существовании проводящих воду путей между штольней и дневной поверхностью горного массива. На каждую трещину, заметно поглощающую воду, несомненно приходится много других, представляющих собой плоскости отдельности и не способных отводить воду в количествах, поддающихся измерению. Как распределяются в массиве эти почти неуловимые глазом плоскости отдельности, обычно не удается достоверно установить даже колонковым бурением. Поэтому при определении направления этих путей приходится прибегать к наиболее невыгодным допущениям, хоть сколько-нибудь согласующимся с местными геологическими условиями. Допустим, что горный массив, в общем совершенно нетрещиноватый, пересекается единственным диаклазом *ab* (рис. 79) в направлении, параллельном оси штольни или составляющем с нею небольшой угол. Наличия этого единственного диаклаза уже было бы достаточно для аннулирования расчета, основанного на допущении сопротивления породы растяжению. Вместо сопротивления растяжению в данном случае имело бы место лишь незначительное сопротивление трения сдвигу. Еще более неблагоприятными были бы условия при наличии диаклаза *cd* (рис. 79).

Таким образом результаты расчета, основанного на теории трубы, кроют в себе в числе прочих две существенные ошибки, искажающие выводы о прочном сопротивлении напорной штольни в противоположных направлениях, и мы не в состоянии судить о том, с какой погрешностью имеем дело — положительной или отрицательной. Поэтому можно рекомендовать от теории трубы совершенно отказаться, не обращать внимания на сопротивление материала растяжению и вместо этого ввести в расчет напряжения пород, обусловленные силой тяжести и действующие в направлении, противоположном растягивающим тангенциальным напряжениям (Ringzugspannungen). Путь к аналитическому разрешению этой проблемы был намечен И. Шмидтом<sup>2</sup>. При этом было уделено должное внимание также и тому влиянию, которое высота налегающих пород оказывает на сопротивление штольни внутреннему давлению, т. е. тому фактору, значение которого до настоящего времени еще не было оценено по достоинству.

Для успешной разработки теории Шмидта во всяком случае

<sup>1</sup> См. например, J. Or nig. Der Stollen des Teigitsch-Kraftwerkes (Штольня Тейгитшской силовой установки). Zeitschr. d. Oesterr. Ing. u. Arch. Ver., S. 385—389, 1924.

<sup>2</sup> I. Schmid. Statische Grenzprobleme in kreisförmig durchörtertem Gebirge (Проблемы статических пределов в породах, пройденных выработкой круглого сечения).

потребовалось бы предварительно существенное углубление наших знаний о свойствах упругости горного массива (а не только одних образцов горных пород).

Подобного углубления знаний возможно ожидать лишь<sup>1</sup>, исходя из результатов опытов над напорными штольнями, по примеру опытов, производившихся над Амстегской штольней (Amsteg).

Для производства опытов давления в Амстегской напорной штольне были установлены вплотную у ее противоположных стен одна против другой две давящие плиты (Druckplatten), площадью в 1 м<sup>2</sup> каждая, прижатые своими седалищами двумя гидравлическими домкратами силою в 100 т каждый. Увеличение расстояния между плитами, вызванное производимым на них давлением, определялось прибором Амслера для измерения приращений с точностью до 0,01 мм; полученные показания соответствовали двойной величине сжатия тех частей горных пород, которые находились под действием давления, производимого на них плитами. Диаграмма сжатия, представляющая собой результаты давления на серицитовый сланец Амстега, напоминает своим видом ту картину, которая получилась бы, если бы при подобных же условиях подвергнуть давлению плотно уложенный песок или щебень. Приращение длины диаметра штольни на ее незакрепленных участках, обусловленное внутренним давлением в штольне, к сожалению, состоит из двух разнородных компонентов, из коих один является результатом сжатия разрыхленной, другой же — сжатия ненарушенной части пород. Чтобы разъединить оба эти компонента, необходимо было бы по крайней мере две из общего числа точек измерения увязать с ненарушенной частью пород путем проведения через разрыхленную толщу буровых скважин глубиною от 1 до 1,5 м. Подобный опыт послужил бы также к выяснению вопроса о том, является ли „упругость“, в том смысле, как это принимает Амстегская комиссия по устройству напорной штольни, исключительно свойством нарушенной зоны, или же она представляет собой свойство всех горных пород вообще. Незначительность расширения штольни, наблюдавшегося на биотитогнейсовом участке ее, в связи с особенностями применявшихся измерительных инструментов, дает основание полагать, что упругость биотитового гнейса не была уловлена наблюдениями.

Согласно сообщению инж. Г. Е. Грунера из Базеля, профессором Джойе из Фрейбурга в Швейцарии был сконструирован измерительный аппарат, при помощи которого можно было наблюдать в трех местах движения в бронированной напорной штольне силовой установки в Ахензее. Принцип этого измерительного аппарата заключается в том, что на внутренней поверхности железной облицовки штольни приклепан ряд роликов. Через эти ролики протягивается стальная измерительная лента, которая приводит в движение поворотный рычаг, заключенный в тщательно закрытом аппарате. Этот рычаг выводится из своего положения обоими концами ленты. Все это приспособление находится внутри закрытой напорной шахты. При помощи электрической передачи движение этого рычага можно наблюдать снаружи.

<sup>1</sup> Kurzer Bericht über die Druckstollenversuche der S. S. B. (Краткое сообщение об опытах над напорными штольнями S. S. B.). (Ing. A. Schrafl, Generaldirektor S. S. B.) Schweiz. Bauztg., 1, S. 7, 27, 1924.

Это устройство является новостью; при первом применении своем оно обнаружило, правда, некоторые недостатки, но легко может быть усовершенствовано. Во всяком случае посредством этого измерительного приспособления уже было доказано, что при увеличении давления через железную облицовку может быть передана горному массиву большая часть развивающихся при этом напряжений, так как железная облицовка и находящийся за нею бетон раздаются (*zugückziehen*) равномерно. При уменьшении давления, напротив, железная облицовка несколько опережает бетон в своем сокращении, так что попадает при этом в условия более высокого давления. Опыты, однако, в принципе показали, что в этом особом случае  $\frac{1}{3}$  давления воспринимается железной облицовкой и  $\frac{2}{3}$  горным массивом.

Нижеприводимые данные о выполненных сооружениях имеют еще большее значение в отношении напорных шахт. Само собой разумеется, что при незначительной высоте налегающих пород и огромном внутреннем давлении, которые имеют место в напорных шахтах, к устройству их возможно прибегать лишь в случае прекрасного качества горных пород. Едва ли можно допустить, чтобы когда-либо была устроена напорная шахта без того, чтобы ответственные инженеры и геологи предварительно убедились в наличии первоклассного достоинства горных пород, отличающихся достаточным сопротивлением растяжению и отсутствием трещиноватости.

Из числа напорных шахт, оправдавших себя на деле за время своего существования, можно указать на следующие:

Töllwerke городов Базен и Меран, диаметр 3,0 м, высота напора 69 м. Твердый порфир и гнейс <sup>1</sup>.

Силовая установка Ленд, акц. об-во Алюминиевой промышленности, диаметр 2,8 до 2,6 м, высота напора 65 м. Гранит <sup>1</sup>.

Силовая установка Ахензее (Achenseewerke), диаметр 2,4 м, высота напора 41,7 м. Доломит и известняк.

Этим оправдавшим себя постройкам можно противопоставить следующие частично или вполне неудавшиеся сооружения:

Установка Биашино у Бодио, Тессин (Biaschino-Werk am Bodio, Tessin), диаметр 2,8 м, давление 180 м. Гранит. Присутствие трещин. Уплотнение при помощи просмоленных джутовых полос <sup>2</sup>.

Sand Creek Syphon, акведук Лос Анжелос, диаметр 2,74 м, высота напора 140 м. Гранит. Чрезмерные потери воды, заброшена за непригодностью <sup>3</sup>.

Герландсфоссен в Христиании (Herlandsfossen in Christiania), темнозеленые роговообманковые породы. При напоре около 130 м чрезмерные потери воды. Продольная трещина в горизонтальной части, сохранившаяся после осушения штольни, имеет ширину в 5 мм и водоносна <sup>4</sup>.

<sup>1</sup> L. Mühlhofer. Die Berechnung kreisförmiger Druckschachtprofile (Расчет профилей напорных шахт круглого сечения). Zeitschr. d. Oest. Ing. u. Arch. Ver., S. 101, 170, 181, 1921.

<sup>2</sup> Zeitschr. f. d. gesamte Turbinenwesen, X Jg., 1—4, 1913.

<sup>3</sup> Engin. Record, t. 67, 23, 1913.

<sup>4</sup> H. Schjerven. Tryktunnellen ved Herlandsfossen. Teknisk Ukeblad, 32, 1921.— J. H. L. Vogt. Tryktunneller og Geologi Kristiania, 1922. Извлечения у L. Mühlhofer. Wasserkraft, S. 91, 1923.

Было бы рискованным утверждать, что качественное различие между оправдавшими себя и давшими трещины напорными шахтами было обусловлено исключительно достоинствами или недостатками проектирования и техники выполнения. При практикуемых еще ныне методах расчета, с одной стороны предполагающих наличие в породах сопротивления растяжению, с другой — не принимающих во внимание давления, зависящего от высоты налегающей толщи пород, две одинаково добросовестно спроектированные и выполненные напорные шахты могут под давлением проявить себя весьма различно. С подобным случаем мы встретились при обсуждении вопроса о сооружении плотин на проницаемом основании (*durchlässige Unterlage*).

**Практика строительства напорных туннелей** (Г. Е. Грунера из Базеля). Теоретические соображения относительно устройства напорных туннелей и опытов, произведенных над выполненными уже сооружениями, могут служить лишь подкреплением геологическим и техническим исследованиям, но отнюдь не могут заменить их; это тем более справедливо, что самые опыты нагнетания кроют в себе источники крупных ошибок, так как через крышки (*Deckel*) и через самую кладку, образующую

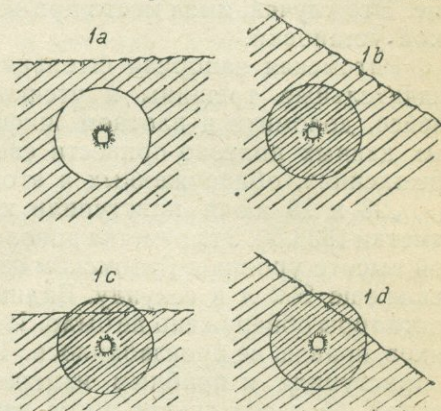


Рис. 80. Четыре случая расположения напорной штольни в горном массиве.

запор испытываемой штольни, происходит потеря значительных количеств воды. Так, опыты при нагнетании в Партенштейнской установке не дали положительных результатов, и опыты в специальной испытательной штольне у Ахенского озера также привели к весьма неопределенным выводам. Успешное строительство напорных штолен остается до сего времени прежде всего практической проблемой, требующей для своего разрешения тесного сотрудничества геологов и инженеров. Но для их понимания друг друга важно придать этой проблеме точную формулировку. Если мы имеем дело с напорной штольней, то необходимо прежде всего иметь в виду, что соответственно величине существующего в штольне давления воды вокруг штольни образуется поврежденная зона, т. е. зона, в которую вода стремится проникнуть, если ей представится к тому возможность. Задачей инженеров и геологов таким образом является исследование вопроса о том, какую породу и какое сопротивление встретит вода в этой поврежденной зоне. Приводимые при сем рисунки иллюстрируют разные случаи (рис. 80а — d).

Первый случай наиболее простой и надежный. Здесь штольня проходит под большой плоской возвышенностью, напор меньше, чем расстояние между штольней и дневной поверхностью. Утечка воды в этом случае вообще не будет иметь места, так как источники на поверхность выступить не могут.

Второй случай это тот, когда штольня проходит вдоль склона горы, но заложена столь далеко внутри массива, что поврежденная

зона поверхности горы не пересекает. И при таком расположении в большинстве случаев источники не появятся, разве лишь тогда, если ниже штольни проходит водонепроницаемый пласт, который выступает на поверхность выше подошвы долины.

Третий случай тот, когда поврежденная зона пересекает горное плато, когда следовательно на самом плато могут выступить источники, и, наконец, четвертый, самый опасный случай, когда штольня настолько приближена к откосу горы, что поврежденная зона его пересекает. Этот случай особенно опасен тогда, когда на откосе имеется рыхлый материал; под последним тогда при выступлении воды образуются источники, которые могут привести его в движение. Это случай, имел место при известной напорной штольне Ритомской установки.

Ритомская напорная штольня с самого начала уже обнаружила значительные трещины и утечки воды. Она заложена в очковом гнейсе, доломите и плотном шифере. Для уяснения вышеприведенных данных полезно привести следующий отрывок из отзыва о повреждениях, обнаруженных в этой штольне.

„28 и 29 июня приступили к новому наполнению штольни до отметки 1838,50. Эта отметка довольно точно соответствует максимальной высоте уровня в Ритомском озере (Ritomsee). Потеря воды составляла еще 262 л в секунду. Видимых выступлений воды на поверхности горы обнаружено не было. Измерений дебитов окрестных источников, правда, не производилось. Штольню оставили под давлением и приступили к пробным измерениям отдачи воды силовой установкой. 55 часов спустя после наполнения штольни, 1 июля 1920 г., последовал прорыв воды из склона Алтанка (Hang og Altanca). Место прорыва находится в расстоянии около 200 м от шлюза и около 30 м ниже дороги, идущей от шлюза в Piara. Вода выступила здесь из скалы, лишь слегка покрытой щебнем, и вызвала оползание этого щебня с частью растущих на нем елей. После этого штольня тотчас была выключена и освидетельствована. Обследование обнаружило большое количество мелких трещин в напорной штольне, шлюзе и соединительной штольне.“

В заключение следует заметить, что в 1925 г. в штольню была введена круглого сечения железобетонная манжета. С тех пор штольня работает при полном рабочем давлении без отказа.

Итак, при устройстве напорной штольни главная задача инженера заключается в том, чтобы расположить штольню по возможности соответственно первому или второму из вышеуказанных случаев. Если выполнение этих условий совершенно невозможно, то уже с самого начала приходится принимать предупредительные меры.

Если место заложения штольни окончательно установлено, то необходимо подвергнуть исследованию смежные с ней породы, а именно определить:

- а) 1) устойчивы эти породы или 2) неустойчивы;
- б) являются ли эти устойчивые или неустойчивые породы;
- 1) непроницаемыми, 2) мало проницаемыми, но трещиноватыми или
- 3) проницаемыми;
- с) являются ли они: 1) трудно выветривающимися или 2) легко выветривающимися.

Метод строительных работ зависит от той категории, к которой принадлежат горные породы. Если порода устойчива и непроницаема и штольня залегает внутри горного массива, так что представляются выполненными условия первого или второго случая, то штольня может остаться или совсем без облицовки, или облицовывается слоем гунита (Gunitschicht).

Так в настоящее время строится Гримзельская штольня (Grimsstollen), проводящая воду от Гримзельской плотины до Гельмерской плотины (Gelmersperre). Штольня проходит через гранитную толщу Аарского массива. Штольня Барберины также была проведена на участке в 600 м длиною в необлицованном гнейсе. Здесь в первые дни была обнаружена утечка воды в 2 л в секунду, а один или два дня спустя всего лишь 1 л в секунду. Условия были признаны настолько благоприятными, что от облицовки ее совершенно отказались и ограничились только выравниванием стенок штольни бетоном. Простое оштукатуривание или набрасывание гунитового слоя имеет то преимущество, что благодаря этому сглаживаются неровности скалы. Подобным же образом выполнена испанская гидравлическая силовая установка Кала в Андалузии, равным образом заложенная в массивах гранита и диорита, а также штольня, которая в настоящее время проводится близ Мадрида через граниты Сиерра дель Кредо у Алтеше. В обоих случаях стены штольни только покрыты набросанным на них слоем гунита. Установка у Кала, работающая при напоре до 30 м, находится в действии с весны 1927 г., и за это время штольня проявила полную водонепроницаемость.

Интересный пример простой гунитовой облицовки представляет собой также штольня у Клостер-Кюблиса (Klosters-Küblis), проведенная в плотном шифере. Этот сланец сам по себе устойчив и водонепроницаем. Посредством наброски гунита удалось полностью устранить выкрашивание поверхностных кусков породы, и эта штольня также работает уже в течении нескольких лет при одной лишь гунитовой облицовке вполне удовлетворительно. Произведенная весной 1928 г. ревизия установила, что гунитовая облицовка оправдала свое главное назначение.

Более невыгодный случай, а именно а, 1, б, 2, с, 2, т. е. пород устойчивых, мало проницаемых, но трещиноватых и выветривающихся мы встречаем на примере штольни установки у Ахенского озера в той части ее, которая проведена в выветривающихся известняках. Известняк сам по себе мало проницаем, но зато в нем встречаются отдельные трещины столь сильно размытые, что из этого можно заключить о наличии здесь водопроводящих путей. Так как он не подвергся сильному выветриванию, то казалось возможным оставить штольню без облицовки и ограничиться только заделкой трещин. Строители и администрация, однако, решили облицевать эту штольню слоем бетона толщиной от 20 до 25 см и привести ее в совершенно непроницаемое состояние посредством инъекции. Штольня имеет в свету 3,60 м и работает при напоре в 30—40 м. И эта штольня также вполне оправдала себя на деле.

Если приходится иметь дело со штольней, проводимой через породы устойчивые (а, 1), но проницаемые (б, 3) и трудно выве-

тривающиеся (с, 1), то необходимо озаботиться, чтобы утечка не приняла слишком больших размеров и в особенности чтобы не образовались столь вредные источники, как это имело место в случае со штольней в Ритоме.

Характерным примером подобной штольни является последнее звено штольни и шлюза у Брока. Сама эта штольня проведена в коренных породах верхней юры, но на некоторой глубине врезается в эрозионное русло, заполненное галечником, которое, само собой разумеется, проницаемо и проводит воду. Штольня и шлюз сделаны из железобетона, причем и штольня и шлюз рассчитаны таким образом, что если бы они стояли свободно, то могли бы выдержать полное давление. Установка работает безостановочно с 1921 г. при внутреннем давлении примерно в 40 м.

Случай, когда штольня сама по себе устойчива, а окружающие ее породы непроницаемы, но подвержены сильному выветриванию, мы имеем на примере другого звена той же Брокской штольни. Эта часть проходит через мергели неокома. После того как штольня была пробита, выяснилось, что породы при доступе воздуха и влаги необыкновенно быстро выветриваются и расслаиваются на большие и маленькие пластины. Незадолго до начала работ по облицовке штольни ее оказалось возможным расширить до пределов ее полного профиля. После этого она была облицована слоем бетона толщиной около 25 см и подвергнута тщательной инъекции. В подошве был устроен дренаж, выведенный на поверхность. При пуске в ход дренажа в нем обнаружилась значительная утечка воды. Тогда закрыли устроенную в дренаже задвижку, причем нигде на склоне долины источников не появилось. Когда спустя некоторое время эту задвижку снова открыли, вода из дренажа не выступала. Несомненно, что в данном случае имел место следующий процесс: вследствие доступа воды мергель массива разбух и вплотную прижался к кладке облицовки. Тем самым были закрыты все проходы для воды, и дальнейшая утечка последней прекратилась.

Совсем иначе обстоит дело, когда приходится работать в неустойчивых породах. В этом случае рекомендуется устраивать в штольне двойную облицовку, а именно внешнюю — воспринимающую действие внешних сил, и внутреннюю — воспринимающую напор воды и препятствующую утечке последней.

В качестве примера случая а, 2, в, 1, с, 1, т. е. пород неустойчивых, непроницаемых и неветривающихся, известный интерес представляют собой отдельные части Партенштейнской штольни. По этому поводу имеются указания в „Геологических исследованиях водонапорной штольни в Мюльском квартале Верхней Австрии“ Келбль и Бейерле (Bd. 75 der Geologischen Bundesanstalt, Wien, Heft III und IV, 1925). Напорная штольня Партенштейнской установки находится в краевой зоне богемского массива; породы состоят главным образом из грубозернистого порфирогранита или гнейсо-гранита, прорванных мощной жилой гранита. Геологи уже обращали внимание на то, что в краевой зоне прорыва могут иметь место существенные нарушения. Наибольшее нарушение оказалось в южной краевой зоне, т. е. в направлении к концу штольни; здесь порода на протяжении 30 м была настолько

дрябла, что выкрашивалась отдельными участками, и штольня поддерживалась лишь путем особо громоздкого крепления. В этой рассыпающейся породе было прежде всего вставлено кольцо из бетонных камней толщиной в 40 см, достаточно прочное для того, чтобы выдержать давление породы. Это кольцо было введено очень быстро, так что представилась возможность производить в течении года наблюдения над состоянием закрепленного участка штольни. При помощи стоек и тщательного систематического измерения высот было установлено, что бетонное кольцо совершенно не двигалось. Затем в это каменное кольцо была вставлена водоупорная железобетонная манжета, которая само собой разумеется на обоих концах выдавалась на некоторое расстояние за пределы поврежденного пояса. Результаты оказались весьма удовлетворительными. Необходимо еще только добавить следующее: на тот случай, если бы во внешнем каменном кольце были замечены движения, предполагалось в него на соответствующих подушках (Sättel) ввести железную трубу.

Случай а, 2, в, 2, с, 2, пород неустойчивых, мало проницаемых, но трещиноватых и выветрившихся, можно ясно наблюдать на примере гидравлической силовой установки во Франции у Тарна близ Пинета. Здесь две штольни, диаметром в 5 м, проходят через толщу, состоящую частью из гранита, частью из гнейса и древних глинистых сланцев (Urtonschiefer). Порода сильно выветрелы, так что пришлось проходить и через мощные отложения каолина (Kaolinbänke). Здесь также сначала был вставлен наружный кожух (Mantel), состоявший частью из бетона, частью из каменной кладки, толщиной до 50 см, а в него введена железобетонная манжета для провода воды и сопротивления водяному напору от 10 до 20 м.

Как на интересный случай а, 2, в, 3, с, 2, т. е. пород неустойчивых, проницаемых и очень сильно выветривающихся, можно указать на участок напорной штольни у Солиса (Solis) в устье Албула. Устройство его явствует из нижеследующего описания.

Несколько выше Солиса штольня на протяжении участка примерно в 45 м проведена частью в гипсе, частью в серой вакке и серицитовых сланцах. На рис. 81 изображен геологический разрез на этом участке штольни. Во время работ по проведению штольни на этом участке испытывалось заметное давление пород, вследствие чего здесь были применены усиленные профили крепления, со стенками толщиной в 35, 45 и 60 см.

После того как штольня находилась в действии около полутора месяцев, в расстоянии 250 м вниз от окна g, как раз в месте перехода твердой доломитовой породы в серую вакку, на участке в 4 м длиною произошло опускание подошвы примерно на 15 см. Это опускание подошвы можно объяснить тем, что в стенках штольни, вследствие давления изнутри воды, образовались небольшие трещины; через них могла выступать вода, сравнительно быстро выщелочившая заключенный в серой вакке гипс, что привело к образованию пустот под подошвой штольни. После удаления поврежденной части стены была обнаружена вымытая водой расселина глубиной в несколько метров и до 2 м ширины.

При ремонтных работах эта расселина под подошвой штольни была расчищена на глубину до 5 м и забетонирована, после того

образованные водой пустоты были залиты раствором цемента (Zementmilch) и жидкой известкой.

Для перекрытия места прорыва служит скрепленная армированная бетонная плита толщиной в 1,05 м. В качестве арматуры были применены железнодорожные рельсы (Rollbahnschienen) весом в 6,6 кг погонный метр. Вес всей железной арматуры составлял 63 кг на 1 м<sup>2</sup> плиты. Работы эти оказались возможным выполнить без того, чтобы кладка свода и устоев его на протяжении ремонтируемого участка претерпела какое-либо изменение в своем положении.

После этого на расстоянии от 240 до 309 м от окна О была отбита вся штукатурка, и штольня снабжена облицовкой в 5 см

толщины, состоявшей из скрепленного железом бетона. Это скрепление было выполнено по типу II и рассчитано на полное внутреннее давление в условиях наибольшего приближения профиля к круглому сечению. Благодаря этому дополнительному креплению произошло уменьшение площади профиля на 0,67 м<sup>2</sup>, что однако при дебите в 16 м<sup>3</sup>/сек. вызвало потерю в напоре всего лишь в 25 мм.

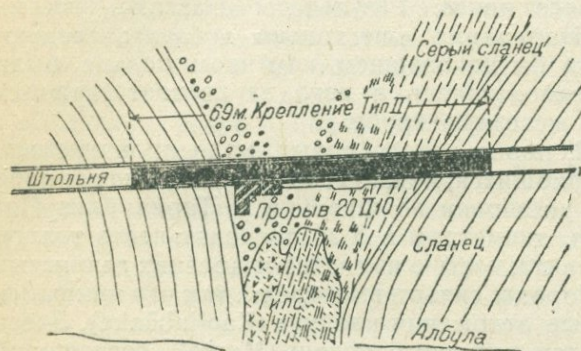


Рис. 81. Участок напорной штольни у Солиса в установке Албула. Пересечение штольни с глубокой ложбиной.

Водопроводимость пород, в которых предположено заложение напорной штольни, таит в себе опасности, подобные встречаемым при устройстве туннелей. Бейерле сообщает о случаях прорыва воды, имевших место при прохождении напорной Партенштейнской штольней расселин в граните и сопровождающихся понижением уровня грунтовых вод и иссяканием источников в местечке Клейнцель (Kleinzel) Верхней Австрии, несмотря на то, что высота налегающей толщи составляла здесь в среднем 110 м. В случае встречи при прохождении штольни источников рекомендуется устанавливать то давление, под которым эти источники вступают во внутренность штольни. Если это давление близко к тому, под которым впоследствии должна работать штольня, то можно не задумываясь допустить проникновение источников внутрь штольни. Так было поступлено, например, в Партенштейнской установке, где в штольню были введены некоторые источники, и где первые измерения напора и дебита показали, что количество воды в штольне увеличивается вместо того, чтобы уменьшаться.

## 5. ОБРУШЕНИЯ КРЕПИ.

Обрушения крепи в туннеле происходят тогда, когда в каком-нибудь месте его неожиданно для строителей сильно возрастает давление. Они влекут за собой необходимость производства погло-

щающих много времени и дорого стоющих восстановительных работ и обычно бывают обусловлены особыми причинами геологического характера, которые на основании геологического профиля или совершенно нельзя было предвидеть, или можно было предсказать лишь в форме предположения. Смотри по обстоятельствам, вызывающим обрушения крепи, последние можно подразделить на четыре группы:

а) Обрушения потолка вследствие вывала глыб из находящейся над ним толщи пород (отраженное обрушение, Nachbruch). Опасность такого вывала имеется главным образом в пластообразных породах, в которых отдельные толщи отделены друг от друга тонкими прослойками глины или сланца и кроме того разбиты мно-

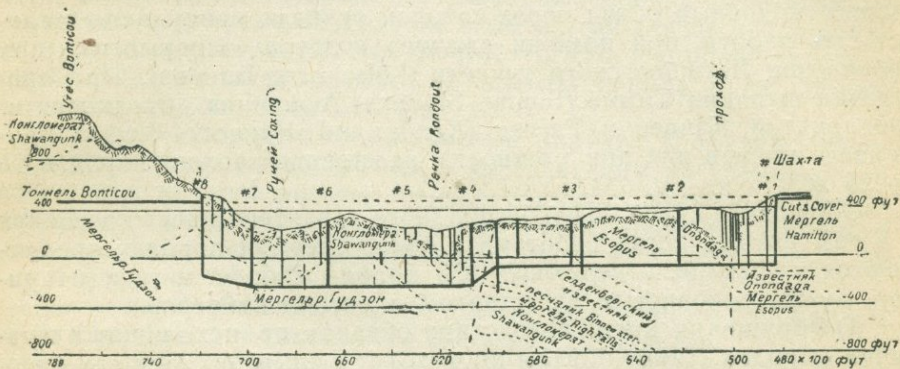


Рис. 82. Продольный геологический разрез напорного туннеля Rondout (по L. White). Тонкие вертикальные линии — пробные скважины; толстые линии — шахты.

гочисленными трещинами в направлении нормальном к плоскостям напластования. Примерами служат обрушения при пересечении синклиналей, сложенных раковистым известняком и серой ваккой, а также обрушения потолка в тонкослоистых (dünnbankigen) полого залегающих разбитых вертикальными трещинами породах.

При проведении туннеля Центральной жел. дор. на Аляске через твердые, но сильно нарушенные и трещиноватые сланцы, количество обрушившихся в туннель горных пород составляло около 27% общего объема выемки. При проведении одного железнодорожного туннеля в Филиппсвилле (Phillippsville) в Алжире через кварцитовые сланцы произошел обвал потолка, при котором обрушилось 50 м<sup>3</sup> породы, и над потолком образовалась пещера высотой 10 м. Подобное же явление представляет собой выпадение кусков изверженных пород, не связанных со смежными с ними породами.

в) Обрушения крепи при встрече пустот, заполненных обломками горных пород, или при обвале кровли подобных пустот, расположенных под подошвой туннеля. Эти обрушения происходят преимущественно при прохождении известняков.

При проведении Ватфардского туннеля в Англии через верхнемеловые породы была встречена расселина, заполненная округленными обломками. Последние ворвались в туннель с такой силой, что убили десять человек и оставили глубокие следы на

боковых стенках выемки. При прохождении гелдербергских известняков между шахтами №№ 3 и 4 (рис. 82) были встречены пустоты, совершенно выполненные мягкой желтой глиной. Эти пещеры представляли собой расширения трещин в сбросовой зоне; заполнявшая их глина была настолько мягка, что текла, если только этот участок не был предварительно осушен путем откачки воды из нижележащих горизонтов<sup>1</sup>.

**с) Обрушения крепи при неожиданной встрече с пльвучей породой.** Встреча с водоносными гнездами мелкого песка при прохождении одновременно с ними образовавшихся пластов глин или моренных отложений.

При проведении канала-туннеля между Ойзе и Айске произошел подобный обвал через потолок туннеля, принудивший продолжать работы при помощи сжатого воздуха. Прорыв ила при проведении Летшбергского туннеля (Lötschberg-Tunnels). При проведении штольни Симме (Simme Stollens) Акц. об-ва объединенных предприятий Кандер и Ганек (Kander-und Hagneck-Werke) произошел прорыв ила при мощности налегающей толщи пород в 20 до 25 м<sup>2</sup>.

Обрушения крепи более безобидного характера могут произойти и в том случае, когда работами в более твердых породах приближаются к границе, отделяющей эти породы от более мягких (например, между раковистым известняком и мягким кейпером).

**д) Обрушения крепи вследствие обвалов, происходящих в пльвучих породах.** Такие обвалы происходят в пльвучих породах в том случае, если за крепью, вследствие истечения массы, состоящей из смешанной с водой горной породы, образуются пустоты.

Крупная катастрофа подобного рода угрожала произойти при проведении Эммерсбергского туннеля, когда над потолком обнаружилась образовавшаяся там пещера в 6 м высоты. При расширении Линдальского туннеля (Furnes Rt., Англия) при прохождении плотных глин и щебня попали в пещеру в 20 м высоты, которая очевидно образовалась при проведении первого туннеля и прорвалась без обрушения в течение четырех лет вплоть до приступа к работам по его расширению<sup>3</sup>.

Обрушения, происходящие в подобных пустотах, образовавшихся в пльвучих горных породах, в значительной степени способствуют дальнейшему оплыванию последних.

## 6. НАПОР ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Напор воды особенно неприятно дает себя чувствовать в тех туннелях, которые или проводятся при посредстве вспомогательных шахт, или должны быть устроены с однородным уклоном.

При проведении вспомогательной шахты № 4 Рондоутского (Rondout) туннеля (Кэтскильский водопровод в Нью-Йорке) наи-

<sup>1</sup> L. White. The Catskill Watersupply of New York City. (Кэтскильский водопровод в Нью-Йорке), p. 292. New York, 1913.

<sup>2</sup> Wasserkraftanlagen der Vereinigten Kander-und Hagneck-Werke A.-G. in Bern (Гидросиловые установки Акц. об-ва объединенных предприятий. Кандер и Ганек в Берне) Schw. Bauztg. Bd. 52, 1908.

<sup>3</sup> F. W. Simmons. Practical Tunneling, 4 вып. New York, 1896.

большой приток воды, который приходилось преодолевать, составлял 140 л в секунду. Борьба с этим притоком была сопряжена с наиболее серьезными техническими трудностями<sup>1</sup>. Приток воды в количестве от 20 до 30 л в секунду уже является в подобных случаях весьма ощутительным затруднением. При проведении глубоко залегающих альпийских туннелей приток воды во много раз превосходил это количество (Готтардский туннель: северная часть — 33 л, южная часть — 330 л, Симплонский туннель — до 1200 л, в Тауернском туннеле в середине сентября 1903 г. при прорыве Гиккарского ручья приток воды временно доходил до 4000 л в секунду).

**Породы, не связанные сцеплением.** Не связанные или слабо связанные сцеплением породы в случае притока воды превращаются в плавучие, и преодоление притока воды в этом случае представляет одну из многих технических трудностей того же или более высокого порядка. Приток воды зависит от высоты напора и от степени проницаемости комплекса пластов.

**Твердые равномерно-трещиноватые породы.** В твердых породах циркуляция воды приурочена к рассекающим их трещинам (за исключением крупнозернистых сильно пористых песчаников). Водопроницающая способность пород зависит от величины водосборного бассейна, от выходов водопроницаемых пород на поверхность и от числа и ширины трещин.

При сильной равномерной трещиноватости твердые однородные породы приобретают свойства водоносных горизонтов.

При гидрогеологических исследованиях путем наблюдений над пробными колодцами к югу от Ленинграда было найдено, что колебания уровня грунтовых вод в равномерно-трещиноватом девонском известняке происходят так же регулярно, как и в галечнике<sup>2</sup>. Базальтовый покров на плато Змеиной реки в Идаго настолько трещиноват, что некоторые текущие с севера поверхностные потоки при переходе с гранитной породы на базальт иссыкают. Питаемые поверхностными потоками грунтовые воды стекают по пласту, заключенному между двумя базальтовыми покровами, и выступают в каньоне Змеиной реки над выходом на поверхность илистого пласта в виде целого ряда пластовых источников. Дренажирование участков, расположенных к югу от Змеиной реки, достигается тем, что избыточные воды отводятся в шахты, в которые они поступают из трещиноватого базальта.

При проведении напорной штольни силовой установки у Партенштейна (5740 м) мелкозернистый трещиноватый гранит оказался по сравнению с плотным грубозернистым гранитом столь водопроницаемым, что расположенные над туннелем в пределах его протяжения источники иссыкали. Владельцы туннеля были вынуждены заменить исчезнувшие в окрестной местности источники специальным водопроводом<sup>3</sup>.

**Приток воды из зон разлома при тектонических нарушениях.** В большинстве случаев приток воды появляется в относительно

<sup>1</sup> L. White. The Catskill Watersupply of New York City, p. 272—279, fig. 91 . 295. New York, 1913.

<sup>2</sup> Прим. ред. Вероятно речь идет не о девонском, а о силурийском известняке.

<sup>3</sup> Randzio. Neuere Stollenbauten (Новейшие устройства штолен) Die Bau-technik, p. 343-347, 1295.

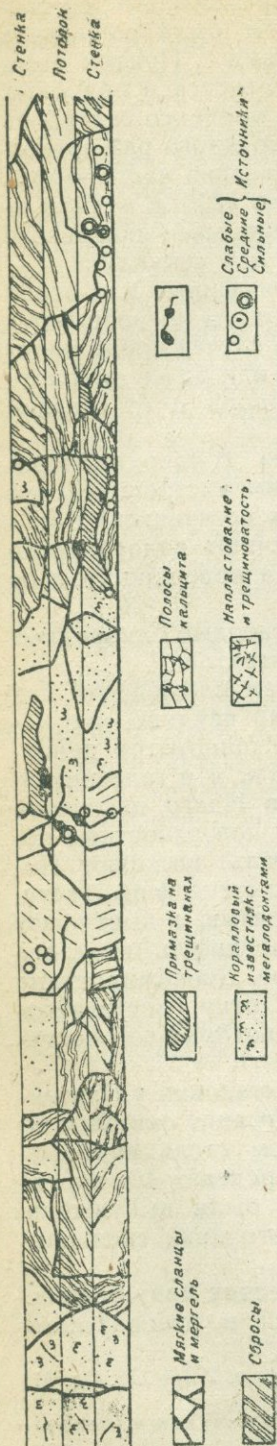


Рис. 83. Профиль (развертка) главной штольни силовой установки у Шпуллерзе на участке от 470 до 550 м. Масштаб 1:400 (по Н. Ascher).

узких зонах нарушений и связан с более или менее открытыми сбросовыми трещинами и с границами между трещиноватыми и сравнительно непроницаемыми пластами.

Образцовое изображение зависимости между трещиноватостью и водным режимом в одном случае туннельного строительства мы имеем в составленном инженером Г. Ашером профиле (рис. 83) главной штольни силовой установки у Шпуллерзе, выполненном в масштабе 1:400<sup>1</sup>. Этот профиль в связи с рис. 84 служит вместе с тем хорошей иллюстрацией того, что наши геологические профили, построенные на основании результатов геологической съемки при более или менее усложненных условиях залегания, в лучшем случае рисуют картину действительности в значительно упрощенном виде. То, что в профиле изображается простой линией, в самом туннеле представляется собой сложную картину, о подробностях которой можно только догадываться.

Поучительные примеры того, как далеко могут простираются геологические предсказания, мы встречаем в отдельных случаях, наблюдавшихся при сооружении Кэтскильского водопровода в Нью-Йорке, состоявшего в большей своей части из водопроводящих туннелей. Водосборная область расположена в Кэтскилльских горах к юго-западу от Албани, Нью-Йорка и к западу от р. Гудзона; туннели пересекают все формации, начиная с архейских и до среднего девона включительно. Тектоника области может быть объяснена результатами трех фаз складкообразования: докембрийского, postordovizischen и последевонского. Большинство нарушений представляет собой надвиги или взбросы. Трудности, встречавшиеся при проведении туннелей, почти исключительно сводились к борьбе с притоком

<sup>1</sup> O. Ampferer und H. Ascher. Ueber geologisch-technische Erfahrungen beim Bau des Spullerseeerwerkes (О геолого-техническом опыте, приобретенном на практике при постройке силовой установки у Шпуллерзе). Jahrb. der geologischen Bundesanstalt, Bd. 15, H. 3 u. 4, 1925.

воды, так как большинство из них проводилось при помощи вспомогательных шахт. В выборе трасы была полная свобода. Поэтому работам по проведению туннелей предшествовали тщательные предварительные инженерно-геологические исследования, предпринятые под руководством Sh. P. Berkey<sup>1</sup>.

Северный участок туннельного водопровода (Рондоутский напорный туннель, пересекает силурийские известняки, гелдербергские известняки, водоносные песчанки, конгломераты и мергели. Из этих пород наиболее трудно проходимой считался конгломерат вследствие его чрезвычайной твердости и хрупкости (происхождение открытых щелей). Для изучения свойств конгломерата была проведена опытная штольня длиной 30 м. Сложение песчаника оказалось „губчатым, с многочисленными небольшими отверстиями, связанными между собой извилистыми канальчиками“ (L. White). По Берки, этот песчаник представляет собой ясно слоистый кварцевый песчаник. В верхней своей части он походит на кварцит, тогда как в нижней

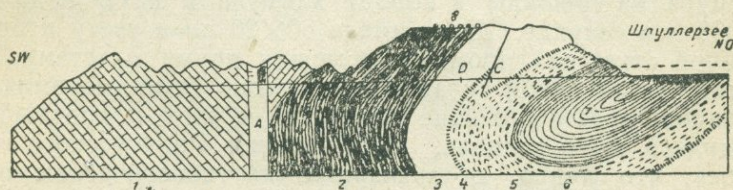


Рис. 84. Профиль главной штольни силовой установки Шпуллерзее (по неопубликов. материал. Амплера).

Легенда: 1) Доломит и плитчатый известняк. 2) Кессенерские пласты. 3) Обертшиский коралловый известняк. 4) Пестрый лейасовый известняк. 5) Пятнистый мергель. 6) Роговиковый известняк. 7) Меловой сланец. 8) Глыбы породы в зоне Формаринского сброса.

части содержит прослойки мергеля. Некоторые из пластов песчаника, в особенности в частях, расположенных близ границ напластования, проницаемы, и образовавшиеся в нем трещины выходят на поверхность. Рис. 85 иллюстрирует постепенное развитие тех представлений, которые складывались у геологов о тектонике Рондоутского участка туннеля в период времени с 1906 по 1908 г. Без пробного бурения было бы невозможно установить хотя бы даже одни только наиболее существенные данные о тектонике местности. На рис. 82 изображен продольный геологический разрез Рондоутского напорного туннеля. Ось туннеля находилась примерно на 120 м ниже уровня грунтовых вод долинных отложений. При проведении туннеля были сделаны следующие опытные наблюдения (рис. 82) 2: шахта № 4 (слева от сброса) до глубины 80 м была суха известняк). При встрече песчаника приток воды сначала повысился до 15 л в секунду, а несколько глубже через буровую скважину стало поступать в шахту воды 38 л в секунду. Путем нагнетания цементного раствора в трещиноватую породу (27 буровых скважин,

<sup>1</sup> Ch. P. Berkey. Geology of the New York City (Catskill) Aqueduct [Геология Нью-Йоркского (Кэтскильского) водопровода]. Education Dpt., Bulletin № 489, Albany N. Y., Febr. 15, 1911.

<sup>2</sup> L. White. The Catskill Watersupply of New York City. New York, 1913.

2900 мешков цемента) песчаник уплотнили. При встрече конгломератов приток воды определился в 54 л в секунду; путем цементации его оказалось возможным снизить до 22 л в секунду. Вода содержала  $H_2S$ , что делало пребывание в шахте очень неприятным. Вследствие этих трудностей проведение шахты глубиной в 150 м продолжалось 18 месяцев.

При проведении туннеля на север по направлению к шахте № 3 сначала были пройдены конгломераты. Через две буровые скважины в шахту стало проникать 18 л воды в секунду. В связи с проведением еще шести скважин из водоносной трещиноватой зоны стало проникать 55 л воды в секунду и значительное количество  $H_2S$ . После нагнетания цемента в количестве 320 мешков приток воды снизился до 22 л в секунду. Из конгломератов вступили в сильно нарушенный сбросами мергель, который вначале был сух, а затем стал давать 20 л воды в секунду. Недалеко от перелома между горизонтальными и наклонными участками туннеля после выпала шпура из трещины в породе хлынула в шахту вода в количестве 38 л в секунду. Щель имела  $60 \times 20$  см в свету и представляла собой открытый промежуток между двумя пластами породы в вершине узкой косой складки песчаника. Вода устремлялась со всех концов через небольшие отверстия в этот природный жолоб и отводилась им в туннель. В отношении Рондоутского туннеля оказалось, что линии, обозначающие на геологическом профиле сбросы, представляют собой в большинстве случаев довольно сильно нарушенные зоны с повышенной водоносностью, но никоим образом не являются строго определенными плоскостями трещин. Там, где сброс действительно представляет собой только плоскость, не наблюдается и притока воды. Так, например, строители Рондоутского туннеля с известным напряжением ожидали момента прохождения туннелем значительного сброса, расположенного между шахтами №№ 1 и 2 (рис. 82), и немало было их удивление, когда в критическом месте ими было обнаружено лишь качественное изменение породы, но не найдено было ни трещиноватой ни разрушенной зоны.

Относительно услуг, оказанных геологами делу туннельного строительства, руководитель работ по устройству Рондоутского туннеля высказывается следующим образом: „Очень скоро“ выяснилось, что отчеты геологов, составленные ими на основании геологической съемки, оказывали очень малые услуги в вопросе о выборе трасы туннеля. Выбор наиболее выгодной трасы для туннелей требует гораздо более точных сведений о мощности, глубине залегания и свойствах пластов различных пород, а также более точных профилей долин, покрытых наносами, чем это может быть сделано путем геологической съемки. Ценность геологических отчетов заключалась исключительно в том, что они облегчили составление целесообразных программ глубокого бурения и обращали внимание инженеров на возможность возникновения известных затруднений инженерно-геологического характера. Тем ценнее были заслуги, которые оказывались геологами при толковании результатов бурения и планировании дополнительных буровых работ“<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> L. White. The Catskill Watersupply of New York City. New York, 1913.

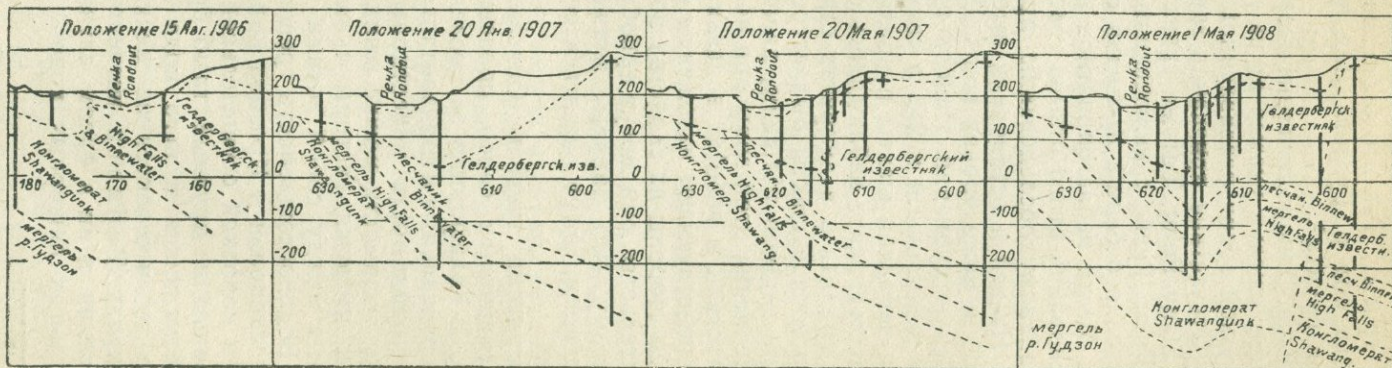
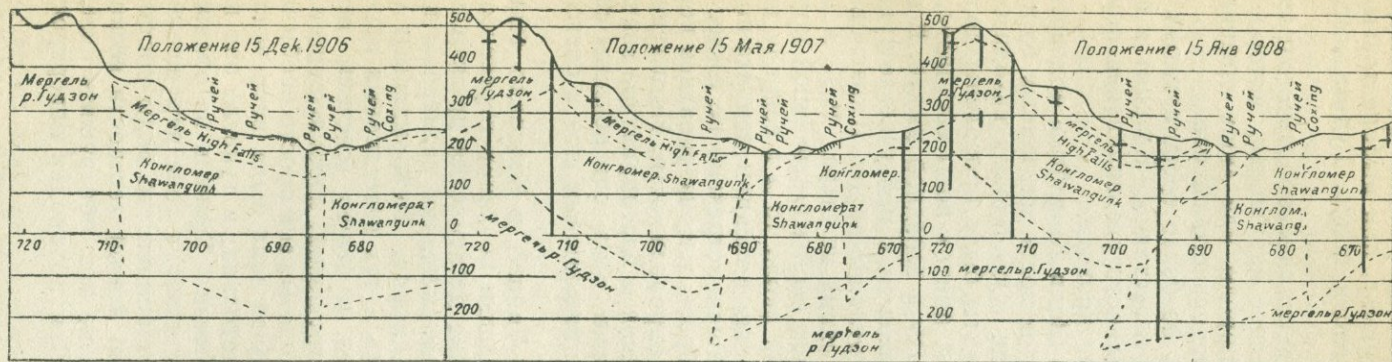


Рис. 85. Изменение в представлении о геологическом строении участка Рондаутского туннеля с 1906 по 1908 год. (По L. White).

Значительно более полезной геология проявляла себя там, где дело касалось оценки общих тектонических условий по отношению к выбору трасы. Так это было, например, при выборе трасы для водопровода под р. Гудзон. Для прохода под р. Гудзон имелись в виду три пункта<sup>1</sup>.

**Storm King.** Однородная зона массивного гнейсообразного гранита. Направление ущелья указывает на легкое нарушение, которое выражается узкой зоной раздавленной породы или лишь трещинами кливажа. Отсутствие признаков значительного сброса.

**Little Stany Point.** Тот же гранит, но более трещиноватый.

**West Point.** Гнейс с включениями известняка. Кварцит и сланцы. У восточного берега признаки сильного раздавливания породы и сбросов. Место неблагоприятное для прохода.

На основании этого отзывается траса Storm King была подвергнута более детальному обследованию при помощи наклонных буровых скважин. На ней и остановили выбор. Ось туннеля находится на глубине 330 м ниже уровня воды. Шахты были проведены до этой глубины без затруднений. Наибольший приток воды составлял 10 л в секунду в восточной и 2 л в секунду в западной шахте. В нижней части западной шахты и прилегающем к ней участке туннеля в зеленоватом граните наблюдалось стреляние пород. В красноватых разностях гранита и в диоритах стреляния не было. В 75 м к западу от восточной шахты был встречен слой измельченной породы в несколько дюймов толщины, давший около 10 л в секунду воды. После уплотнения этой зоны при помощи инъекции цемента подобных препятствий в работах в дальнейшем встречено не было.

В предшествующем изложении сбросы рассматривались исключительно со стороны их свойства водопроницаемости. Но в туннельном строительстве они могут приобрести неблагоприятное значение еще и потому, что породы, движению коих они обязаны своим происхождением, могут оказаться не пришедшими еще в состояние равновесия.

Гуннисонский туннель (Gunnison-Tunnel) в Колорадо был поврежден смещением слоев, происшедшим по линии пересеченного им сброса. В Калифорнии за последние десятилетия произошли по сбросам вертикальные и горизонтальные смещения, размерами до 3 м.

**Водопроницаемость известковых пород.** Ненормальных условий водопроницаемости можно ожидать в тех известковых породах, в которых имеются системы трещин и пещер (системы пещер, соединенные между собой зонами нарушений, изобилующими трещинами). Водопоглощаемость трещиноватых зон просто необычайна.

В Власкопольи в Кроации подобная зона была встречена при проведении короткой осушительной штольни; в туннеле она имела вид состоящей из крупных глыб брекчии. Туннель не облицован, и вся поступающая в него вода исчезает в зоне нарушения, несмотря на то, что в осенние месяцы количество воды составляет 2 м<sup>3</sup> в секунду. Терцаги исследовал в этой местности несколько зон нарушения и ни в одном случае не мог обнаружить сквозных соединительных пещерных ходов. При половодьи поверхностные

---

<sup>1</sup> Ch. P. Berkeley. Geology of the New York City (Catskill) Aqueduct. Education Dept., Bulletin 489, Albany N. Y., 15 Febr., 1911.

потоки, проникавшие через такие зоны, на расстоянии около 30 км и при падении почти в 500 м обнаруживали замедление примерно до шести недель<sup>1</sup>.

Поверхность таких „карстовых областей“ часто покрыта на больших протяжениях лишенными стока воронками (Dolinen). Если в туннеле, расположенном под такой местностью, вскрывают водопроводящую зону, то приходится отводить воду на расстояние многих километров до ближайшего открытого речного русла, так как если перекачивать воду на поверхность, то она кратчайшим путем возвращается снова в туннель. Поэтому при проектировании туннелей в таких областях совершенно неизбежно прибегать к предварительному выяснению режима грунтовых вод в пробных буровых скважинах, поскольку предвидится хотя бы возможность встречи с водопроводящей зоной.

При проведении Гренхенбергского туннеля (Grenchenberg-Tunnel, 8565 м), пересекающего две юрские цепи (Juraketten), тянущиеся в направлении с запада на восток и отделенные одна от другой Галлетской долиной (Chalnet-Tal), была пройдена складчатая система пластов известняков, мергелей, кейпера и ангидрита<sup>2</sup>. На вершинах обеих горных цепей наблюдались многочисленные плоские воронки, причем воронки были подчинены выходам на поверхность пластов известняка. В южном участке туннеля при бурении шпуров наткнулись на водоносную жилу. Вода ворвалась из двух шпуров струями толщиной в руку и в 5 м длиной; при этом шпур, вследствие содержащегося в воде песка, постепенно расширился, так что приток воды повысился со 100 до 180 л в секунду. В целях ускорения стока воды подорвали потолок. Количество воды удвоилось при одновременном выносе мелкого песка и глины; в конце концов, в ожидании уменьшения притока воды, пришлось заделать штольню бетонной стеной, снабженной водоотводным приспособлением. После того как в течении двух месяцев приток воды снизился с 809 до 574 л в секунду, приступили к продолжению работ по проведению штольни. Спустя несколько дней произошел новый сильный прорыв воды, сопровождавшийся выносом песка, глины и обломков породы. Предпринятыми вслед затем исследованиями установили, что грунтовые воды приурочены к мощным водяным жилам в пещерах, расположенных над туннелем и с боков последнего. В течении четырех месяцев из нижнего туннеля вытекло 6 000 000 м<sup>3</sup> воды, несмотря на то, что на поверхности иссяк всего лишь один незначительный источник.

## 7. ГАЗЫ.

Из газов, могущих явиться препятствием при производстве работ по проведению туннеля, следует прежде всего назвать углекислый газ (CO<sub>2</sub>), сероводород (H<sub>2</sub>S) и в особенности рудничный газ (метан, CH<sub>4</sub>). Причиной местного проникновения газов могут

<sup>1</sup> K. Terzaghi. Beitrag zur Hydrographie und Morphologie des kroatischen Karstes (Данные по гидрографии и морфологии кроатского карста). Mitteilungen aus der Jahrbuch der kgl. ungar. geol. Reichsanstalt, Bd. XX, Heft 6, Budapest, 1913.

<sup>2</sup> M. Custer. Quellen und Klüfte im Grenchenberg-Tunnel (Источники и трещины в Гренхенбергском туннеле). Schw. Bauztg., Bd. 62, 1913.

служить послевулканические явления, близость каменноугольных отложений, а также сбросы, обуславливающие появление газа с больших глубин.

При проведении одного из водопроводных туннелей Лос-Анжелоса в Калифорнии (песчаник) на участке длиной в 45 м из трещин в породе выделялась  $\text{CO}_2$ . Для того чтобы иметь возможность продолжать работы, туннель на протяжении 220 м был облицован бетоном. Газ собирали на середине этого участка в кольцеобразном пространстве между породой и бетонной стенкой и отсюда отсасывали вентилятором.

$\text{H}_2\text{S}$  образуется при разложении многих органических веществ, но встречается также во многих источниках в качестве продукта воздействия воды на сульфиды и в результате различных превращений гипса.

При проведении шахты № 4 Рондоутского туннеля (стр. 263), а затем и при продолжении самого туннеля в направлении к шахте № 3 значительное количество  $\text{H}_2\text{S}$  выделялось из воды. Газ вредно влиял на глаза рабочих и превращал садины на руках в гноящиеся раны. Рабочие не решались поэтому опускаться в шахту № 4, и пришлось сократить продолжительность рабочего времени в этой шахте.

Рудничный газ в смеси с воздухом причиняет взрывы образовавшейся гремучей смеси. Он часто встречается в нефтеносных, угольных и битуминозных отложениях. Если туннель прорезает угленосные, нефтеносные или даже соленосные породы, то соответствующие участки туннеля следует считать подозрительными по газу.

Подобные взрывчатые нефтяные газы были встречены в соленосных Верфнерских пластах Пирнского туннеля (Pugh-Tunnel), где они, вследствие работы при открытом пламени, явились причиной гибели части рабочей смены.

В тех случаях, когда предвидится возможность появления  $\text{CH}_4$ , должны быть наготове предохранительные лампы; при фактическом появлении газа количество необходимого для вентилирования туннеля воздуха должно быть значительно выше обычной нормы.

В туннельном строительстве и при горных работах часто наблюдаются случаи отравления выхлопными газами бензиномоторов; подобного рода несчастные случаи ошибочно приписываются тогда выделению газа из горных пород.

Наконец, следует упомянуть об азоте, который появляется иногда при прохождении более молодых изверженных пород. Если азот встречается вместе с углекислым газом, то углекислота собирается у подошвы, а азот у потолка выработки.

## 8. ТЕМПЕРАТУРА.

Наблюдаемая в туннеле температура определяется геотермическим градиентом. Величина этого градиента составляет в условиях равнинной местности около 35 м. Под горными хребтами градиент значительно больше, но зависит не только от поперечного сечения хребта, но также и от водоносности, условий залегания и структуры слагающих его пород. Трудности, обусловленные высокой темпера-

турой, встречаются только при проведении глубоко залегающих горных туннелей. При проведении Симплонского туннеля температура в середине туннеля поднялась до  $55^{\circ}\text{C}$ , между тем как при условии производительного труда рабочих она не должна была превышать  $25\text{--}28^{\circ}$ . Высокая температура требует поэтому применения усиленной вентиляции.

## 9. ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ЭКСПЕРТИЗА.

Относительная ценность геологической экспертизы в отношении проектируемого туннеля в высокой степени зависит от следующих обстоятельств.

а) **От опыта**, почерпнутого при проведении туннелей по содействию в аналогичных геологических условиях. При проведении туннелей в Швейцарии предсказать имеющие встретиться затруднения можно с большей степенью точности, чем в случае исполнения тех же работ при аналогичных геологических условиях в Центральной Азии.

в) **От тектонического характера горной местности.** Даже при сравнительно спокойном характере складчатости намеченные линиями на геологических картах тектонические нарушения в действительности при встрече их туннелем представляют собой весьма сложную систему. В областях покровной структуры (Deckenstruktur) или крупных надвигов даже самый точный геологический профиль дает лишь слабое представление о характере нарушений, которые будут встречены в туннелях, и отдельные важные подробности совершенно нельзя предвидеть.

с) **От стратиграфических условий.** Если свита пластов состоит из пластов довольно постоянных по мощности и качеству, то можно составить более надежный профиль, чем в случае наличия пластов быстро раздувающихся и выклинивающихся. Часто линзы щебня или пльвуна в ледниковых моренных глинах, мощность и расположение которых трудно предвидеть, ускользают от всякой маломальски надежной оценки. Геолог в лучшем случае может предсказать только возможность встречи подобных линз.

д) **От рода факторов**, решающее влияние которых на стоимость работ по проведению туннеля можно заранее предвидеть. Если дело касается проведения границы между твердой и пльвучей породами, то от геологической экспертизы можно ожидать более ценных разъяснений, чем в случае проектирования туннеля в различных породах, но более или менее равноценных в техническом отношении.

Из многих правил, установленных в целях определения технических свойств горных пород, следует отметить нижеследующие:

а) **Влияние тектонических факторов.** В крыльях антиклиналей нужно ожидать более сильного давления, чем в ядре. В синклиналях может иметь место очень большой напор воды.

Чем круче поставлены пласты, тем меньше давление на свод крепи. При более или менее пологих пластах давление на свод преобладает над боковым давлением. При крутонаклонных штольнях (бремсберги и пр.), проводимых в направлении падения пластов, давление может возрасти настолько, что станет действовать

на подошву выработки наподобие клина и поднимать ее большими глыбами. Эти правила выведены на основании опыта, почерпнутого при разработке каменноугольных месторождений<sup>1</sup>.

Устройство туннелей, пересекающих косогоры (Lehnentunnel), бывает особенно рискованным в том случае, когда пласты падают в направлении к долине и пересекают ее склон.

Если ось туннеля совпадает с главным сбросом, то есть основания ожидать сильного, иногда и несимметричного давления.

β) *Влияние качественных особенностей пород.* Кремнистый сланец, роговиковые древние породы, вследствие мелкой трещиноватости, вообще склонны к обрушениям<sup>2</sup>.

Доломит обычно трещиноват, склонен к выкрашиванию и, как правило, гораздо более неблагоприятен, чем залегающие с ним в той же пачке пласты известняка.

При проведении глубоко залегающих альпийских туннелей определенное при механическом бурении состояние всех пройденных пород указывало на несомненную устойчивость их. По своей твердости и компактности гнейсы и слюдяные сланцы значительно превосходили известняки и мрамор; несмотря на это, первые две породы требовали деревянного крепления и более толстой каменной облицовки с обратным подошвенным сводом, между тем как известняки оставались без всякого крепления. Это явление объясняли предположением, что гнейсы и слюдяные сланцы подверглись тектоническим нарушениям и раздавливанию и остались в этом состоянии, тогда как раздробленный при горообразовании триасовый известняк процессом последующей перекристаллизации был превращен в кристаллический известняк<sup>3</sup>.

В кембрийских отложениях, пересеченных неглубоко залегающими туннелями в районе города Нью-Йорка, находящиеся за пределами зоны сбросов гнейсы и кристаллические сланцы оказались значительно более благоприятными, чем связанные с ними известняки и доломиты<sup>4</sup>.

При пересечении складчатых пластов более ломкие породы оказываются и более трещиноватыми по сравнению с менее ломкими.

γ) *Влияние возраста формаций горных пород.* В общем при проведении туннелей можно ожидать тем больших затруднений, чем моложе формация проходимых пород. Однако это соотношение между возрастом пород и трудностями их происхождения основана на чисто статистических данных. Наибольшие трудности были встречены в ледниковых отложениях и несцементированных отложениях третичной системы. Согласно Р и а, наиболее благоприятно складываются обстоятельства при прохождении туннелей в сплошном красном

<sup>1</sup> Wolff Grubenausbau in: Die Entwicklung des Niederrheinisch-Westfälischen Steinkohlenbergbaues in der zweiten Hälfte des 19 Jahrhunderts (Предохранение выработок от обвалов: „Развитие ниже-рейнско-вестфальской каменноугольной промышленности во второй половине XIX столетия), 349, 1902.

<sup>2</sup> J. Stiny. Technische Geologie, S. 753. Stuttgart, 1922.

<sup>3</sup> K. Brandau. Das Problem des Baues tiefliegender Alpentunnels und die Erfahrungen beim Bau des Simplontunnels (Проблема устройства глубоко залегающих альпийских туннелей и опытные данные по проведению Симплонского туннеля). Schw. Bauztg., 11, 1909.

<sup>4</sup> Ch. P. Berkey. Geology of the New York City (Catskill) Aqueduct. Education Dpt., Bulletin № 489, Albany N. Y., Febr. 15, 1911.

лежне, пестром песчанике, юрском доломите, квадерном песчанике постелистом известняке (Plänerkalk) и в крепких третичных породах, так как все эти породы устойчивы и вместе с тем легко поддаются добыче. Сланцы и мергели юрской формации обычно проявляют сильное давление и отличаются водопроницаемостью. Серьезные затруднения встречались также при прохождении глинистых и мергелистых фаций мела. Из пород триасовой системы плохой репутацией пользуются Haselgebirge и различные соли (большое давление и приток воды), нижний раковистый известняк (волнистый известняк, мульды с водой, изломы), верхний раковистый известняк (сильное давление в случае небольшой толщины пластов и перемежаемость его с пластами мергеля) и кейпер (пестрые мергели с пропластками „гнилой“ породы). Глинистый кейпер относится к наиболее трудно проходимым породам и большей частью требует устройства подошвенного свода<sup>1</sup>.

д) *Влияние формы рельефа.* С расширением площади выхода проницаемых пластов на поверхность водоносность этих пластов увеличивается.

Английские строители туннелей предостерегают от прохождения горных мысов (Gebirgsnasen), сложенных из мергелистых или глинистых пород (большое давление, опасность провалов на дневной поверхности)<sup>2</sup>.

На пологих склонах гор (Gebirgslehen) процесс выветривания нередко проникает на значительную глубину.

Ко всем этим эмпирическим правилам имеется так много исключений, что к каждому отдельному случаю приходится, повидимому, подходить с индивидуальной точки зрения. Каждая порода в отношении своего сопротивления выемке, своей устойчивости и водоносности весьма изменчива в зависимости от тектоники, а также от того, насколько сохранилось ее первоначальное сложение. Сбросы могут пересекать системы пластов или в виде тонких, гладких, не имеющих технического значения плоскостей, или же в форме широких, отличающихся высоким давлением и водопроницаемостью зон разлома и раздавливания. Трещиноватость отдельных пластов при одинаковом качественном составе их и идентичных, повидимому, тектонических условиях может быть весьма различна. Таким образом, степени точности геологических предсказаний самой природой установлены известные пределы, преступить которые, несмотря на расширение наших знаний, не представляется возможным. Роль геолога ограничивается созданием общей картины тектоники, установлением стратиграфических горизонтов пород и определением направления линий главных тектонических нарушений.

Когда геологический профиль составлен, на долю строителя туннеля остается разрешение задач уже не геологического, но только физического и технического характера. Порода в деле туннельного строительства уже не является гранитом или юрским известняком, глиной кейпера или миоценовой пресноводной глиной, но или одно-

<sup>1</sup> F. Ržiha. Lehrbuch der gesamten Tunnelbaukunst, Bd. 11, 2 Aufl. Berlin, 1872 (Общее руководство к устройству туннелей). Содержит хорошую сводку трудностей, встречаемых при прохождении разных формаций, главным образом в Германии.

<sup>2</sup> F. W. Simmons. Practical Tunneling, 4 Aufl. New York, 1896.

родной упругой породой с определенным сопротивлением сжатию и упругостью, или же пластичной породой с известным показателем консистенции и коэффициентом пластичности. В техническом отношении и с точки зрения учения о сопротивлении материалов разница между разными гранитами в одном и том же туннеле может быть гораздо больше, чем между гранитом и известняком, и разница между выветрившимся слюдяным сланцем и сланцеватым мергелем гораздо меньше, чем между слюдяными сланцами в различных стадиях выветривания. Для разрешения важных в техническом отношении вопросов изображенные на профиле породы прежде всего подразделяются на благонадежные, сомнительные, весьма сомнительные и безусловно опасные. Затем уже дело инженера — озаботиться ли получением более обстоятельных данных о качественных особенностях пород путем заложения пробной штольни или бурения, или же учесть вытекающий из геологической экспертизы риск и принять его во внимание при составлении предварительной сметы. Будущий успех не столько зависит от уточнения методов геологических исследований, сколько от усовершенствования наших способов исследования и описания чисто физических свойств буровых проб.

Хорошие примеры целесообразности геологической оценки местности и тех выгод, которые были извлечены инженерами из геологической экспертизы, мы находим в отчетах об условиях залегания пород в районе города Нью-Йорка<sup>1</sup>. В деле выбора трасы туннеля Кэтскильского водопровода руководителям работ была предоставлена свобода действий, и потому они поручили составление генеральной трасы геологу-консультанту д-ру Berkey. Геолог изучил прежде всего три варианта туннелей городского района А, В и С и высказал следующее заключение (извлечения)<sup>2</sup>.

Мы имеем дело со следующими породами:

Сланец Manhattan, самая распространенная порода, главным образом слюдяной сланец со случайными включениями рогово-обманкового сланца и многочисленными пегматитовыми жилами и прожилками.

Известняк Inwood, в свежем состоянии белый доломитизированный мрамор, местами с включениями слюды.

Гнейс Fordham, содержащий переходы от тонкосланцеватого или кварцитообразного сложения к ленточным или массивным смешанного сложения разновидностям. Самая древняя порода местности гнейс Ionkers — превращенный в гнейс интрузивный гранит. Моложе гнейса Fordham.

Гранодиорит Ravenswood (названный инженерами гранитом), интрузивный гранит, метаморфизованный давлением в гнейсоподобную породу.

Сланцы Manhattan, известняк Inwood и гнейс Fordham пронизаны дайками грубокристаллического гранита (пегматита). Эти дайки распределены неравномерно и технического значения не имеют.

<sup>1</sup> Ch. P. Berkey. Geology of the New York City (Catskill) Aqueduct. Education Dept., Bulletin № 489, Albany N. Y., Febr. 1911.

<sup>2</sup> Ibid., p. 215—270.

Складки тянутся в направлении NE — SW, пласты почти сплошь круто поставлены. Оси складок имеют слабое погружение к югу. Впадины и балки поверхностной топографии в общем подчинены выходам на поверхность известняков. Имеются признаки сбросов.

В техническом отношении эти породы были подразделены:

1. Породы первого класса (наиболее благоприятные породы). Гнейс Fordham, сланец Manhattan вне пределов зон сбросов, раздавливания и выветривания.

2. Породы второго класса (менее благоприятные). Хорошо обнаженные известковые породы (gut aufgeschlossene) вне пределов зон сбросов.

3. Породы третьего класса (неблагоприятные). Известняки, перекрытые четвертичными отложениями. Во всех породах имеются зоны нарушения и раздавливания.

На основании этой классификации варианты В и С были

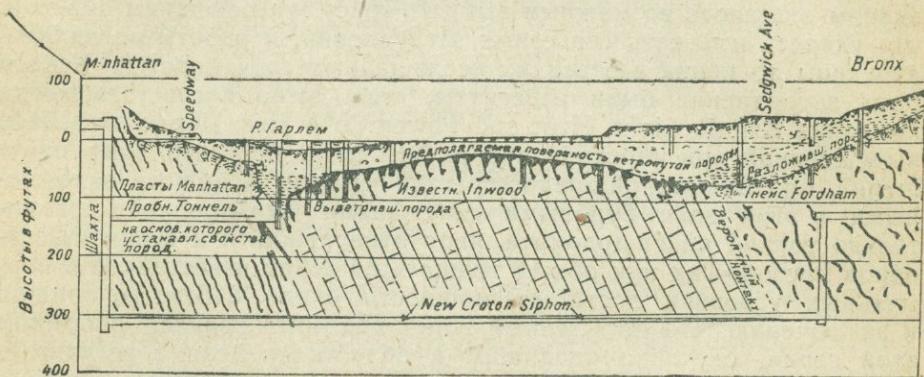


Рис. 86. Туннель под рекой Гарлем в районе г. Нью-Йорка.

отброшены как невыгодные, и было приступлено к сравнительному изучению четырех подвариантов линии А, причем в основу сравнения положены следующие точки зрения: 1) Возвышенности благоприятнее впадин. 2) Более твердые породы должны предпочитаться мягким. 3) Уклонение от пересекания границ между формациями.

4. Отдаление от контактных зон между двумя формациями.

После окончательного установления трасы туннеля была сделана попытка выяснить геологические детали пяти наиболее неблагоприятных участков туннеля при помощи глубокого бурения. Для примера приводим результаты бурения в месте заложения туннеля под р. Гарлем (северный конец городского района, рис. 86). Течение реки следует выходу на поверхность круто поставленных пластов известняка Inwood. На восточном берегу находится гнейс Fordham, а на западном берегу — сланец Manhattan. Предполагалось, что наиболее слабое место находится по линии контакта между сланцем и известняком, так как данные съемки указывали на существование сброса. Было проведено 12 скважин глубиной от 15 до 50 м.

Наиболее глубокая скважина дала следующие результаты: 1) от 0 до 14 м речной ил; 2) от 14 до 24 м рыхлые ледни-

ковые отложения; 3) от 24 до 30 м тяжелая валунная глина; 4) от 30 до 35 м не выяснено; 5) от 35 до 41 м содержащие слюду продукты выветривания известняка Inwood; 6) от 41 до 49 м выветрившийся известковистый переходного типа сланец, относящийся к серии известковистых сланцев; 7) от 49 до 50 м еще более богатый известью сланец; 8) от 50 до 53 м типичный сланец.

Из этих данных были сделаны следующие выводы. От 0 до 35 м новейшие образования, до дилuvia включительно. На глубине 35 и 50 м находится разложившаяся порода, относящаяся, повидимому, к серии известняков Inwood. Эта порода с глубиной переходит в сланец Manhattan. Сбросовая трещина направлена, повидимому, круто на восток. По обеим сторонам сброса породы сильно разложены. Эти данные были изображены на геологическом профиле (рис. 86).

Благодаря только что описанным и другим подобным исследованиям оказалось возможным выбрать трасу туннеля таким образом, что удалось избежать серьезных затруднений, и работы могли быть доведены до конца без всяких неожиданных случайностей. Какого рода затруднения были избегнуты, стало ясно после того, когда компания Astoria Light, Heat and Power Co в Нью-Йорке оказалась вынужденной при переходе под р. East River пересечь зону нарушений, против которой предостерегали геологи. А именно, заложенными в этой зоне буровыми скважинами был пробурен сравнительно тонкий пласт доломита, явно относившийся к серии известняков Inwood. Так как общая толща этой серии известняков в нормальных условиях достигает мощности около 210 м, то пришли к заключению, что пройденный пласт доломита являлся обломком этой серии, случайно попавшим в область гнейсов в результате сдвига и скадчатости. Поэтому зону сочли в техническом отношении сомнительной, но обойти ее при создавшихся условиях уже было невозможно. При устройстве туннеля проникли почти в горизонтальную контактовую зону (зону растяжения) между твердым гнейсом и искрошенным доломитом. В значительной части этой зоны порода была необычайно пористой. Доломит оказался изломанным на куски, величиной от 2 до 5 см, которые можно было вынимать руками. При прохождении этой зоны произошло 16 прорывов воды, количество которой составляло от 20 до 600 л в секунду, причем в течении 6 недель водой было вынесено в туннель около 1700 м<sup>3</sup> песка и обломков породы. Затруднения эти были преодолены главным образом путем нагнетания в породу цемента. К северу от зоны растяжения (Schleppungszone) вдоль контакта между гнейсом и доломитом оказался прослоек бурого ила в 0,5 см толщины, а к югу от нее слой твердой серовато-синей глины от 1 до 1,3 м мощностью<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> J. V. Davies. The Astoria-Tunnel under The East River for gas distribution in New York City (Туннель Астория под East River для распределения газа в г. Нью-Йорке). Transact. Am. Soc. of Civ. Eng., vol. LXXX, paper № 1359, p. 628, 1916.

# ГЛАВА ВОСЬМАЯ. ДВИЖЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ В СВЯЗИ С РАЗРАБОТКОЙ НЕДР И ВЛИЯНИЕ ЭТИХ ДВИЖЕНИЙ НА СООРУЖЕНИЯ, НАХО- ДЯЩИЕСЯ НА ДНЕВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Г. АПФЕЛЬБЕК

Вследствие горных выработок под землей образуются пустоты, и условия давления в земной коре изменяются.

Если плоскости, лишенные поддержки снизу, сравнительно невелики, или если твердость пластов пород достаточно велика, то налегающие пласты могут длительно выдерживать перегрузку, и подземные выработки могут существовать и без крепления, например, штольни в твердом грунте. В других случаях штольни и туннели укрепляют таким образом каменными или кирпичными сводами или же железобетоном, чтобы лишенные поддержки пласты породы опирались на свод; таким образом подземные выработки длительно остаются открытыми.

Пустоты, остающиеся в очистном пространстве после выработки полезных ископаемых, которые незначительно поддерживать открытыми, сами собой обрушаются вследствие оседания лежащих над ними пород; это оседание начинается, как только размеры пустого пространства переходят некоторую границу, обусловленную твердостью пластов породы; при недостаточной мощности покрова действие такого обрушения может сказаться и на дневной поверхности, где оно проявляется в виде оседания, трещин или воронок. При помощи искусственного заполнения подземных камер пустой породой (работы с закладкой очистного пространства сейчас же после выемки) можно частично снова укрепить стенки и кровлю и тем самым избежать обвала, или по крайней мере уменьшить его действие; обычно это делают в тех случаях, когда доставка наверх полученной при выработке породы нежелательна, или когда нужно сохранить от порчи ценные земли на дневной поверхности.

Относительно изменений, происходящих в распределении давлений в породе при проходке туннелей, имеются подробные исследования; далее мы приводим соображения Willman.

До начала проходки штольни в горизонтальной плоскости, проходящей через ось штольни, давление пород везде одинаково, удельная величина этого давления изображается ординатой  $p$  (рис. 87).

Когда штольня пройдена, то давление на плоскости  $BB'$  уже не может непосредственно передаваться на плоскости  $AA'$ . Поэтому нормальное давление на стенки  $BA$  и  $B'A'$  увеличится. Породы над  $BB'$  и соответственно под  $AA'$  свободны, могут претерпевать упругое растяжение и тем самым уже теряют возможность передавать давление. Порода под подошвой и над кровлей выработки, лишенная нагрузки (рис. 88), находится исключительно под дей-

ствием собственного веса. Давление кровли равно собственному весу тела породы, ограниченного параболой. Это тело не изменяет своих размеров, если порода, ограничивающая стенки выработки, может выдержать увеличенное давление, не изменяя своей формы. Если же порода поддается изменениям, то давление будет передаваться не только на самые стенки, но и на более или менее значительное расстояние вглубь породы.

Если предположить, что в более мягких породах давление распространяется в обе стороны на утроенную ширину штольни, то на краях давление будет на одну треть больше (рис. 89). В твердой породе, наоборот, давление распространится на незначительную ширину, например, как на рис. 90, на половину ширины штольни вглубь от стенок, зато давление на краях увеличится в три раза.

Если нормальное давление еще недостаточно, чтобы разрушить породу у свободной стенки, то в местах такого увеличенного давления предел прочности на сжатие может быть перейден. Поэтому в твердых породах в некоторых случаях в стенках выработки происходит растрескивание породы, которое сопровождается треском, напоминающим по звуку ружейный выстрел, и отскакиванием чечевицеобразных осколков (так называемые „томпание“ или „стреляние“), причем эти осколки имеют грани, параллельные стенкам штольни, независимо от могущего существовать напластования пород. Если в породе раньше уже имелась упругая деформация, например, если она находилась под давлением горного хребта, то у стенок штольни эта деформация исчезнет, так как порода расширяется в сторону пустого пространства штольни. При этом порода у стенок освобождается от нагрузки, и давление должно передаваться на лежащие глубже части породы, которые со всех сторон окружены и уже не могут избежать давления. На рис. 91 изображено такое распределение давления, причем кривая II изображает промежуточное состояние, а кривая III — конечное состояние.

Из прогиба кровли до установки окончательного крепления Kommerell<sup>1</sup> вычисляет высоту лишенного напряжений тела породы и получает отсюда основания для расчета креплений.

Часть породы, лишенная нагрузки, носит название „мертвое тело породы“. Если над первой штольной или под ней проложить вторую штольню, то эта последняя не будет находиться под горным давлением, если же, наоборот, через некоторое время после проходки первой штольни, т. е. после того, как лишенное нагрузки тело уже образовалось, закладывают новую выемку на таком расстоянии от первой штольни, что она попадает в зону наибольшего давления, то в ней наблюдается гораздо большее давление пород, чем при проходе первой штольни.

Эти соображения Willmann совпадают с практическими данными, полученными при горных работах и при прокладке туннелей, и привели уже к разъяснению многих своеобразных явлений; из этих соображений сделано также много полезных на практике выводов.

<sup>1</sup> O. Kommerell. Statische Berechnung von Tunnelmauerwerk, Berlin, W. Ernst u. Sohn, 1912.

При устройстве рабочих забоев в очистном пространстве при разработке месторождений полезных ископаемых давления распределяются совершенно так же. Однако, ввиду того, что горнякам, вообще говоря, не зачем сохранять эти разработки в открытом виде, а вскрытые поверхности в этих случаях настолько велики, что пласты, составляющие кровлю, уже не выдерживают собственного веса, то последние и обваливаются в эти пустоты. Это движение пластов, составляющих кровлю, обыкновенно распространяется до самой дневной поверхности, на которой образуются провалы т. е. крутые воронки оседания, или же широкие мульды оседания, в зависимости от высоты и площади обрушающихся



Рис. 87.

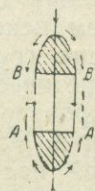


Рис. 88.

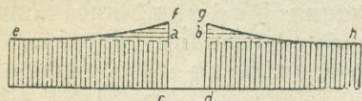


Рис. 89.

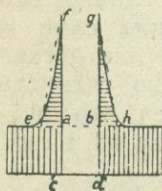


Рис. 90.

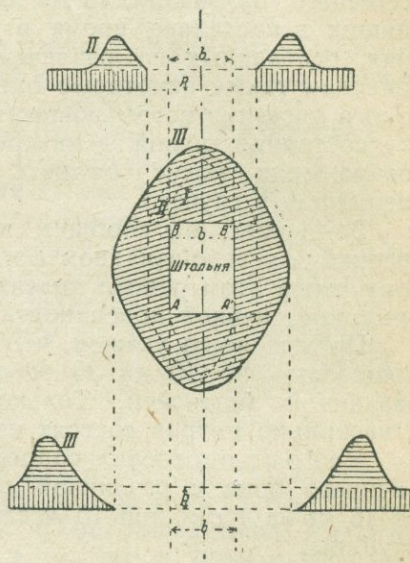


Рис. 91.

подземных выработок, от мощности покрова и от упругих свойств (прочности) пластов пород, составляющих кровлю.

Явления опускания зависят в первую очередь от петрографического характера всяческого бока, который редко бывает однородным и часто состоит из разнородных слоев, так что каждый отдельный пласт, входящий в состав кровли, подчиняется особым физическим законам, обусловленным его вязкостью, твердостью и пластичностью, причем эти свойства могут значительно меняться в зависимости от влажности. Кроме того наличие тектонических нарушений может совершенно изменить направление и распространение оседания. Наряду с геологическими условиями на движение всяческого бока влияют способ и скорость, с которой производится разработка.

Это большое число факторов, действие которых нельзя определить численно, объясняет, почему расчет явлений опускания может дать лишь приближенные величины, тем более, что движение пластов, составляющих покров, можно наблюдать только по тому,

как ведет себя кровля над выработанными пространствами и по явлениям оседания дневной поверхности, тогда как движения внутри всей толщи всяческого бока не поддаются наблюдениям.

По этой причине понятно, почему существует несколько различных теорий относительно обвала пластов пород, составляющих покров; эти теории расходятся между собой в зависимости от различных геологических условий в соответствующих горнопромышленных районах и в зависимости от различных теоретических предпосылок.

Несомненно, что со времени первого возбуждения этих вопросов, произведенного Gopot в 1839 г., мы приблизились к истине. Но так как ни одно из этих представлений до сих пор не получило всеобщего признания, то мы приведем некоторые из теорий, возникших в последнее время в больших горнопромышленных районах, основанных на различных теоретических соображениях. Мы приведем также некоторые опыты, произведенные для более глубокого уяснения встречающихся явлений. Это представит современное состояние знаний в интересующей нас области. Наконец, эти соображения могут служить руководством при рассмотрении специальных случаев.

Во-первых, мы сообщим исследования Radouг, касающиеся явлений в северо-западном Богемском бурогоугольном бассейне, потому что в этом районе явления легко изучать по многочисленным провалам дневной поверхности.

Прежде всего укажем, что в этом бассейне пласт бурого угля мощностью от 10 до 30 м перекрывается глинистыми сланцами различной мощности. Только самые верхние слои мощностью в несколько метров состоят из щебня, глины или песка.

Radouг определил сопротивление сжатию глинистых сланцев всяческого бока с различной глубины и нашел, что оно возрастает от 46 кг на 1 см<sup>2</sup> при 10 м глубины до 138 кг на 1 см<sup>2</sup> при 400 м глубины.

Обрушение забоя после выработки угля происходит в зависимости от толщины оставленного защитного слоя угля (целика) при площади забоя, соответствующей местным условиям давления и сопротивления, и продолжается вверх, имея форму колоколообразного или параболического пространства. Высота такого пространства зависит от сопротивления сланцев. При большой мощности покрова и большой высоте и площади выемки, оседание достигает дневной поверхности, где оно образует воронку почти круглого сечения, большею частью с резко ограниченными краями, глубиной в несколько метров; эта воронка образуется потому, что обломочного материала, происходящего от обрушения, не хватает для заполнения всей подземной выработки и образовавшегося от обрушения пустого пространства. В таких случаях повреждения переходят в настоящее опустошение поверхности. Очевидно подобные явления должны иметь место и при больших мощностях налегающих пластов, хотя они и не приводят к значительным провалам на поверхности, а проявляются лишь в виде опускания почвы в форме блюдцеобразных впадин, отвечающих выработанным камерам, или же в виде плоских мульд, границы которых не совпадают с границами подземных разработок.

Если предположить, что обвалилась выработанная камера круглого сечения (рис. 92) диаметром  $B$  и высотой  $H$ , и обвал имеет форму параболоида, то оседание пород может продолжаться вверх лишь до тех пор, пока оторванный обломочный материал не заполнит как камеру, из которой выбран уголь, так и пустое пространство, образовавшееся вследствие обрушения, конечно, если наперед предположить, что мощность налегающих слоев достаточно велика. Предполагая, что обломочный материал, обрушивающийся в пустоту, разрыхляется на  $p\%$ , Радоуг вычисляет высоту параболоидного обрушившегося пространства по формуле <sup>1</sup>:

$$H = \frac{200h}{p}.$$

Процентное увеличение объема  $p$  зависит от размера кусков, сопротивления обломочного материала и от притока воды, причем тем меньше, чем больше давление лежащих над ним масс породы. Для угольного бассейна Вгүх Радоуг полагает на основании некоторых измерений, что процентное увеличение объема  $p$  зависит от высоты давящих на него обрушившихся масс и от сжатия вследствие динамических напряжений во время самого обвала, определяя отсюда высоту обрушившегося пространства как функцию одной лишь высоты выработки

$$H = 46\sqrt[3]{h^2}.$$

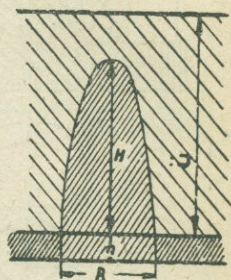


Рис. 92.

Если мощность покрова  $\bar{U}$  равна или больше  $H$ , то вообще не должно происходить никакого опускания поверхности (безопасная глубина), что однако не совпадает с наблюдениями. Радоуг толкует это противоречие в таком духе, что в этом случае все-таки происходит некоторое опускание почвы, зато провалы на дневной поверхности исключаются.

Согласно наблюдениям, в указанном угольном бассейне провалы дневной поверхности не происходят уже тогда, когда мощность покрова в 8—11 раз больше высоты выработки, что уже гораздо ниже указанной Радоуг границы. В то же время впадины на поверхности появляются даже тогда, когда мощность покрова много больше, потому что пласты пород, залегающие над обрушившимися массами, давят на обломочный материал на некоторой высоте выше выемки и, сжимая его, могут прогнуться, не претерпевая при этом никакого увеличения объема.

Радоуг описывает следующим образом возникновение провала дневной поверхности:

„Почти одновременно с обрушением оставленной защитной угольной кровли (целика)  $S$  происходит и обвал всякого бока, и на поверхности рано или поздно образуется углубление почти круглого сечения, диаметром в несколько метров (рис. 93). Стенки этого углубления нависают, если только висячий бок со-

<sup>1</sup> Прим. ред. Высота разгружающего свода.

стоит из глинистого сланца. Вокруг этой воронки часто можно наблюдать образование трещин ( $R$ ), размеры которых убывают с удалением от середины выработанной камеры. Эти трещины шириной в несколько дециметров появляются внутри определенной зоны, которая распространяется на расстояние  $E = U \cotg \alpha_1$  от стенок выработки. Угол  $\alpha_1$  был измерен и оказался равным от 76 до 78°. С течением времени воронка частично заполняется материалом, отделяющимся от ее верхней части, затем нарушенные вокруг воронки части породы, сохранившие еще некоторое равновесие, отделяются до известной границы ( $FF$ ) и опускаются

вследствие силы тяжести в сторону обрушившегося пространства, сдавливая находящийся там обломочный материал. Согласно наблюдениям, в течении от двух до трех лет с момента окончания разработки дальнейшее опускание почвы прекращается. После этого периода происходят

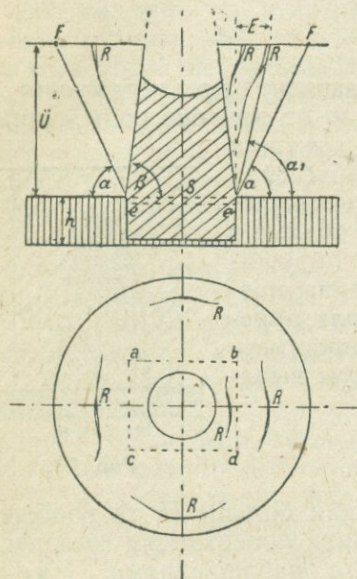


Рис. 93.

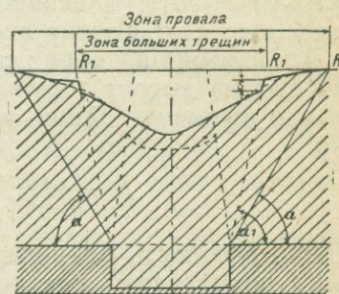


Рис. 94.

только незначительные движения, и можно считать, что через восемь или десять лет движения поверхности совершенно затухают.

До окончательного образования откосов воронки на периферии зоны больших трещин можно наблюдать уступы высотой  $S$  в несколько дециметров (рис. 94) вследствие того, что часть почвы, находящаяся между границей зоны провала и зоной больших трещин, еще очень мало осела. Уступы в конце концов сглаживаются, и успокоившаяся воронка принимает приблизительно форму, указанную пунктиром на рис. 94.

Предельный угол  $\alpha$  (угол провала) опускания грунта для северо-западного Богемского буроугольного района при горизонтальном напластовании угольных пластов и при покрове до 100 м мощности принят от 68 до 70°, при большей мощности — до 72°.

Позднейшая более точная нивелировка показала однако, что небольшие, практически незначительные опускания почвы могут появиться и за этими пределами.

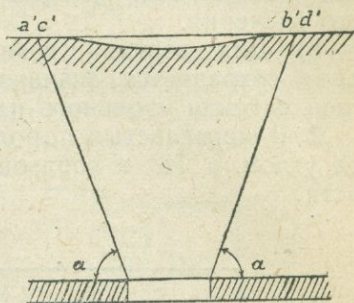
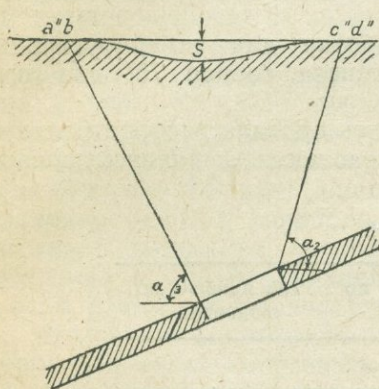
Влияние угла падения пород  $\beta$  принимается в расчет следующим образом (рис. 95).

Предельный угол по восстанию  $\alpha_2 = \alpha + \frac{\beta}{3}$ .

„ „ по падению  $\alpha_3 = \alpha - \frac{\beta}{3}$ .

Однако, как только  $\beta > 27^\circ$ ,  $\alpha_3 = 90^\circ - \beta$ . Значит, угол провала по восстанию пласта острее угла по падению.

Для направления по простиранию предельные углы те же, какие были указаны для горизонтального напластования.



Для приближенной величины опускания  $S$  Radouf дает следующую формулу:

$$S = \frac{3fh}{(F + f + \sqrt{Ff})},$$

в которой  $f$  — площадь выработанного поля,  $F$  — площадь наименьшей зоны провала ( $\alpha_1$ ),  $h$  — теоретическая высота выработки =  $\frac{\text{добыча}^1}{\text{уд. вес}}$ .

Хотя изложенная здесь теория Radouf не всегда вполне совпадает с более точными измерениями и противоречит иногда общепринятым выводам Willmann и Eskardt, она все-таки остается для северо-западного Богемского угольного района ценнейшим пособием при обсуждении вопросов, связанных с обрушениями на поверхности, происходящими от разработки недр.

Главное горное управление в Dortmunde<sup>2</sup> дает для своего округа следующие значения предельного угла провала, выведенные из многочисленных наблюдений над случаями провалов

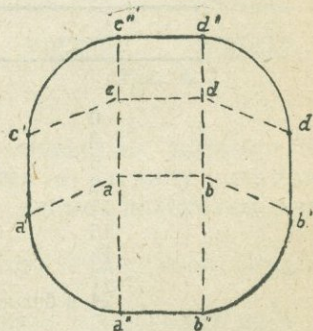


Рис. 95.

<sup>1</sup> На рис. 95 указана и теоретическая форма границы мульды оседания при небольших размерах обычных забоев; по сравнению с глубиной эта граница, вообще говоря, приближается по форме к кругу или эллипсу.

<sup>2</sup> Ueber die Einwirkung des unter Mergelüberdeckung geführten Steinkohlenbergbaues auf die Erdoberfläche im Oberbergamtsbezirke Dortmund. Zeitschr. f. d. Berg, Hütten- und Salinenwesen im preuss. Staate, 1897.

в Рейнско-Вестфальском угольном районе, причем самый механизм этих явлений в расчет не принимался.

1. В каменноугольных породах угол провала:

а) Для нижней границы выработок при совсем пологих пластах, приблизительно до  $15^\circ$  падения, следует принимать в  $75^\circ$ , при крутом падении он однако приближается к естественному углу откоса, хотя и при очень крутом падении не убывает ниже  $55^\circ$  при нормальных условиях. При наклоне угольных пластов от  $15^\circ$  до  $35^\circ$  плоскость провала нижней границы выработок перпендикулярна падению пласта, так что при  $35^\circ$  падения угольного пласта угол провала  $180 - (90 + 35) = 55^\circ$  достигает наименьшего принятого значения.

б) Для верхней границы выработки для каменноугольных пород сохраняется значение угла провала, равное  $75^\circ$  для всех углов падения угольного пласта.

2. В мергелистых породах плоскость провала распространяется под углом в  $78^\circ$  к горизонту по направлению к дневной поверхности.

Таблица XII.

Падение пластов	Угол провала по падению	Угол провала по поднятию
Г р а д у с ы		
0	82	82
3	80	83
6	78	84
9	76	85
12	74	86
15	72	87
18	70	88
21	68	89
24 и более	66	90

О' Donahue<sup>1</sup> сообщает о значительно более крутых углах провала в каменноугольном бассейне в Lancashire. Пласты каменноугольного возраста, слагающие покров, состоят там на 20% из песчаника и на 80% из глинистых сланцев и перекрыты наносами всего в 15 м мощности. Наблюдения относятся к глубинам от 170 до 900 м.

Углы провала, измеренные О' Donahue, собраны в таблице XII.

Goldreich<sup>2</sup> на основании работ Jicinsky и обширного материала, полученного из наблюдений над оседанием дорог, публикует соображения относительно угла провала и предельного угла, а также относительно вертикальных измерений оседания,

<sup>1</sup> O' Donahue. Royal Commission on mining subsidence. Coll. Guard., p. 793, 1924. Referat: Weissner. Glückauf. S. 723, 1924.

<sup>2</sup> A. H. Goldreich. Die Theorie der Bodensenkungen in Kohlengebieten. Berlin, 3. Springer, 1913.

произведенных в районе Ostrau, которые мы в дальнейшем приведем в виде выдержек.

Каменноугольный бассейн Ostrau содержит главным образом тонкие пласты угля, залегающие в толще сланцевых глин и песчаников каменноугольного возраста, на которые несогласно налегают более или менее пластичные меловые и третичные кирпичные глины (Tegel).

По Goldreich, явления оседания протекают совершенно различно в каменноугольных и в третичных отложениях, и даже в пластах карбона характер явлений оседания меняется в зависимости от того, налегает ли на них мощный третичный покров, или же карбон выходит на поверхность.

Горнозаводское общество в Mährisch Ostrau (Berg- und Hüttenmännische Verein) констатировало в одном из обследований, произведенных в 1881 г., что в выработках, имеющих часто несколько сот метров в длину и столько же в ширину, кровля опускается целиком с прогибом составляющих ее пластов без разрыва сплошности. Предположенная Rziha параболоидная форма свода обрушения, которая является правилом в северо-западной Богемии, в этом районе не встречается.

Goldreich наблюдал по оседанию дорог, что мульды опускания тем ближе следуют плавным кривым, чем больше мощность третичного покрова, когда же на поверхность выходит карбон, то профиль этих мульд становится ломаным, очевидно потому, что более жесткие пласты карбона опускаются в глубину уступами, тогда как третичные (Tegel) кирпичные глины пластично изгибаются.

Следует делать различие между понятиями угол провала и предельный угол.

По направлению плоскостей угла провала происходит нарушение сплошности пластов породы, составляющих покров, а предельные углы указывают границы движения пластов вообще.

При горизонтальном напластовании покров обрушается в выработанное пространство по вертикальным плоскостям, и если третичный покров отсутствует, то одновременно с возникновением этого главного провала происходит и опускание боковых земляных призм (вторичный обвал, Nachbruch, рис. 96).

При наклонном залегании угла главный провал происходит между параллельными плоскостями, вертикальными к пласту угля по простиранию, а по падению под углом  $\alpha$  к горизонту.

Для углов падения  $\beta$  от 0 до  $45^\circ$  угол провала  $\alpha = 90^\circ - \frac{\beta}{2}$ ,

для углов падения от  $45^\circ$  до  $90^\circ$   $\alpha = 45^\circ + \frac{\beta}{2}$ ; при  $45^\circ$  падения угол провала наименьший.

Если на карбон налегают пластичные третичные пласты (рис. 97), то главный провал продолжается в третичных отложениях

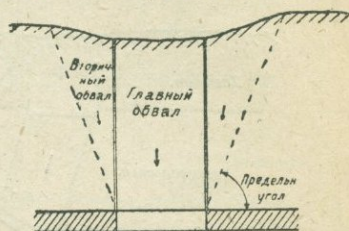


Рис. 96.

по вертикальным плоскостям. Опустившаяся глыба третичных пород мешает вторичному обвалу каменноугольных пород вдоль плоскостей предельных углов. Одновременно с обрушением срединной третичной глыбы боковые третичные призмы обрушения сползают вниз под предельными углами  $\gamma$ . Для размеров предельных углов в третичных отложениях Goldreich получает некоторые зависимости, основанные на законе Rebhann относительно активного давления земли, а именно, величина предельного угла зависит от угла естественного откоса и от сцепления третичных пород. Если  $\rho$  есть угол естественного откоса материала, то угол  $\Psi$ , заключенный между направлением скольжения и горизонтом, равен, если не принимать во внимание сцепление,  $\Psi = 45 + \frac{\rho}{2}$  (рис. 98).

Если сцепление в породе настолько значительно, что она может держаться под углом  $\Psi$  без опорной стенки, то угол скольжения будет одновременно и предельным углом  $\gamma$  для обрушения.

Если сцепление меньше, то предельный угол  $\gamma$  лежит между углом естественного откоса  $\rho$  и углом скольже-

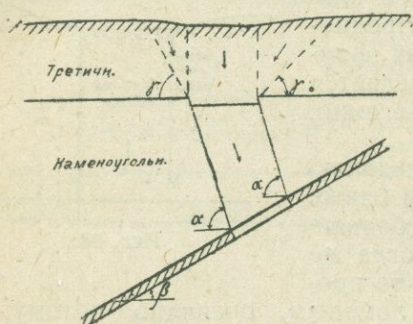


Рис. 97.

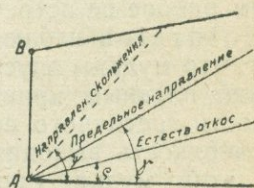


Рис. 98.

ния  $\Psi$ , если же сцепление равно нулю (песок), то предельный угол  $\gamma$  совпадает с углом естественного откоса  $\rho$ .

Чем больше мощность третичных отложений, тем больше сцепление и тем круче предельные углы.

Для размеров вертикального опускания  $S$  Goldreich выводит формулы, а именно:

1. Опускание без увеличения объема (прогиб), рис. 99

$$m = \frac{M}{\cos \beta}, \quad S = 2 \frac{l}{l''} m.$$

Эти формулы выведены в приближенном предположении о треугольном сечении мульды опускания.

2. Опускание с увеличением объема обрушающегося материала.

$$S = \frac{l'}{l''} \left( \frac{l}{l'} m - vt \right).$$

Здесь  $t$  есть мощность каменноугольных отложений над кровлей выработки покрова и  $v$  — коэффициент увеличения объема для карбона (увеличением объема третичных отложений можно практически пренебречь). Из наблюдений над случаями обвала  $v$  получено

от 0,000 до 0,041; оно возрастает с высотой выработки, с углом падения угольных пластов и с числом лежащих друг над другом разработанных угольных пластов, но убывает с увеличением мощности каменноугольных отложений.

Так же как Radou и другие авторы, Goldreich пробует численно вычислить безопасную глубину, т. е. ту глубину, на которой можно производить горные работы, не вызывая на дневной поверхности заметного оседания. Вычисление безопасной глубины для подземных разработок угля оказалось тщетным, так как при всякой достигнутой до сих пор глубине появлялось оседание почвы как только обрушивалась подземная выработанная камера сколько-нибудь большой площади. Также и введение закладки выработан-

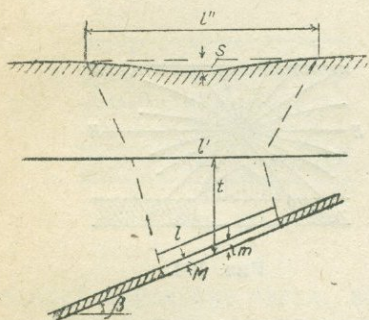


Рис. 99.

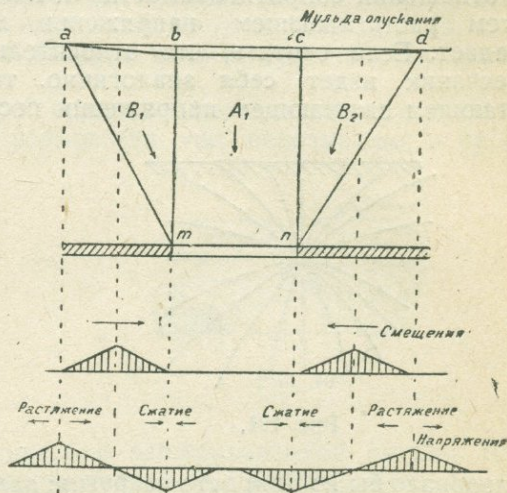


Рис. 100.

ного пространства (Spülversatz) не смогло до сих пор вполне уничтожить оседание почвы. При самой хорошей закладке породы висячего бока опускаются только на 5 до 10% высоты выработки, это опускание происходит однако без разрыва, так что на дневной поверхности образуются широко раскинутые правильные мульды опускания с небольшой вертикальной стрелой прогиба.

Goldreich описывает и поднятия на краях мульд опускания, которые наблюдались в единичных случаях; Buntzel<sup>1</sup> также описывает подобные явления в Верхней Силезии при разработке мощных пластов угля с последующей закладкой. Goldreich относит их к действию пассивного давления земной коры. Он<sup>2</sup> дает следующую схематическую картину смещений и напряжений в грунте (рис 100). Земляные призмы обрушения  $B_1$  и  $B_2$  дают на срединную глыбу  $A$  и вызывают в местах соприкосновения сжимающие напряжения в массах земли, достигающие наибольшей величины в точках  $b$  и  $c$ . Земляные призмы  $B_1$  и  $B_2$  отделяются от соседних пластов по плоскостям  $am$  и  $dn$  и вызывают растяжения (Zerrung), дости-

<sup>1</sup> Buntzel. Ueber die in Oberschlesien beim Abbau mit Spülversatz beobachteten Erdsenkungen. Zeitsch. f. d. Berg-, Hütten- und Salinenwesen, S. 293, 1911.

<sup>2</sup> А. Н. Goldreich. Die Bodenbewegungen im "Kohlenrevier und deren Einfluss auf die Tagesoberfläche, Berlin, J. Springer, 1926.

гающие наибольшего значения в точках *a* и *d*. Между *a* и *b* и между *c* и *d* лежит по одной точке, в которой напряжения грунта равны нулю, эти точки без напряжения являются в то же время точками наибольшего горизонтального смещения.

При тщательном изучении упругих свойств, которыми обладают различные пласты пород, слагающие покров, Eckardt<sup>1</sup> получил совершенно иное представление о механизме движения опускающихся пластов породы.

Из пород, которые играют роль в строении осадочных отложений, только песчаник подвергался более точным исследованиям в отношении сопротивляемости. С. Vach нашел, что при возрастающем растягивающем напряжении модуль упругости песчаника падает. Если считать, что относительно сжимающих напряжений песчаник ведет себя аналогично, то получится, что при возрастающем сжимающем напряжении песчаник сожмется больше, чем

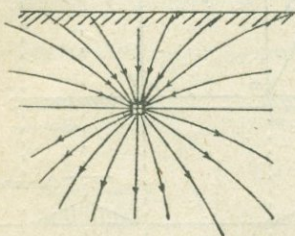


Рис. 101.

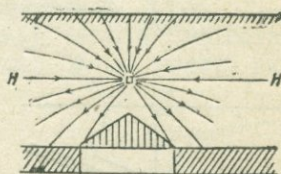


Рис. 102.

следовало бы из прироста нагрузки; далее, при исчезновении нагрузки он тем менее может вернуться обратно к прежней форме, чем больше была нагрузка. Это свойство пород называется пластичностью.

Все породы становятся высоко-пластичными, если они подвергаются достаточному давлению.

Для тел, обладающих пластической деформацией, имеет значение и длительность нагрузки. Способность сопротивления тела под действием нагрузки, выходящей за предел упругости, убывает при действии длительной нагрузки. Во всяком случае, если пласты поддаются давлению, то это ведет к уменьшению нагрузки и к новому установлению равновесия.

На этом основании Eckardt объясняет распределение давлений при образовании выемочных пространств следующим образом.

До проведения выработки на каждую отдельную частицу породы давит вес всех частиц залегающих выше нее пластов. Это давление действует не только в вертикальном, но и в горизонтальном направлениях. Каждая частица пластов, слагающих кровлю, является исходной точкой бесконечного множества опорных линий, по которым на нее действует давление части пород, лежащих выше, и в то же время является конечной точкой опорных линий для всех частей породы, лежащих ниже (рис. 101).

<sup>1</sup> A. Eckardt. Die mechanischen Einwirkungen des Abbaues auf das Verhalten des Gebirges. Glückauf, S. 353, 1913 — A. Eckardt. Der Einfluss des Abbaues auf die Tagesoberfläche. Glückauf, S. 449, 1914. Zeitschriften, S. 1172, 1176.

Сумма всех давлений опорных линий дает давящую нагрузку, равную весу столба породы.

При проведении выработки все проходившие через нее опорные линии пропадают, соседние же нагружаются больше (рис. 102).

В каждой частице, лежащей над выработкой, появляется горизонтально действующая сила давления  $H$  (рис. 102) как равнодействующая горизонтальных составляющих давлений, действующих по направлению каждой из опорных линий. В то время как горизонтальные силы соединяются, силы давления, направленные к противоположным точкам, распространяются во все стороны в окружающую породу. Сила  $H$  тем больше, чем больше высота налегающего столба породы и чем ближе идут возможные опорные линии, т. е. чем больше образовавшаяся благодаря выемке пуста и чем ближе к ней лежит частица.

Если горизонтальная сила больше не может попасть в точку пересечения, то сохранение равновесия уже невозможно, и прои-

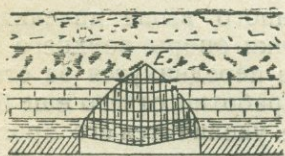


Рис. 103.

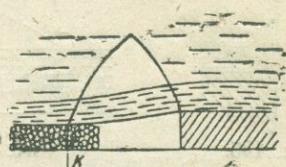


Рис. 104.

зойдет опускание части, вертикально заштрихованной на рис. 102.

Чем больше сопротивляемость давлению и мощность отдельных пластов породы, тем ближе опорные линии, по которым передается давление, распределенное на большую площадь позади стенок выработки. Наоборот, чем меньше сопротивляемость и мощность налегающих пород, чем шире выработка и чем больше вертикальное давление, соответствующее толщине покрова, тем круче идут линии сил, тем более они теснятся вблизи стенок выработки, и тем больше становится там давление налегающих пластов.

Ход явления оседания грунта может быть представлен так: берется некая точка  $E$  (рис. 103), находящаяся над выработкой, в которую горизонтальная составляющая сила давления, слагающаяся из линий сил, уже может попасть, вследствие чего части пластов, лежащие ниже, между выбранными опорными линиями, избавлены от давления вышележащих пород и ведут себя как пластинки, закрепленные по краям, находящиеся под действием собственного веса<sup>1</sup>. Они могут дать прогиб, подвергаются растяжению и в качестве согнутых пластинок будут в состоянии оказать сопротивление дальнейшему опусканию. По мере продвижения вперед выработки расстояние между опорами делается во всяком случае больше, так что для

<sup>1</sup> Прим. ред. Следует отметить, что горизонтальные составляющие общего давления в точке  $E$  направлены с противоположных сторон (рис. 102) и, будучи в совокупности больше соответствующих вертикальных составляющих, парализуют давление массива, расположенного выше точки  $E$ . Вследствие этого на крыше выработки может давить лишь вес породы, ограниченной параболическим разгружающим сводом (вертикальная штриховка на рис. 103).

прогнувшейся балки нужно устроить подпорку в виде закладки пустой породы, если нежелателен обвал ее под действием увеличившейся нагрузки (рис. 104).

Благодаря пластичности пород растяжения сильно возрастают с увеличением нагрузки, и прогиб может достигнуть значительной величины. Кроме того скальвающие напряжения, которые разрушили бы всякое непластичное слоистое перекрытие сколько-нибудь значительной мощности, в пластичном материале малы.

Далее, пластичность влечет за собой утонение пластов в месте их опоры (рис. 105); скальвающие напряжения вместе с растягивающими напряжениями стремятся вытянуть материал с верхней стороны перекрытия, с нижней стороны его материал сжимается.

Если на пласт с малой сопротивляемостью давлению налегает пласт более твердый, обычно дающий и меньший прогиб, то сначала между обоими пластами образуется пустое пространство (рис. 106). Если же поперечное сечение нижнего пласта в местах закрепления

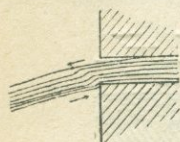


Рис. 105.

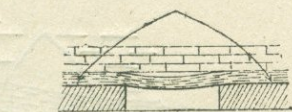


Рис. 106.

уменьшится вследствие описанного выше явления, то точки опоры верхнего пласта передвинутся за стенки выработки, отчего еще больше увеличится его прогиб и давление на точки опоры. Это влечет за собой увели-

ченное действие давления на нижний пласт. Отсюда дальнейшее выдавливание материала в местах опоры в сторону выработанного пространства и т. д., пока наконец не установится равновесие при достаточном прогибе верхнего пласта. При наличии последовательности залегания жестких и пластичных пластов пополнение недостающего материала происходит часто из областей, лежащих довольно далеко от выработки, и это передвижение материала приводит тогда к плоским, растянутым на значительное расстояние мульдам на поверхности, в особенности, если и самые нижние слои плавно изгибаются, т. е. при разработке пластов небольшой мощности или при разработке с последующей закладкой. При разработке с обрушением кровли более мощных пластов угля висячие части пластов прогибаются сильнее и этим препятствуют передвижению материала с больших расстояний; следовательно это приводит к впадинам меньших размеров, но зато более глубоким. На рис. 107 изображена мульда опускания, *a* — при разработке угля с обрушением кровли, *b* — при разработке с последующей закладкой.

В мульде оседания, образовавшейся на дневной поверхности, вообще говоря, можно различить следующие части: опустившаяся часть, край впадины и так называемая оболочка, т. е. переход к ненарушенным участкам. На рис. 108 изображена мульда опускания при идущей вперед разработке с происходящими в ней напряжениями сжатия и растяжения. Точкой *a* отмечаются зоны наибольшего действия растяжений, наиболее опасные для построек.

Если разработка приостанавливается, то пласты пород, слагающих покров, имеют время для пластической деформации; выдавливание пластичных глыб продолжается до тех пор, пока не будет достигнуто состояние равновесия, линии изгиба пластов становятся

круче над краем разработки, и вместе с тем на дневной поверхности края впадины делаются круче и глубже.

Если породы пересечены сбросами, то это влияет на явления оседания следующим образом: сбросовая трещина может передавать действие давления, но не действие растяжения, упругие деформации на породы, лежащие по ту сторону от плоскости сброса, не передаются, и край впадины при приближении к трещине разрыва образуется скорее и круче. В конце концов трещина сброса может раскрыться под влиянием растяжений даже тогда, когда разработка еще не достигла зоны сброса. Таким образом сброс является временно опасным местом, пока он с продвижением разработки не попадет в область сжатия, и трещина его снова не закроется. Однако при сколько-нибудь мощном покрове не следует опасаться сползания лежащей ниже породы по плоскости разрыва. Следовательно впадины, образующиеся вследствие разработок, только

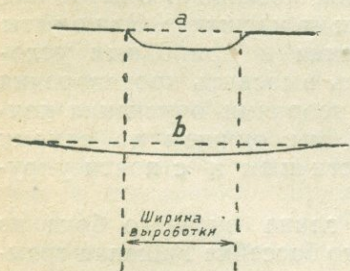


Рис. 107.

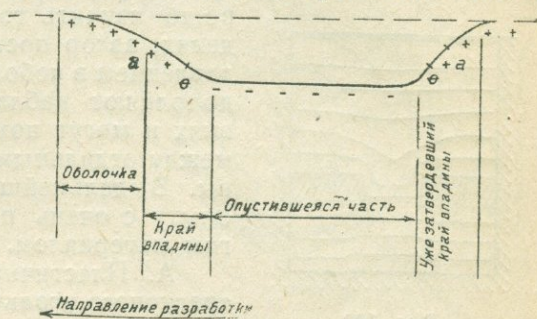


Рис. 108.

временно изменяют ход своего развития под влиянием сбросов в породах, если только этот разрыв не препятствует ходу самих разработок.

В противоположность взглядам Ескардт некоторые авторы указывают на то, что сбросы с большой амплитудой могут влиять на угол провала тем, что по плоскостям сброса могут произойти оползни, например, если в плоскости сброса имеется влажный глинистый прослой.

Если имеется необходимость точно заранее знать о действиях разработок на поверхность, то нужно производить постоянные наблюдения над дневной поверхностью, под которой происходят горные работы, путем систематических измерений горизонтальных и вертикальных движений при помощи нивелировки постоянных точек<sup>1</sup>, расположенных в виде сети; необходимо при этом сопоставить данные измерений с развитием горных работ, и только отсюда можно сделать выводы, годные для данного горнопромышленного района.

Теория Радоуи основана на геологических условиях Богемского угольного бассейна с мощными пластами третичных углей и с покровом из глинистых сланцев, тогда как работы Goldreich и особенно Ескардт имеют более общее значение. Goldreich

<sup>1</sup> Прим. ред. Сеть реперных створов.

исходит из теории давления земной коры и объясняет муьды оседания опусканием призматических масс земли, не принимая во внимание сопротивляемости пород, связанных сцеплением. Центр тяжести взглядов Eckardt лежит в рассмотрении этих упругих свойств, в предположении, что под влиянием больших давлений породы могут стать пластичными и что в пластичных породах происходит передвижение материала в сторону пустот, чем без натяжки объясняется распространение муьды опускания за пределы разработки даже при прогибе без разрыва. Такое передвижение материала Eckardt<sup>1</sup> демонстрировал на опыте в небольшом масштабе, в котором слои сухого песка и жирной глины опускались в пустое пространство. Заметим здесь, что уже в 1885 г. Fayol<sup>2</sup> изучал явления оседания на моделях.

Так как Goldreich оспаривает убедительность этого опыта Eckardt, и так как ход деформации внутри пластов можно хорошо изучить только на искусственных моделях, автор поставил несколько опытов над давлением в небольшом масштабе. Эти опыты дополняют наблюдения в природных условиях и могут помочь выяснять противоречия между отдельными теориями опускания почвы. В дальнейшем мы опишем по одному опыту с очень пластичным и с почти упругим материалом.

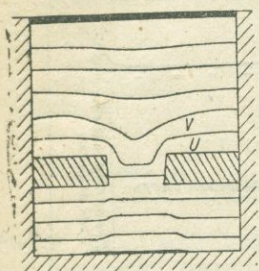


Рис. 109.

А. Пластичная глина всяческого бока из третичного угольного бассейна Falkenau трамбовалась одинаковыми слоями, причем между ними засыпался тонкий слой окрашенной земли. Этот прослой служит для дальнейшего определения произошедших движений и для того, чтобы нарушить однородность упругих свойств, подобно тому как это происходит в природе.

Между двумя такими пластами, изображающими всячий и лежащий бока, была положена доска из твердого дерева с квадратным отверстием, изображавшая угольный пласт с выработанным пустым пространством, и все вместе с боков и снизу было заключено в оболочку, для того чтобы гидравлическое давление, приложенное равномерно со всех сторон, действовало на слой глины только как равномерно распределенное давление сверху.

Это пробное тело помещалось затем в сосуд с маслом, медленно подвергалось давлению и по окончании деформации разрезалось. Рис. 109 изображает такой разрез и показывает вдавливание без разрыва пластичных пород всячего бока, а также и лежащего бока внутрь пустого пространства. Из уменьшившейся толщины нижнего пласта и у краев выработки ясно видно, что оттуда пластичный материал был выдавлен для заполнения пустого пространства; еще яснее видно это передвижение материала на втором слое V, где уменьшение толщины слоя уже отступает от краев вы-

<sup>1</sup> Eckardt. Glückauf, S. 489, 1914.

<sup>2</sup> Fayol. Note sur les mouvements de terrain provoqués, par l'exploitation des mines. Bull. de la Soc. de l'industrie minière, II sér., t. XIV. St. Etienne, 1885. Pефepат Pоllа сk. Zeitschr. d. Öesterr. Ing. u. Arch. Ver. S. 264, 1919.

работки. Над самой выработкой толщина слоев больше первоначальной. Дальше вглубь висячего (рис. 109) бока явления деформации уменьшаются, зато пластичный лежащий бок тоже принял участие в заполнении пустого пространства.

В. В качестве примера практически вполне упругого материала было выбрано стекло. Пробное тело подобное предыдущему, только меньшей толщины, было составлено из склеенных между собой стеклянных пластинок и подвергнуто давлению.

Рис. 110 изображает образовавшиеся изломы сверху и в разрезе. Над пустым пространством образовался пролом в форме параболоида, и раздробленное, вдавленное в пустое пространство стекло образует своеобразную мозаику, прорезанную преимущественно концентрическими и радиальными трещинами; однако и вне круглого края пролома идут концентрические и несколько радиальных трещин, заходящие и за края выработки.

Оба эти опыта представляют предельные случаи в отношении упругих свойств. Первый случай соответствует пластичным отложениям вроде глинистых сланцев, второй — пластам твердых пород вроде песчаника, но также частично и глинистым сланцам, пока действующее на них давление слишком мало, чтобы повысить их пластичность. Результаты этих опытов в главном соответствуют соображениям Eskardt.

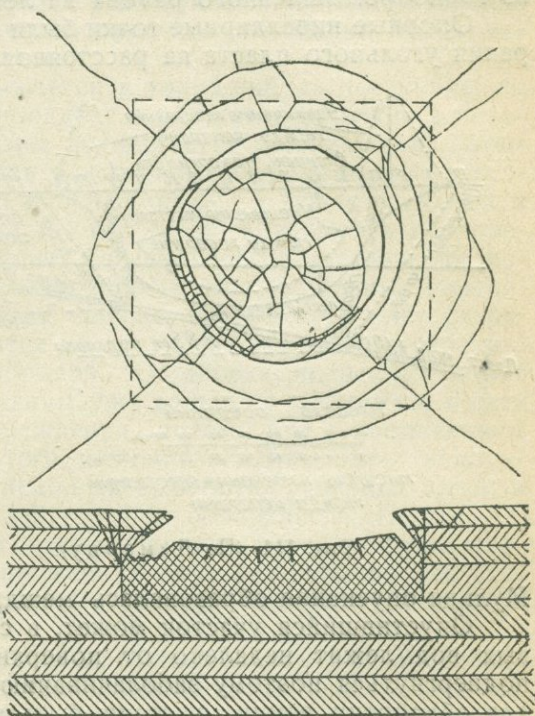


Рис. 110.

После такого сравнительного изложения теории оседания грунта мы рассмотрим сами эти изменения, которые можно проследить при помощи измерений и которые отчасти послужили исходной точкой для рассмотренных выше теорий.

Если горные работы влекут за собой полное разрушение поверхности, например, при разработке мощных пластов угля без последующей закладки пустого пространства при небольших глубинах, то последствия таких работ интересны лишь постольку, поскольку нужно предохранить от разрушения объекты, находящиеся на дневной поверхности. В таком случае под ними оставляют защитный целик (т. е. часть угля, которую запрещается вынимать).

Если же условия (мощность пластов угля, глубина и способы разработки) таковы, что перекрывающие слои опускаются постепенно и без нарушения сплошности их, как, например, при разра-

ботке не очень мощных пластов каменного угля на значительной глубине, то, поскольку это допускается горными законами, можно продолжать работы с соблюдением предписанных мер предосторожности даже и под занятой постройками площадью, под городами, реками и искусственными сооружениями, например, дорогами и т. д. В этом случае движения дневной поверхности земли имеют особо важное значение ввиду большой ценности объектов, находящихся на ней, и обязательства владельца разработок возмещать убытки; поэтому за этими движениями постоянно следят.

Чтобы показать на примерах возможные повреждения, причиняемые горными работами, мы приведем следующие наблюдения<sup>1</sup> из горнопромышленного района на левом берегу Рейна.

Опорные нивеллирные точки были расположены вкрест простирания угольного пласта на расстояниях в 50 м друг от друга. После



Рис. 111. (По Леманну).

Мульда опускания образовалась между опорными точкам 10 и 25.

Опустившийся участок может, в случае, если уровень грунтовых вод лежит недалеко от поверхности, оказаться ниже его и подвергнуться поэтому заболачиванию; это может иметь значение для обработки земли, а стало быть и для ее стоимости. В трещины, образующиеся по краям мульды, может проникать дождевая вода. В холмистой местности и при глинистой или суглинистой почве материал может вследствие этого размягчиться и затем начать сползать. Углы строений, стоящих на краю мульды опускания, оседают неодинаково глубоко, что влечет за собой искривление вертикально стоявших стен и появление трещин.

Рис. 111 показывает, что между опорными точками 12 и 13 появилось максимальное удлинение, откуда можно вывести заключение о наличии максимального растягивающего напряжения. При движении всех точек в сторону середины разработки, опорная точка 13 опередила точку 12, тогда как точки 13 и 14 сдвинулись приблизительно одинаково, а точка 15 прошла меньшее расстоя-

<sup>1</sup> K. Lehmann. Bewegungsvorgänge bei der Entstehung von Pingen und Trögen, S. 933, 1919.

ние, чем 14. Твердое тело, врытое в землю, например, фундамент постройки, между точками 12 и 13 будет подвергаться растяжению, между точками 13 и 14 мало или совсем не подвержено напряжениям, а между точками 14 и 15 подвергнется действию сжатия. Нормальная кирпичная кладка с известковым цементом только в очень небольшой мере выдерживает растягивающее напряжение. Если предел упругости на разрыв перейден, то она разрывается, что в домах происходит прежде всего у окон. Относительно сжимающего напряжения сопротивляемость большинства строительных материалов больше, однако все-таки могут появиться сдвиговые трещины и явления надвига. Если постройка находится внутри мульды опускания и если первоначально образовавшаяся мульда опускания достаточно велика, то в течении процесса опускания такая постройка пострадает меньше всего.

Когда разработка приближается к какой-нибудь постройке, то здание по очереди сначала попадает в область оболочки, в которой постройка главным образом подвергается растяжениям, затем она переходит в область краев впадины и получает наклон в сторону разработки, после этого здание попадает в область сжатия и наконец в опустившуюся область, где снова приходит в первоначальное вертикальное положение. Обыкновенно постройка, выдержавшая растяжения, благополучно переносит и остальные изменения. Повреждения построек тем меньше, чем быстрее идет разработка и чем лучше производится последующая закладка выработанного пространства пустой породой. Остановка подземных работ в тот момент, когда край впадины уже дошел до постройки, может увеличить во много раз повреждения, потому что к растяжениям присоединяется еще влияние того, что край впадины имеет наклонное положение. Точно также неполная выработка угольных пластов небольшой мощности вредно действует на поверхность. Постройка, стоящая над оставленными целиками угля небольшой ширины, подвергается растягивающим напряжениям двух лежащих по обе стороны ее мульды опускания и поэтому должна выдержать особенно большие деформации.

Железнодорожные насыпи подвержены таким же явлениям. Благодаря вертикальным смещениям первоначально существовавшие условия меняются, и приходится поднимать рельсы. Горизонтальные смещения слоев, слагающих покров, проявляются в виде изменения радиуса кривизны и смещения рельс в сторону, поскольку эти смещения происходят под прямым углом к оси рельс, уменьшая или увеличивая промежутки на стыках. Однако горизонтальные смещения не имеют особого значения для железных дорог, они отступают на задний план по сравнению с изменениями уклона железнодорожной насыпи.

Совсем иначе обстоит дело с городскими железными дорогами<sup>1</sup>, рельсы которых тесно связаны с уличной мостовой. Здесь горизонтальные перемещения почвы вдоль оси рельс имеют большое значение. Если рельсы городской железной дороги попадают в область растягивающих напряжений мульды опускания, то отдель-

<sup>1</sup> F. Goetz. Dissertation. Реферат Goldreich, 1926; и Nolden: Zeitschr. Elektrische Kraftbetriebe und Bahnen, 1913. Реферат Goldreich, 1926.

ные рельсы настолько расползаются в разные стороны, насколько это позволяет конструкция стыков (рис. 112). Продолжающиеся перемещаться дальше слои изгибают шпалы, что ведет к образованию узких мест на путях.

Рис. 112 изображает сильно испорченную стрелку на рельсах с ясно заметными промежутками на стыках и трещинами мостовой около шпал.

В области сжатия рельсы приближаются друг к другу вплоть до полного исчезновения стыковых промежутков. Если после закрытия промежутков движение почвы еще не прекратилось, то рельсы выгибаются вбок или выдавливаются вверх над мостовой.

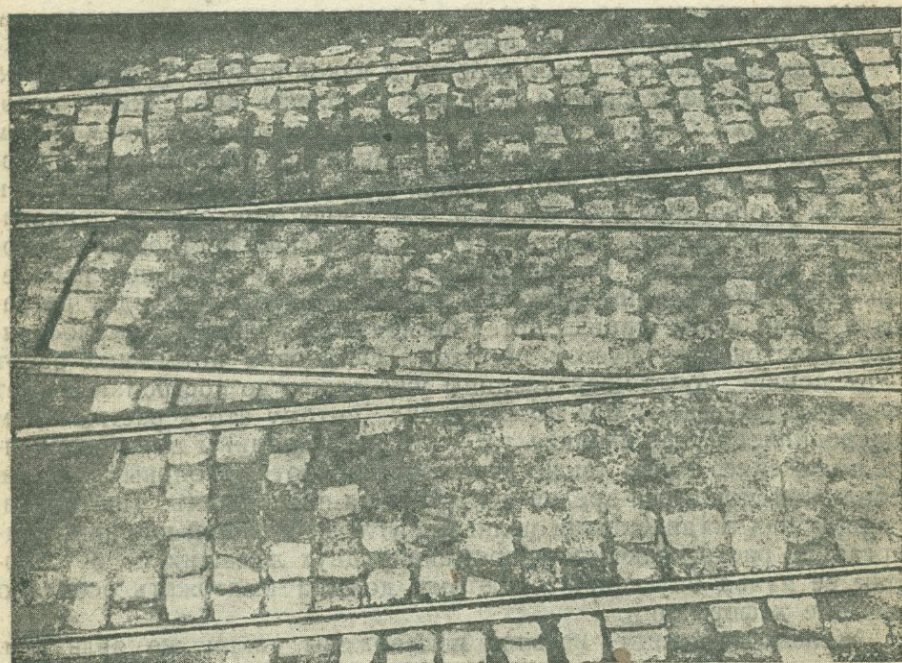


Рис. 112. (По Гольдрейху).

Так на рис. 113 изображены рельсы в Altenessen, изогнутые в виде змеи вследствие сжатия почвы.

Повреждения, причиненные горными работами, можно ослабить или даже избежать их, с одной стороны, оставляя защитный целик угля достаточных размеров под объектом, который требуется сохранить, или же, с другой стороны, изменяя соответствующим образом конструкцию сооружений, что может дать им возможность благополучно перенести возникающие в них напряжения, или же, наконец, располагая сооружение так, чтобы добавочная нагрузка от здания вследствие движений почвы была невозможна. Оставление соответствующего защитного целика оправдывается тогда, когда стоимость минеральных богатств, оставленных без употребления, меньше стоимости сохраняемого объекта, часто же из соображений пользы народного хозяйства нельзя отказаться от добычи минераль-

ных богатств. Для этих случаев остаются в силе упомянутые раньше указания на необходимость полной выемки угольных пластов с последующей закладкой выработанных пустых пространств пустой породой. Если требуется сохранить особенно ценные объекты, то разработку нужно начать под сохраняемым объектом и с возможной скоростью продвигать ее во все стороны от него, для того чтобы этот объект оказался в середине широкой мульды опускания. Эти основные положения применяются между прочим при добыче угля под городами Essen, Gelsenkirchen и Herne (gl. Goldreich, 1926).

Что же касается конструктивных особенностей высоких зданий, относительно которых можно предполагать, что они будут подвергаться оседанию вследствие горнопромышленных работ, следует упомянуть, что здание тем больше подвергается разрушению, чем больше площадь, которую оно занимает. Маленькие постройки можно сделать способными к сопротивлению при помощи устройства железобетонных подушек, подвешенных под фундамент. Здания, занимающие большую площадь, выгодно разделять, устраивая в местах сочленений эластичные конструкции, допускающие возможность различной осадки отдельных частей здания.

Трудно определяемых статически сооружений, особенно сводов, следует избегать. Если имеется возможность расположить сооружение так, чтобы оно было подвижно в трех точках, то движения почвы не могут вызвать напряжений у стоящего на ней сооружения. Например, в Gladbeck<sup>1</sup> железобетонный плавательный бассейн опирается в трех точках на стальные ролики. В Руре один уличный мост в Speldorf-Styrum был подразделен на отдельные независимые друг от друга части, причем каждая из них подперта только в трех местах.

Наконец, упомянем еще, что в исключительных случаях действия обрушения могут обнаружиться и на значительных расстояниях от места разработки, если только в соседних пластах пород встречаются насыщенные водой глины или же пески (пльвуны), прокладываящие себе путь в выработанное пространство вдоль сбросов или трещин, так что они могут вытекать туда под влиянием давления окружающих пород или же собственного веса. Таким путем произошел в городе Вгүх в 1895 г. обвал большого числа домов, как следствие разработки угля, находящейся на расстоянии более 1000 м.

В горнопромышленных областях часто является искушение свалить ответственность за происшедшие повреждения полей и построек

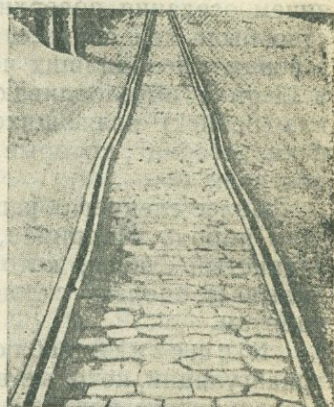


Рис. 113. (По Гольдрейху).

<sup>1</sup> Empfinger, F. Handbuch für Eisenlinbau. 8 bd; Kölger. Die Verwendung von Eisenbeton zur Sicherung von Bauwerken gegen Bergschäden. Berlin, W. Ernst u. Sohn. 1922; Elwitz. Ueber die Durchbildung von Bauten zur Verhütung von Bergschäden. Gluckauf, S. 278. 1913.

в первую очередь на соседние горные разработки. Для эксперта в этом случае является задача разграничить естественную порчу от повреждений, причиненных горными работами; в случае же взаимодействия обеих причин оценить долю участия каждой из них.

При повреждении построек эксперты особенно часто употребляют выражение „типичный случай повреждения, причиненного горными работами“, которое следует применять с большой осторожностью, как покажут следующие соображения.

Spackeler и Marx<sup>1</sup> наблюдали большое число повреждений, происшедших в зданиях, выстроенных в местности, где никаких горных работ не производили (Breslau и Liegnitz), которые большей частью можно было объяснить плохим грунтом, неосновательным фундаментом построек, а в одном случае превращением холодильника в ледник (увеличение объема грунта вследствие замерзания грунтовой воды). На зданиях можно было наблюдать явления сдвигов, растяжения и сжатия, как будто бы они находились под влиянием оседания поверхности вследствие горных разработок, и сходство было тем сильнее, что пострадавшие дома были расположены в зонах, проходивших через целые части города. Эти зоны в Breslau и Liegnitz обуславливаются вытянутыми в длину линзами вязкого ила (Schlick), являющихся отложениями старых заплывших рукавов реки, „стариц“, которые относятся к очень ненадежным грунтам для построек.

Далее следует обращать внимание на наличие склонных к оползням пород. Например, в угольном бассейне Falkenau встречается глинистый сланец, который при слегка увеличенном притоке воды вызывает оползни склонов; однако их пытаются приписать горным работам.

Niemczyk<sup>2</sup> наблюдал при помощи точных нивелировок и триангуляций, которые в течении промежутка времени в 40 лет были несколько раз повторены, за тектоническим опусканием и горизонтальным перемещением в мульде Beuthen как внутри, так и вне местного горнопромышленного района.

При этом он констатировал в местности, где горные работы не производятся, небольшие понижения и горизонтальные смещения, протекающие неправильно во времени и проявляющиеся в соседних пунктах с разной интенсивностью. Поэтому он приходит к заключению, что и в местностях, где ведутся горные работы, не все опускания без исключения следует приписать разработкам, но что это наперед можно сказать только про движения почвы более значительных размеров.

Нельзя не отметить, что нередко предполагают косвенную связь между повреждением построек и горными работами в том отношении, что откачка воды из разработок влияет на грунтовые воды, т. е. понижает их уровень, что опять-таки влечет за собой осушку и вместе с тем усадку грунта, вследствие чего стоящие на нем здания оседают и разрушаются.

<sup>1</sup> G. Spackeler u. W. Marx. Bergschädenähnliche Beschädigungen an Gebäuden in bergbaufreien Gebieten. Glückauf, S. 1409, 1927.

<sup>2</sup> Niemczyk. Die tektonische Absenkung des Beuthener Erz- und Steinkohlenbeckens und ihre Bedeutung für die Beurteilung von Bergschäden. Glückauf, S. 928, 1923.

Такие возможности, вообще говоря, невероятны<sup>1</sup>. Песчаные слои, в которых пустоты заполнены водой, по мнению многих авторов, не изменяют своего объема, если из них извлечь чистую воду, потому что взаимное расположение зерен песка от этого не изменяется, а только промежутки между ними заполняются вместо воды воздухом. Глинистые пласты не дают своей воде свободно вытечь, даже если под ними образовались пустоты вследствие горных работ, потому что вода в них связана, и ее можно удалить только высушиванием, т. е. испарением при доступе воздуха и теплоты; такое испарение может иметь место с поверхности, и в особенно сухие годы испарение заметным образом распространяет свое действие на несколько метров ниже травяного покрова. Так как глины при воздушной сушке усыхают на 10% и более, то такая вызванная высушиванием усадка может повлечь за собой оседание на несколько сантиметров; вследствие этого здание с фундаментом неодинаковой глубины может осесть неравномерно и поэтому дать трещины и разрушиться. Нередко можно наблюдать такие случаи на строениях, стоящих на склонах гор, у которых фундамент, заложенный выше по склону, покоится достаточно глубоко на таком слое грунта, на который высушивание верхних слоев уже не влияет, тогда как фундамент нижней подгорной части здания опущен чуть ниже травяного покрова и поэтому следует за оседанием почвы, вызванным ее высушиванием. Подобно этому ведут себя и здания, в которых имеется подвал, они остаются неподвижными, тогда как часть здания с неглубоким фундаментом и без подвала следует за всеми движениями почвы.

Иногда повреждение строений все-таки может зависеть от искусственного понижения уровня грунтовых вод, например, если здание основано на деревянных сваях во влажном грунте. После понижения уровня грунтовой воды эти сваи могут загнить при доступе воздуха, вследствие чего грунт лишается способности выносить нагрузку, и здание оседает в тех частях своего фундамента, где нагрузка больше, так что оттуда начинается разрушение. Подобные явления могут возникнуть, если в застроенных местностях на небольшой глубине залегают торфяниковые пласты, остающиеся постоянно влажными при тесном соприкосновении с грунтовой водой и обладающие некоторой способностью выдерживать нагрузку. Если уровень грунтовой воды понизится, то несвязанная часть воды может из них вытечь или может быть выжата под действием давления налегающих на торф пород, и таким образом может образоваться впадина.

---

<sup>1</sup> K e g e l. Bermännische Wasserwirtschaft

# ГЛАВА ДЕВЯТАЯ. ТЕХНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

КАРЛ ПРЕКЛИК

В настоящей главе рассматривается вопрос об исследовании горных пород со стороны их технической применимости<sup>1</sup>, поскольку такое исследование может быть выполнено в условиях лабораторной обстановки. Что касается вопросов, которые могут быть разрешены лишь на месте в природных условиях, как, например, о количестве полезного материала, о соотношении между наносами и полезной мощностью, о трещиноватости и характере отдельности. о хозяйственных и географических условиях, и т. д., то эти вопросы в данной главе не рассматриваются.

Результаты произведенных в лаборатории исследований, строго говоря, действительны только для испытанного материала; с большой степенью вероятности они могут считаться справедливыми также и по отношению всех тех встречающихся в природе горных пород, которые по своим петрографическим свойствам в значительной мере сходны с исследованным образцом. Но ни в коем случае нельзя распространять результаты испытания на все горные породы данной каменоломни даже и в том случае, если они принадлежат к одной и той же разновидности (например, биотитовый гранит, кварцевый песчаник). Отсюда следует правило—производить отбор предназначенного для исследования материала с величайшей тщательностью.

Взятие пробы для петрографического исследования простирается на все разновидности горной породы данной каменоломни, включая разности с разной степенью и характером процесса разложения породы у поверхности и близ сбросов и жил. Первые из них дают основание для суждения о степени подверженности породы выветриванию, последние указывают на ухудшение качеств материала под влиянием более молодых тектонических и вулканических процессов. Из возможно большего числа мест берут пробы размерами около  $9 \times 12$  см, наносят места взятия проб на карту и отмечают примерное количественное соотношение между отдельными типами пород.

В то время как при относительно не дорогих петрографических исследованиях желательно иметь дело с возможно более многочисленными образцами пород, для дорого стоящих и длительных механических испытаний рекомендуется производить отбор сравнительно небольшого числа, но зато наиболее характерных образцов породы. Само собой разумеется, что приходится принимать во внимание лишь разновидности тех пород, которые предусмотрены также и планом предстоящего практического применения их. Для строительных камней и мостовых плит выбирают глыбы, размер

<sup>1</sup> За исключение химико-технического применения.

которых обуславливается числом предстоящих отдельных опытных испытаний (стр. 315). Они добываются при условии применения минимального усилия, нумеруются, и места взятия их отмечаются на карте. Никогда не следует забывать отмечать на образцах разноцветными штрихами положение плоскостей слоеватости, отдельности, простираения и падения пластов и т. д. Если материал предназначается исключительно для переработки на щебень, то от каждого сорта породы берут пробные образцы в таком количественном соотношении, чтобы получить смесь, отвечающую среднему составу щебня из данной каменоломни. Смотря по размерам каменоломни и разнообразию встречающихся в ней типов пород, возможно бывает обойтись количеством пробного материала в размере от 20 до 50 кг. Для определения сопротивления материала давлению и изнашиванию, согласно Гренгу, на каждую пробу щебня следует брать по образцу наиболее твердого и наиболее слабого из тех сортов пород, которые имеются в количествах, могущих оказать влияние на качественный состав щебня.

При наличии задания на галечники и пески добытый из шурфов и разрезов материал испытывается на пригодность и крупность зерна путем просеивания, причем негодная часть его выражается в процентах от общего количества. Если материал в общем довольно однороден, то ограничиваются взятием одной средней пробы; но если месторождение состоит из разносортных, отделимых друг от друга при добыче слоев, то каждый из них должен подвергаться особому опробованию. Для песков, согласно Гренгу, достаточно брать пробы весом от 5 до 10 кг, при грубозернистом материале пробы берутся в количестве до 100 кг и выше. Строить профили на основании полученных из шурфов данных в случае рыхлых пород следует с осторожностью, ибо осадочные образования часто проявляют резкую изменчивость.

Так как целесообразный выбор материала для опробования требует больших познаний из области петрографии, то лучше всего поручить это дело опытному геологу, который может выполнять также и необходимые петрографические исследования. Пробы, в особенности, если дело сводится к экспертизе продажного товара, должны упаковываться в коробки или мешочки таким образом, чтобы была исключена возможность какого-либо умышленного или неумышленного подмена или изменения пробного материала. Обстоятельства, при которых производилось взятие проб, а также данные относительно личности и квалификации исполнителя этой обязанности должны точно отмечаться в свидетельствах об испытании материала, так как это служит основанием для суждения о степени надежности подобных свидетельств.

## 1. ОБЩИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.

**Количественный минералогический состав, степень выветривания, структура.** Количественное соотношение встречающихся в горной породе минералов имеет важное значение для оценки сопротивляемости ее влиянию механических и химических агентов (выветриванию). Оно может быть измерено по способу Розиваля или вычислено на основании данных количественного химического

анализа. Иногда приходится оба эти метода комбинировать. В случае микроскопического и химического исследований взятая для этой цели проба должна иметь некоторую минимальную величину для того, чтобы можно было дать правильную среднюю качественную характеристику породы. Относительно определения этой минимальной величины (элементарная площадь, элементарный кубик) см. стр. 316.

Если минералогический состав определяется, исходя из химического анализа, то процентные содержания найденных окислов делят сначала на их молекулярные веса и полученные „молекулярные частные“, в целях освобождения от десятичных знаков, умножают на  $10^3$  или  $10^4$ . Затем эти молекулярные частные распределяют между отдельными минералами сообразно числу входящих в состав каждого из них молекул<sup>1</sup>. Процесс и последовательность этого распределения зависят от рода составляющих породу минералов.

Таблица XIII.

	Веса в процентах	Молекулярное частное $\times 10^4$	Альбит	Анортит		Мусковит	Ортоклаз	Кварц	Влажность
SiO <sub>2</sub>	72,99	12 104	2 862	242	—	960	2 586	5 454	—
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,42	1 509	477	121	911	480	431	—	—
CaO	0,68	121	—	121	T=	—	—	—	—
Na <sub>2</sub> O	2,96	477	477	—	=319	—	—	—	—
K <sub>2</sub> O	5,58	592	—	—	592	160	432	—	—
H <sub>2</sub> O	2,37	1 316	—	—	—	320	—	—	996
Сумма	100,00	Проц.	25,1	3,3		12,8	24,1	32,9	1,80%

*Пример.* Анализ аплита, состоящего из ортоклаза, плагиоклаза (альбит + анортит), кварца и мусковита (табл. XIII). В основу вычисления молекулярных частных приняты следующие молекулярные веса: SiO<sub>2</sub> 60,3, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 102,2, CaO 56,07, Na<sub>2</sub>O 62,00, K<sub>2</sub>O 94,2 H<sub>2</sub>O 18,016.

Сначала из Na<sub>2</sub>O определяют силикат альбита (Na<sub>2</sub>O · Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · 6 SiO<sub>2</sub>) путем сложения числа 477 молекул Na<sub>2</sub>O с таким же числом молекул Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и с шестеренным числом молекулы SiO<sub>2</sub>. Аналогично

<sup>1</sup> Распределение химического состава вещества между отдельными минералами основано на следующих стехиометрических соотношениях: положим, что от сложения  $a$  молекул соединения  $A$ ,  $b$  молекул соединения  $B$  и т. д. образуется  $n$  молекул соединения  $N$  согласно химической формуле  $a \cdot A + b \cdot B + c \cdot C + \dots = n \cdot N$  (например,  $1 K_2O + Al_2O_3 + 6 SiO_2 = 1 K_2Al_2Si_6O_{16}$ ). Тогда для весовых количеств отдельных образовавшихся соединения частей мы можем написать равенство:  $k \cdot a \cdot M_A + k \cdot b \cdot M_B + k \cdot c \cdot M_C = k \cdot n \cdot M_N$ , где  $k$  — любой постоянный коэффициент,  $M$  — молекулярный вес соответствующего (значки  $A$ ,  $B$  и т. д.) соединения. Произведения  $k \cdot a \cdot M_A$ ,  $k \cdot b \cdot M_B$ , и т. д., представляют собой эквивалентные веса. Если разделить эквивалентные веса на соответствующие молекулярные веса, то получим цифры (молекулярные частные), пропорциональные числу вошедших в состав соединения молекул. Наоборот, путем умножения молекулярных частных на соответствующие молекулярные веса можно получить эквивалентные веса.

поступают и с силикатом анортита ( $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2 \text{SiO}_2$ ). Если теперь из количества  $\text{K}_2\text{O}$  определить ортоклаз ( $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6 \text{SiO}_2$ ), то получился бы остаток  $(911 - 592) = 319$ , соответствующий молекуле  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Этот избыток глинозема  $T$  показывает, что кроме полевых шпатов имеются еще и другие глиноземсодержащие минералы. Согласно приведенному минералогическому составу, содержащим глинозем является еще один лишь мусковит ( $2 \text{H}_2\text{O} \cdot \text{K}_2\text{O} \cdot 3 \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6 \text{SiO}_2$ ), но так как он и сам также содержит  $\text{K}_2\text{O}$ , то число 592 молекулы  $\text{K}_2\text{O}$  нужно распределить между ортоклазом и мусковитом:

$$\frac{1}{2} T = \frac{319}{2} = 160 \text{ частей молекулярного частного приходится на мусковит, а остаток на ортоклаз.}$$

Вычисление количеств этих минералов производится, исходя из числа молекулы  $\text{K}_2\text{O}$ , согласно ранее указанному способу. Избыток  $\text{SiO}_2$  указывает на наличие кварца, остаток  $\text{H}_2\text{O}$  — на влажность.

Для того чтобы, исходя из молекулярных чисел, получить в процентах весовое содержание отдельных минералов, умножают (для каждого минерала в отдельности) молекулярное число каждого окисла на соответствующий молекулярный вес и складывают произведения. Так, например, содержание альбита определяется следующим образом:  $\text{SiO}_2: 0,2862 \times 60,3 = 17,26\%$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3: 0,0477 \times 102,2 = 4,88\%$ ;  $\text{Na}_2\text{O}: 0,0477 \times 62,00 = 2,96\%$ ;  $17,26 + 4,88 + 2,96 = 25,1\%$  альбита.

При этом способе распределения принимается, что полевые шпаты имеют теоретический состав, т. е. что они абсолютно свежи, чего в действительности полностью, конечно, не наблюдается. Чем менее свежи полевые шпаты, тем, вследствие содержания богатых глиноземом продуктов разложения, избыток глинозема в них выше<sup>1</sup>. Таким образом химический анализ представляет средство для определения состояния горной породы (выветрелость, свежесть) в цифровых показателях. Конечно, нужно знать, какая часть избытка молекулы глинозема приходится на первичный мусковит и какая часть на вторичный глинистый продукт (каолин).

Путем точного расчета такого распределения произвести нельзя, так как число неизвестных превышает число уравнений. Тут на помощь является геометрический анализ по Розивалю. Допустим, что измерения в шлифах показали  $V$  объемных процента мусковита; пусть удельный вес породы будет  $S$ , удельный вес мусковита  $\gamma$ , тогда содержание мусковита в весовых процентах  $g$  получится из формулы

$$g = \frac{V \cdot \gamma}{S}.$$

В данном случае, например,  $g = 3,8\%$ .

Если мы теперь пожелаем на основании геометрически определенного содержания мусковита найти количество продуктов разложения, то прежде всего вычисляем содержание альбита и анор-

<sup>1</sup> При разложении полевых шпатов наряду с каолином образуется в форме тончайших чешуек также и вторичный мусковит, легко отличимый от первичного (ursprünglich) под микроскопом. В дальнейших вычислениях, ввиду приближенности их, содержанием этого вторичного мусковита пренебрегают и вместо него ведут расчет на каолин.

тата (табл. XIV). При вычислении содержания мусковита мы исходим из следующих соображений. Эти 3,8% мусковита состоят из  $x_1\%$   $\text{SiO}_2$ ,  $x_2\%$   $\text{Al}_2\text{O}_3$ , и т. д. По законам стехиометрии мы имеем то же соотношение:

$$\frac{x}{g} = \frac{n \text{ (молекулярный вес окисла)}}{\text{молекулярный вес мусковита (798,63)}}$$

где  $n$  означает число молекул соответствующего окисла, содержащихся в силикате мусковита. Таким образом

$$x_1 = (\text{для } \text{SiO}_2) = \frac{3,8 \times 6 \times 60,3}{798,63} = 1,72\% \text{ SiO}_2$$

Аналогично получим, что  $x_2 = 1,46\%$   $\text{Al}_2\text{O}_3$ ;  $x_3 = 0,45\%$   $\text{K}_2\text{O}$  и  $x_4 = 0,17\%$   $\text{H}_2\text{O}$ . Эти  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ ,  $x_4$  делятся на соответствующие молекулярные веса, и получающиеся молекулярные частные вносятся в столбец мусковита. Если теперь из остаточного  $\text{K}_2\text{O}$  вывести содержание ортоклаза, то получим избыток глинозема  $T^1 = 224$ , указывающий на количество глиноземистых продуктов разложения, принимаемых за каолин ( $2 \text{H}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2 \text{SiO}_2$ ). Остатки  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и в этом случае дают содержание кварца и влажности.

Таблица XIV.

	Молекулярное частное $10^4$	Альбит	Анортит	Мусковит	Ортоклаз		Каолин	Кварц	Влажность
$\text{SiO}_2$	12 104	2 762	242	284	3 270	—	448	4 998	—
$\text{Al}_2\text{O}_3$	1 509	477	121	142	545	$T^1 =$	224	—	—
$\text{CaO}$	121	—	121	—	—	$= 224$	—	—	—
$\text{Na}_2\text{O}$	477	477	—	—	—	—	—	—	—
$\text{K}_2\text{O}$	592	—	—	47	545	—	—	—	—
$\text{H}_2\text{O}$	1 316	—	—	95	—	—	448	—	773
Проценты:		25,1	3,3	3,8	30,4		5,7	30,2	1,4

В рассмотренном случае избыток глинозема является мерою степени разложения породы. В других случаях (в зависимости от результатов микроскопического анализа) признаком для суждения о степени свежести породы может служить также содержание  $\text{CO}_2$  (кальцит),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (лимонит) и влажность (коллоидальные вещества).

Своеобразный путь для определения степени выветрелости был избран А. Розивалем (ср. Verh. d. Geol. R.—A., Wien, 1899, S. 204). Он определяет теоретическую твердость породы  $H$  из уравнения

$$100 H = p_1 h_1 + p_2 h_2 + p_3 h_3, \text{ и т. д.},$$

где  $p_1, p_2, p_3$ , и т. д., означают в процентах геометрически определенные части объема породы, приходящиеся на отдельные минералы;  $h_1, h_2, h_3$ , и т. д., их средние твердости (durchschnittliche Korundhärte) <sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Сопоставление средних твердостей (Korundhärten) важных минералов. Розиваль приводит в Verh. d. Geol. R.—A. S. 848. Wien, 1896.

Вычисленную таким образом теоретическую твердость Розиваль сравнивает с действительной твердостью породы  $h$  (см. стр 320). Тогда свежесть  $F$  выражается дробью

$$F = \frac{h}{H},$$

а степень выветрелости  $V$  равенством

$$V = \frac{H-h}{H} = 1 - F.$$

Розиваль различает следующие степени:

	Свежесть
I. Полная свежесть . . . . .	от 0,9 до 1,0
II. Высокая свежесть . . . . .	" 0,8 " 0,9
III. Большая " . . . . .	" 0,7 " 0,8
IV. Средняя " . . . . .	" 0,6 " 0,7
V. Подуспежность . . . . .	" 0,5 " 0,6
VI. Подувветрелость . . . . .	" 0,4 " 0,5
VII. Сильная выветрелость . . . . .	" 0,3 " 0,4
VIII. Выветрелость до раскрашивания . . . . .	" 0,2 " 0,3
IX. Высокая выветрелость . . . . .	" 0,1 " 0,2
X. Полная " . . . . .	" 0,0 " 0,1

В то время как химическое и механическое испытания дают возможность выразить состояние породы в цифровых показателях, чисто микроскопическое исследование характеризует одну только качественную сторону<sup>1</sup>, но зато оно дает прекрасную картину условий сложения, позволяя самым ясным образом различать места излома и заживления в составляющих породу минералах, а также форму взаимного срастания и распределения их (структуру).

В отношении форм срастания различают вообще породы с непосредственно и с посредственно связанными зёрнами (Kornbindung). У первых отдельные минеральные индивидуумы непосредственно связаны между собой вследствие силы сцепления (рис. 114 и 115), у вторых они склеены друг с другом посредством связывающего их вещества (цемента).

В породах с непосредственно связанными зёрнами (изверженные породы, кристаллические сланцы, многие известняки) прочность связи между зёрнами, т. е. то сопротивление, которое порода оказывает усилию, направленному к их разделению, бывает обычно больше, чем прочность самих зёрен, поэтому плоскости излома вообще не располагаются по границам между зёрнами, но пересекают составляющие породу минералы. Сопротивление породы находится также в явной связи с родом связи, существующей между ее зёрнами: агрегаты зёрен, врезающихся друг в друга или (рис. 114) имеющих форму войлокообразно спутанных переплетающихся между собою сростков (verfilzte und sparrigver-

<sup>1</sup> Оценка явлений разложения требует большой опытности и не должна производиться схематически. Существуют породы, находящиеся в состоянии сильно прогрессирующего выветривания и тем не менее практически хорошо сохранившие свою прочность (например, соскюритизированный габбро).

wachsene), проявляют большую твердость и сопротивление изнашиванию, чем скопления зерен в форме округленных или многоугольных мостовых шашек (рис. 115).

Весьма благоприятным представляется тот случай, когда отличающийся наибольшей сопротивляемостью минерал (например, кварц или авгит) появляется не в форме неравномерных скоплений, но в виде равномерно распределенной массы подобно цементу, связывающему менее прочные минералы (например, полевой шпат). Особенного внимания заслуживают наблюдаемые иногда между отдельными зернами пустоты клинообразной формы и изолированные промежутки, которые, подобно щелям и трещинам, снижают свойство сопротивляемости породы и прежде всего ее морозостойкость. Их можно сделать более ясно различимыми путем окрашивания, о котором говорится в дальнейшем изложении.

В породах с посредственно связанными зернами (обломочные породы, прежде всего песчаники) различают случаи, характеризующие прочность самих зерен ( $K_z$ ), прочность связывающего их цемента ( $K_B$ ) и прочность связи между зернами и цементом ( $H$ ):

$K_B < K_z$  — плоскости излома проходят через цемент, минуя зерна;

$K_B > K_z$  — плоскости излома проходят через цемент и через зерна;

$H < K_z, H < K_B$  — цемент при изломе отделяется от зерен;

$H = K_B < K_z$  — плоскости излома проходят частью через цемент частью по границам между цементом и зернами.

С геометрической точки зрения в породах с посредственно связанными зернами различают показатель связности (Bindungszahl) и меру связанности (Bindungsmass). Под первым понимают число зерен, с которыми отдельное зерно в плоскости шлифа представляется связанным, под вторым разумеют частное от деления периметра зерна на часть периметра, приходящуюся на место вращаения смежных зерен.

В своем Руководстве к строительно-техническому испытанию пород (стр. 184) Гиршвальд приводит методы числового определения прочности связи между зернами.

**Крупность зерна.** В применяемых системах распределения скалистых (felsartigen) горных пород по степени крупности их зерна на грубо-, средне- и мелкозернистые (абсолютная крупность зерна) не наблюдается единства.

Розенбуш различает сообразно величине диаметра зерна ( $d$ ): крупнозернистые ( $d > 4$  см), грубозернистые ( $d$  от 1 до 4 см), мелкозернистые ( $d$  от 3 до 10 мм) тонкозернистые ( $d < 3$  мм) и плотные (dicht) породы (отдельные минералы невооруженным глазом неразличимы).

Герман устанавливает для твердых горных пород (Hartgesteine) следующую шкалу: крупнозернистые ( $\varnothing$  от 10 до 20 мм), грубозернистые ( $\varnothing$  от 5 до 10 мм), среднезернистые ( $\varnothing$  от 3 до 5 мм), мелкозернистые ( $\varnothing$  от 2 до 3 мм), тонкозернистые ( $\varnothing < 2$  мм) и плотные породы.

Для менее твердых горных пород (песчаники, известняки) крупнозернистым соответствует  $\varnothing$  от 2 до 3 мм, грубо-

зернистым  $\varnothing$  от 1,25 до 2 мм, среднезернистым  $\varnothing$  от 0,75 до 1,25 мм, мелкозернистым  $\varnothing$  от 0,25 до 0,75 мм и тонкозернистым  $\varnothing < 0,25$  мм. Та же самая шкала принята и австрийскими нормами.

Иддингс разделяет породы так: метровой крупности зерна ( $\varnothing > 1$  м), дециметровой крупности ( $\varnothing > 1$  дм), и т. д., до микрзернистости ( $\varnothing > 1$  μ ( $\varnothing > 0,001$  мм)).

Для того чтобы устранить неудобство, вытекающее из многообразия систем обозначения крупности зерна, и вместе с тем дать способ более отчетливого подразделения пород, отвечающего техническим целям, Целтер предлагает указывать среднюю крупность зерна в миллиметрах и притом в отдельности для каждого

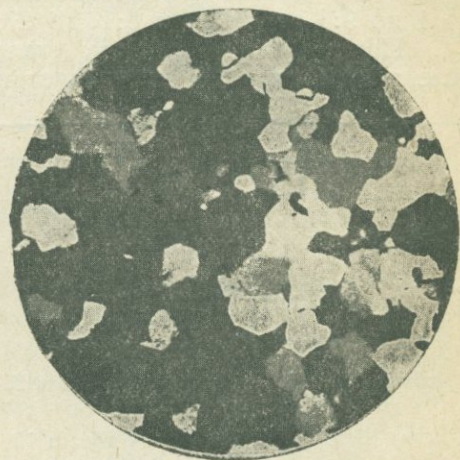
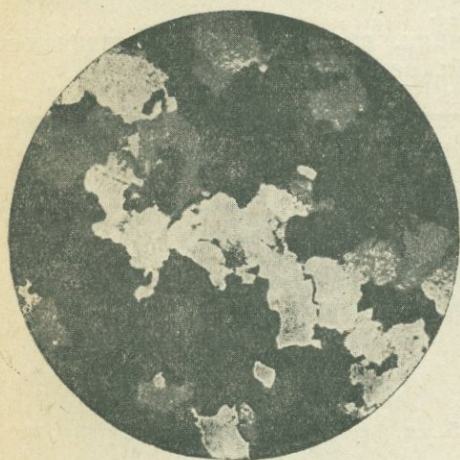


Рис. 114. Кварцит с врезанными друг в друга кристаллами кварца. Perosa, Kottische Alpen (по Вейншенку).

Рис. 115. Кварцит со структурой в виде мостовых шашек. Snnk, Steiermark (по Вейншенку).

вида минерала. Определение средней крупности зерна производится под микроскопом путем измерения при помощи окулярного микрометра 10 самых крупных и 10 самых мелких зерен и взятия среднего из произведенных измерений. Для контроля можно еще также измерить и вывести среднюю величину 20 зерен, случайно оказавшихся в поле зрения<sup>1</sup>. В случае, если встречаются порфиоровые включения, то на них не обращается внимания, так как иначе это привело бы к искажению среднего значения. Размеры таких включений следует указывать отдельно. В общем при измерениях крупности зерна, производимых под микроскопом, получаются меньшие значения, чем при макроскопических измерениях, потому что некоторые зерна, представляющиеся невооруженному глазу цельными, часто под микроскопом оказываются агрегатами зерен. Для техни-

<sup>1</sup> Поперечные сечения зерен в шлифах вообще меньше чем наибольшие действительные сечения их, но это обстоятельство не имеет практического значения. Относительно действительных размеров зерен, в среднем превосходящих кажущиеся размеры в 1,2529 раза, ср. Zelter, стр. 32.

ческого применения подобные скопления зерен, разумеется, столь же неблагоприятны, как и цельные зерна одинаковой с ними величины.

Под относительной величиной зерна разумеют соотношение между размерами отдельных зерен. От этой величины сопротивление породы изнашиванию и выветриванию зависит по меньшей мере в такой же степени, как и от абсолютной величины зерна. И в этом случае на порфиновые включения можно не обращать внимания, поскольку количество последних в породе невелико. Иддингс называет равнозернистыми такие породы, в которых отношения диаметров зерен меньше чем 1,5:1 (отношение поперечных сечений—2,25:1, отношение объемов—3,37:1), а неравнозернистыми породы с отношением диаметров в 2:1 до 3:1 (отношение поперечных сечений соответственно 4:1 до 9:1, а объемов 8:1 до 27:1).

При рыхлых породах (галечник, пески, и т. д.) различают следующие размеры зерен (австрийские нормы):

Угловатое зерно	Окатанное зерно	Размер зерна
Галечник (Schotter)	Окатанный галечник (Rundschotter) 120—25 мм	Исполиновый галечник 55—120 мм
		Грубый галечник 45—55 "
		Средний " 35—45 "
		Мелкий " 25—35 "
Щебень (Splitt)	Окатанный щебень 25—12 мм	Грубый — 18—25 "
		Мелкий — 12—18 "
Дресса (Grus)	Окатанная дресса 12—5 мм	Грубая — 8—12 "
		Мелкая — 5—8 "
Песок	Окатанный песок 5,0—0,2 мм	Крупный песок 2,0—5,0 мм
		Средний — 0,5—2,0 "
		Мелкий — 0,2—0,5 "
Пыль	" " 0,2—0,01 мм	Грубая — 0,086—0,2 "
		Средняя — 0,05—0,08 "
		Тонкая — 0,01—0,05 "

Разделение зерен на отдельные классы (ситовой анализ) при фракциях с крупностью зерна свыше 2 мм производится при помощи дырчатых решет, при более мелких фракциях—проволочными ситами. Анализ пыли, крупность зерна которой ниже 0,2 мм, удачно выполняется путем отмучивания в соответствующих аппаратах. Относительно способа графического изображения результатов механического анализа по Терцаги ср. рис. 12.

Если вместе с крупностью зерна приходится исследовать также и форму его, т. е. оказывается необходимым выделять зерна, наибольшая длина которых значительно превосходит их наименьший поперечный диаметр, то материал прежде всего разделяют по крупности зерна на несколько классов и каждый из них подвергают дальнейшему исследованию при помощи жесткого металлического кольца цилиндрической формы, высота которого равна его поперечному размеру в свету. Кольцо это выбирается с по-

перечными размерами, превосходящими размер контролируемого зерна на 10%. Наибольший диаметр зерна должен быть меньше тройного поперечного сечения кольца; кроме того каждое зерно должно без применения усилия проходить через отверстие кольца в направлении хотя бы одного только из своих измерений. Число зерен, наибольший диаметр которых достигает или превосходит утроенный внутренний поперечник кольца, указывается в процентах. Форма распределенных по величине зерен характеризуется обозначениями — окатанная (rund), угловатая, пластинчатая (plattig) или чешуйчатая.

**Объемный вес и объем пор.** В то время как удельный вес относят к чистой массе горной породы без учета объема, занимаемого ее порами, под объемным весом разумеют вес единицы объема пористой породы. Для получения объемного веса испытуемых тел, в случае правильной формы последних (куба, призмы, цилиндра), их предварительно высушивают при 50° до постоянного веса; из определенного взвешиванием веса  $G$  и найденного путем измерения и вычисления объема  $V$  объемный вес  $r$  получается по формуле:

$$r = \frac{G}{V}.$$

Если приходится иметь дело с испытуемыми телами неправильной формы, объемы которых вычислить нельзя, то объемный вес определяется методом парафинирования Тетмайера.

Проба, размерами около 15 до 20 см<sup>3</sup>, также высушивается, обчищается щеткой и взвешивается ( $Gg$ ); затем нагревается до 54° С и несколько раз погружается в расплавленный парафин. Пузыри воздуха в парафиновой оболочке удаляются при помощи горячей железной проволоки. По охлаждении оболочки пробу снова взвешивают ( $G$ ). Вес парафиновой оболочки  $Gp$  равен ( $G - Gg$ ), объем ее ( $Vp$ ) вычисляют, исходя из удельного веса в 0,93 по формуле:

$$Vp = \frac{Gp}{0,93}.$$

Для определения объема породы + парафин ( $V$ ) применяют волюмометр, состоящий из стеклянного сосуда точно определенной емкости. Во внутренность сосуда вдается в качестве индекса объема игла. Процесс измерения заключается в том, что испытуемую пробу помещают в волюмометр и наливают в него из бюретки (цилиндрический стеклянный сосуд с точной объемной шкалой) воду до тех пор, пока уровень ее коснется иглы. Так как парафиновая оболочка не допускает проникновения воды во внутренность испытуемого тела, то из известного объема волюмометра и отсчитанного по шкале бюретки количества налитой воды можно определить суммарный объем ( $V$ ) пористой породы и парафиновой оболочки. Тогда объемный вес определяется:

$$r = \frac{Gg}{Vg} = \frac{Gg}{V - Vp}.$$

Из объемного веса  $r$  и удельного веса  $S$  горной породы вычисляют коэффициент пористости  $e$  (объем пор в процентах от общего объема)

$$F = \frac{S - r}{S} \cdot 100\%$$

Объем пор (объем пор, отнесенный к 1)

$$N = \frac{S - r}{S}$$

и плотность (объем вещества горной породы, отнесенной к общему объему, принятому за 1)

$$D = \frac{r}{S}$$

В случае песков, щебня, каменного боя (Steinschlag) и других рыхлых масс объемный вес определяется путем наполнения ими сосуда определенной емкости и последующего взвешивания их. Материал следует при этом хорошо перемешивать и утрясать. Объемный вес определяется как для сухого, так и для влажного материала. В последнем случае следует указывать содержание влаги.

Объем пор определяют в том же измерительном сосуде путем осторожного заполнения водой промежутков утрясенного предварительно материала и вычисления прибавочного веса. Чтобы избежать впитывания воды отдельными зернами, с успехом применяют уже насыщенный влагою материал. Неточности, могущей произойти вследствие вспучивания материала, избегают путем применения иных жидкостей, как, например, алкоголя, бензола и т. п.

**Водопоглощение, коэффициент насыщения и водораспределение.** Полученный путем вычисления объем пор еще не дает нам представления относительно способности породы к поглощению воды, так как при этом остаются неизвестными формы пористых промежутков и их связь между собою. Поэтому приходится определять способность породы к водопоглощению экспериментально, для чего сначала находят вес высушенной породы, затем насыщают ее при различных условиях водой до постоянного веса и после удаления свободных капель воды (при помощи сырой губки или суконки) снова взвешивают. Поглощение воды в процентах выражается дробью

$$W = \frac{\text{вес поглощенной воды} \times 100}{\text{сухой вес породы}}$$

Различают четыре способа пропитывания водой и соответственно с этим четыре различных показателя водопоглощения  $W_1$ ,  $W_2$ ,  $W_v$ ,  $W_c$ .

1. Быстрое погружение пробы, пребывание в воде до насыщения. Продолжительность испытания от нескольких часов до нескольких дней дает значение  $W_1$

2. Медленное погружение. Приток воды регулируется таким образом, чтобы проба вполне покрылась водой лишь по прошествии около четырех часов. Большая часть заключенного в порах воздуха имеет возможность выделиться. Пребывание в воде до приобретения постоянного веса. Дает значение  $W_2$ .

3. Пропитывание водой в вакууме при давлении в 20 мм ртутного столба. Содержащийся в порах воздух высасывается почти полностью. Продолжительность испытания при пробах объемом около 30 см<sup>3</sup> примерно три часа. Дает значение  $W_v$ .

4. Пропитывание водой под давлением от 50 до 150 атм. Вода нагнетается в пустоты породы, так что доступные ее воздействию

Таблица XV.

Породы	$W_1$	$W_2$	$W_v$	$W_c$	$S$
Песчаник . .	1,69—7,76	1,92—7,81	2,25—12,58	2,75—12,85	0,497—0,905
Например Обер- кирхен . . . .	5,72	6,35	11,14	11,45	0,555
Известняк . .	0,20—7,51	0,39—7,88	0,50—19,08	0,58—21,19	0,300—0,914
Например Лаас (мрамор) . . . .	0,38	0,74	0,82	0,92	0,804
Рюдерсдорф . . . .	2,81	3,43	4,38	11,43	0,300
Кровельный сланец . . . .	0,51—1,04	0,55—1,10	0,70—1,80	0,70—2,16	0,509—0,931
Например Зимме- рат . . . . .	0,92	0,98	1,18	1,41	0,695
Вулканический туф . . . . .	9,00—22,11	9,20—23,41	11,39—30,25	12,29—33,75	0,694—0,867
Например Брел- таль . . . . .	13,48	13,48	15,00	15,54	0,867
Базальт . . . . .	0,27—1,07	0,27—1,07	0,39—1,17	0,39—1,17	0,647—0,915
Например Зибен- гебирге . . . .	0,27	0,27	0,39	0,39	0,693
Порфир . . . . .	1,24—2,28	1,24—2,90	1,24—3,44	1,40—3,90	0,744—0,886
Например Гелле . . . .	1,43	1,67	1,72	1,95	0,856
Гранит . . . . .	0,28—0,74	0,57—0,91	0,59—1,07	0,69—1,31	0,565—0,855
Например Стрелен. Выветрелый . . . .	0,74 2,65	0,74 2,91	0,98 3,88	1,31 3, 8	0,565 0,750

поры совершенно заполняются водой. Продолжительность опыта 24 часа. Дает значение  $W_c$ .

$$W_1 < W_2 < W_v < W_c.$$

Относительно аппаратуры см. Hirschwald, Handbuch, стр. 112.

Коэффициент насыщения  $S = \frac{W_2}{W_c}$  важен для оценки морозостойкости породы; он показывает, какая в среднем часть доступных воздействию воды пор горной породы заполняется водой при условии медленного пропитывания ее (как это происходит в природе под воздействием осадков).

Согласно сделанному Гиршвальдом сопоставлению, значения для  $W$  и  $S$  изменяются в пределах приведенных в табл. XV.

В слоистых породах или в породах с какими-либо иначе выраженными свойствами слоистости водопоглощение в различных

направлениях бывает иногда различно. Обыкновенно водопоглощение в направлении слоистости больше, чем в нормальном к ней направлении, но бывают и исключения, главным образом в породах с неясно выраженной слоистостью.

Коэффициент водораспределения ( $V$ ) выражается отношением двух значений водопоглощения

$$V = \frac{W >}{W <}$$

Для определения его испытываемые тела в форме призм ( $5 \times 4 \times 4$  см) сначала взвешиваются в сухом состоянии, затем их покрывают смесью из 6 частей канифоли, 3 частей воска и 1 части скипидара таким образом, чтобы две противоположные грани призмы (один раз—пара плоскостей, расположенная параллельно слоистости, и другой раз—пара плоскостей, расположенная в нормальном к ней направлении) оставались свободными; после этого их снова взвешивают и определяют водопоглощение в вакууме и под давлением при условии быстрого и медленного погружения в воду. Тогда, сопоставляя два соответствующих значения водопоглощения, получают четыре коэффициента водораспределения  $V_1, V_2, V_v, V_c$ , из коих  $V_2$  для оценки морозостойкости породы представляет наибольшую важность.

Таблица XVI.

Примеры (по Гиршвальду).

Песчаники, местонахождение		$W_1$	$W_2$	$W_v$	$W_c$	$V_1$	$V_2$	$V_v$	$V_c$
Бентгейм . . . . . (ясная слоистость)	$\frac{I}{II}$	3,03 3,08	3,10 3,12	6,32 6,31	6,47 6,48	1,02	1,01	1,002	1,00
Виншельбург . . . . . (неясная слоистость)	$\frac{I}{II}$	4,47 3,90	4,64 4,46	9,02 8,81	9,11 9,01	1,15	1,04	1,024	1,019

**Испытания окрашиванием.** Для того чтобы сделать видимыми для глаза очертания имеющихся в породе пор, трещин и щелей, образцы породы, размерами приблизительно в  $5 \times 4 \times 3$  до  $7 \times 5 \times 4$  см, высушивают и кладут в легко диффундирующий красящий раствор, в котором их выдерживают примерно в течении 48 часов. Вынув и высушив эти куски, их разбивают зубилом и подвергают исследованию на прокрашивание<sup>1</sup>.

Гиршвальд применяет для этих испытаний 4% -ый раствор нигрозина в чистом алкоголе. Вельтер кроме нигрозина рекомендует также применение водных растворов метиленовой синьки, берлинской лазури и марганцовокислого калия. При темноокрашенных породах, в которых проникновение красящего вещества заметно недостаточно ясно, согласно Шмельцеру, можно рекомендовать

<sup>1</sup> Так как образцы хрупких пород при раскалывании их молотком легко дают мелкие трещины, то рекомендуется для контроля подвергать испытанию также куски, выпиленные камнерезной пилой.

пропитывание породы флюоресцеином и исследование при помощи ультралампы.

Кристаллические породы вообще отлагают красящее вещество только вдоль трещин, щелей и контуров пустот. Слабые выделения краски замечаются также по трещинам и плоскостям соприкосновения отдельных зерен минералов. Разложившиеся минералы (например, полевые шпаты) способны воспринимать большие количества красящего вещества. Пористые породы окрашиваются вдоль контуров пустот; сильно пористые породы прокрашиваются совершенно, причем неоднородность их сложения, обуславливающая различие в их проницаемости, становится различимой с большой ясностью. Порошкообразные составные части, как-то: глинистое вещество, каолин, бурый железняк и т. д., адсорбируют краску в такой степени, что стекающий растворитель полностью обезвечивается. Подобные вещества поэтому особенно интенсивно окрашиваются, и в том случае, если они встречаются в соответствующем количестве и распределены более или менее равномерно, могут предохранять от прокрашивания наиболее глубоко залегающие части образца породы. Сила адсорбирования порошкообразных веществ значительно снижается в том случае, если они пропитаны кремнеземом или известью. Метод окрашивания является таким образом превосходным средством для установления столь важной в практическом отношении степени окремнения или обезвествления глинистых вяжущих веществ у песчаников и т. п.

Установленные Гиршвальдом типы окрашивания можно видеть на стр. 175 его руководства.

**Испытания сопротивлений.** Испытания сопротивлений производятся над пробами, выпибливаемыми из образцов более значительных размеров при помощи камнерезной пилы. Получения проб посредством остроконечного молотка следует избегать, так как при обработке, сопряженной с ударами, в породе легко образуются мелкие волосные трещины, неблагоприятно отзывающиеся на свойствах сопротивления в отношении их величины и равномерности. Особенную заботливость следует уделять точному ориентированию контуров пробы в отношении направления естественной слоеватости, сланцеватости, отдельности, и т. д., от которых в высокой мере зависит равномерность получаемых результатов. Для отдельных рядов испытаний, производимых при различных условиях (ср. свойство сопротивления сухой, влажной и замерзшей пород), имеют значение только кубики, полученные из одного и того же слоя пласта.

Для получения проб рекомендуется брать из каменоломни более крупные образцы, добытые с соблюдением величайшей осторожности, причем на них следует точно отмечать положение плоскостей наслоения. Из этих глыб сначала вырезают большие кубики, которые затем разделяются на собственно пробы. Сравнимыми, строго говоря, являются лишь те пробы, которые берутся из одного и того же слоя, т. е. из одной и той же плиты, полученной при разделении глыбы на части в направлении, параллельном плоскостям наслоения. Если пренебречь мерами предосторожности в отношении ориентирования проб и способа их получения, то следствием этого могут быть расхождения в величинах сопротивлений, пре-

восходящие 100%. Если при строгом соблюдении этих мер тем не менее наблюдаются значительные расхождения, то это с несомненностью указывает на неоднородность структуры, а вместе с тем и на некоторую ненадежность самого материала.

Принимая во внимание неоднородность состава пород, сложенных из разнородных, различной величины и притом неравномерно распределенных и различно ориентированных минеральных зерен, необходимо, чтобы в целях получения общего представления о всех свойствах породы поступающие для исследования пробы обладали известной минимальной величиной. Относительно расчета этой минимальной величины (элементарный кубик) ср. G rengg. „Tschermaks mineral. petr. Mitt.“, Bd. 38, S. 479, 1925<sup>1</sup>. Исследование подобных элементарных кубиков дает „истинное“ сопротивление пород. Если для исследования выбирать пробы больших размеров, то в них часто будет встречаться места, могущие быть причиной ошибок, как, например, трещины, шели и т. п., и влияющие на результат испытания в сторону снижения величины сопротивления (по Гренгу—„техническое“ сопротивление пород). Так, например, если из крепкого мелкозернистого материала, равномерно с промежутками в 10 см разбитого волосными трещинами, изготовить пробные кубики с ребрами длиной от 4 до 6 см, то при испытании давлением получатся данные, которые, не задумываясь, можно положить в основу оценки данной породы в качестве материала для щебня или присадки к бетону.

Если из этой же самой породы изготовить мостовые плиты, то они покажут значительно меньшие величины сопротивления, так как имеющиеся в них трещины при уже низших давлениях приведут к излому материала. Этот пример показывает, как сильно техническое сопротивление зависит от размеров проб и насколько осторожно следует относить экспериментально полученные величины сопротивлений к телам большого размера.

Согласно широко распространенному обыкновению, из результатов ряда однородных испытаний сопротивлений выводится арифметическое среднее, принимаемое за „среднее сопротивление“. Гиршвальд резко восстает против этого метода и стоит за то, чтобы принимать за норму наименьшую из полученных величин сопротивления, так как более значительные расхождения данных указывают не на ошибочность измерений, обуславливающую разницу в показаниях, но на неоднородность свойств и следовательно ненадежность данного материала.

а) *Сопротивление сжатию*. Испытание сопротивления сжатию

---

<sup>1</sup> Величина элементарных кубиков при породах, состоящих из неправильно расположенных зерен (richtunhslos), определяется из элементарных площадок, которые на ровных плоскостях пород легко могут быть выделены также и эмпирическим путем. Для этого применяют шаблоны с квадратными вырезами различной величины (например, 0,25, 1, 2, 4, 9, 16, 25, 36 и т. д. см<sup>2</sup>), которые накладываются на плоскости слоистости породы. Передвигая шаблон, пытаются найти наименьшую площадку, которая в количественном отношении во всяком положении дает одинаковую картину состава породы и следовательно включает в себе элементарную площадку. При породах сланцеватых или имеющих строение, вытянутое в одном направлении (gestreckten), следует определить элемент площадки на двух или трех взаимно-перпендикулярных плоскостях; отсюда получается величина элементарного тела (в данном случае не кубика).

производится при помощи гидравлического пресса над пробями в форме кубиков<sup>1</sup> с ребрами длиною от 4 до 6 см при твердых и 10 см при мягких породах. Давление увеличивают постепенно до тех пор, пока проба развалится на куски. Из силы давления  $P$ , определенной в момент разлома пробы по манометру, и площади поперечного сечения пробы  $f$ , вычисляют сопротивление на раздавливание из выражения

$$K_d = \frac{P}{f} \text{ кг/см}^2.$$

Испытывают всегда несколько проб, причем одна половина их подвергается давлению в направлении параллельном, другая — в направлении нормальном к плоскостям слоистости.

Обе подвергаемые давлению плоскости пробы должны быть параллельны и равны; давлению должно быть распределено равномерно и производиться в направлении, строго нормальном к плоскости, для чего одна из двух давящих пластин испытательной машины снабжается шаровым шарниром. Большое значение на результаты оказывает степень шероховатости давящих пластин или поверхностей пробных кубиков. Шероховатые давящие пластины препятствуют увеличению поперечных сечений пробы в своих размерах и следовательно раздаче ее в стороны, следствием чего являются преувеличенные значения сопротивлений. Влияние шероховатости поверхностей пробы уменьшается при применении проб в форме призмы, и при отношении поперечника последней к высоте ее как 1 : 2,5 это влияние равно нулю (идеальное сопротивление). Идеальное сопротивление, согласно Ринне, может быть определено и в отношении проб кубической формы в том случае, если между давящими пластинами и испытуемой пробой проложить надлежащей толщины слой бумаги. Тем не менее этим способом обыкновенно пренебрегают и довольствуются простым определением сопротивления над пробями в форме кубиков.

Греинг обращает внимание на влияние слишком быстрого увеличения давления при испытаниях, что вообще отражается на результатах в форме получения сильно преувеличенных значений сопротивлений. Как максимально допустимую скорость увеличения нагрузки он считает 10 кг/см<sup>2</sup>/сек. Подобные же условия следовало бы соблюдать и при других испытаниях сопротивления давлению. Согласно австрийским нормам, данные о сопротивлении давлению должны сопровождаться указаниями о скорости увеличения нагрузки.

Относительно указанных Розивалем методов косвенного определения „истинного“ сопротивления, исходя из твердости, изнашиваемости или пористости пород, ср. Verhandl. d. Geol. R.-A., Wien, 1899, S. 214.

в) *Сопротивление растяжению*. Под сопротивлением растяжению понимают максимальную сопротивляемость тела разрывающему усилию. Оно вычисляется по формуле

$$K_z = \frac{P}{f} \text{ кг/см}^2,$$

<sup>1</sup> В САСШ применяют пробы в форме цилиндров.

где  $P$  — разрывающее усилие в килограммах,  $f$  — площадь поперечного сечения пробы в местах разрыва в квадратных сантиметрах.

Для того чтобы иметь возможность предопределить место разрыва, применяют пробу установленной Гиршвальдом формы (рис. 116), которую легко вырезать при помощи алмазной пилы (площадь в месте разрыва  $16 \text{ см}^2$ .)

Закрепление пробы в пальцах разрывной машины достигается или при помощи стальных призм, входящих в пазы  $a$  до  $a_4$ , или же трением путем применения клиньев. В последнем случае пазы могут отсутствовать. Пробы вырезаются так, чтобы плоскость разрыва  $A-B$  была расположена один раз в направлении параллельном плоскости наслоения и другой раз — нормально к ней. Плоскостью разрыва очень удобно пользоваться для определения прочности связи между зернами породы, согласно данным на стр. 308.

с) *Сопrotивление изгибу.* Сопrotивление изгибу определяется на призматических брусках прямоугольного поперечного сечения, которые кладутся на два отстоящих друг от друга на расстоянии  $l$  ребра и разламываются давлением  $P$ , производимым ребром инструмента на брусok в середине расстояния  $l$  между его опорами (рис. 117).

Если обозначить ширину (горизонтальный размер) поперечного сечения через  $b$ , а его высоту через  $h$ , то сопротивление изгибу  $K_b$  вычисляется из формулы

$$K_b = \frac{3Pl}{2bh^2} \text{ кг/см}^2.$$

Испытание на изгиб производится при помощи соответственно приспособленной машины для испытания сопротивления давления. Пробы, согласно Гиршвальду, применяются размерами в  $4 \times 5 \times 28 \text{ см}$ , расстояние между опорами берется в  $23 \text{ см}$ . Согласно австрийским нормам, при величине элементарной площади  $a^2 \leq 4 \text{ см}^2$  применяют стержни размерами в  $4 \times 4 \times 16 \text{ см}$  при расстоянии между опорами в  $12 \text{ см}$ ; если  $a^2 > 4 \text{ см}^2$ , то увеличивают размеры пробы ( $a^2 \times a^2 \times 4a^2$ ) и расстояние между опорами ( $3a^2$ ).

В случае сланцеватых пород или имеющих строение, вытянутое в одном направлении, следует производить испытание сопротивления в каждом направлении отдельно.

д) *Сопrotивление срезыванию или скалыванию.* Под ним разумеют максимальное противодействие тела усилию произвести сдвиг его частей по отношению друг к другу. Строго говоря, сопротивление скалыванию никогда не проявляется отдельно, но всегда сопровождается другими напряжениями, главным образом изгибающими. Соответствующими мероприятиями удается, однако, свести влияние последних до минимума (рис. 118).

Если  $P$  обозначает силу в килограммах, которую нужно прило-

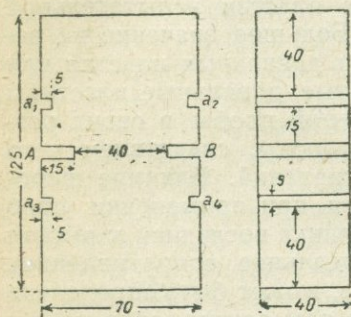
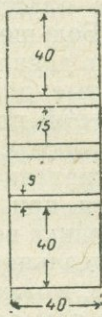


Рис. 116. Проба для испытания сопротивления на разрыв (по Гиршвальду).



жить к телу с поперечным сечением  $f$  см<sup>2</sup>, чтобы его сколоть, то сопротивление скалыванию определится из выражения

$$K_s = \frac{P}{f} \text{ кг/см}^2.$$

В качестве проб применяют узкие пластинки, ширина коих не должна превосходить 5 см, а высота 3 см. Испытание сопротивления скалыванию можно производить над одной и той же пробой несколько раз, передвигая ее в другое положение. Сопротивление определяется в направлениях как параллельном плоскости напластования, так и нормальном к ней.

Толщина режущего ребра должна быть около 2 мм, для того чтобы избежать внедрения его в породу в случае мягких разновидностей последней.

е) *Соотношения между сопротивлениями сжатию, растяжению, изгибу и скалыванию.* Баушингер и Гениш произвели ряд исследований, которые должны были установить соотношения

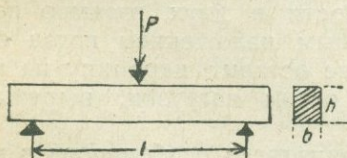


Рис. 117. Схема расположения пробы при испытании на изгиб.

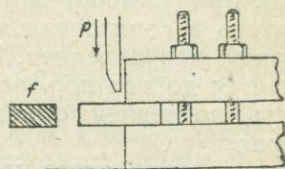


Рис. 118. Аппарат для определения сопротивления на срезывание.

между разного рода сопротивлениями и создать возможность, исходя из величины одного какого-нибудь сопротивления данной породы (например сжатию), определить путем вычисления все остальные показатели ее сопротивлений. Хотя эти исследования и выяснили, что о какой-либо простой пропорциональности между отдельными величинами сопротивлений не может быть и речи, тем не менее ниже приводится таблица, в которой сопоставлены некоторые средние значения сопротивлений, для того чтобы можно было составить приблизительное представление об отношении отдельных видов сопротивлений пород друг к другу.

Таблица XVII<sup>1</sup>.

Породы	$K_z : K_d$	$K_s : K_d$	$K_b : K_d$
Гранит	1 : 35,4	1 : 14,8	1 : 14,4
Порфир	1 : 30,0	1 : 15,6	1 : 9,5
Песчаник	1 : 34,3	1 : 12,9	1 : 10,6
Известняк	1 : 16,9	1 : 12,1	1 : 8,4

<sup>1</sup> Более детальные сопоставления имеются в руководстве Гиршвальда

**Твердость и изнашивание.** а) *Твердость*<sup>1</sup>. Понятие о твердости как о сопротивлении тела проникновению в него острия имеет, собственно говоря, смысл только в отношении однородных веществ (минералов, стекла) и простых горных пород. Говорить о твердости гранита было бы бессмысленно, так как составные части его, кварц, полевой шпат и слюда, оказывают проникновению в них постороннего тела различное сопротивление. Лишь в случае очень тонкозернистых или плотных пород может быть речь о средней твердости породы, зависящей от твердости преобладающей составной части ее или крепости связи между отдельными зернами.

Твердость пород определяется при помощи склерометра, по методу шлифовки Розиваля или по шкале твердости Мооса. Последняя непригодна для получения более точных данных, так как интервалы между отдельными ступенями ее весьма различны.

Главную часть склерометра составляет двуплечий рычаг, на одном конце которого имеются чашка для наложения груза и направленное книзу алмазное острие, а на другом конце передвижной противовес. Под острием помещаются крестовидные салазки (Kreuzschlitten), при помощи которых полированную пластинку можно передвигать в горизонтальной плоскости в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Постепенным наложением груза острие погружается до тех пор, пока оно не оставит царапину на пробе; твердость последней определяется весом нарузки, выраженным в граммах.

Видоизменение этого метода, принятое в особенности в металлографии и заключающееся в том, что за меру твердости принимается ширина проводимой бороздки и глубина проникновения в пробу острия, при хрупких породах вообще неприменимо.

Розиваль для определения средней твердости поверхности породы применяет наждачный порошок, крупностью зерна в 0,2 мм; порошок берется в количестве 100 мг на 1 см<sup>2</sup> шлифованной (но не полированной) пластинки и истирается о нее в течении 8 минут (до прекращения действия); по убыли веса пробы вычисляется затем уменьшение ее объема, приходящееся на 100 мг истраченного шлифовального вещества. Твердость породы обратно пропорциональна сошлифованному объему пробы. Она выражается в тысячных долях твердости корунда, которая с своей стороны соответствует потере при шлифовке объема в 1,55 мм<sup>3</sup>.

Если вместо корунда применяется другое шлифовальное вещество, то предварительно необходимо особым испытанием определить величину истирающего действия его по отношению к корунду.

Согласно Розивалю (Verh. d. Geol. R.-A., Wien, S. 488, 1896), величина твердости различных пород, выраженная в тысячных долях твердости корунда, заключается в пределах следующих значений (составлено Гренгом).

---

<sup>1</sup> Подразделение горных пород на твердые и мягкие основано не на твердости их, но на степени податливости их обработке. Твердыми породами считаются все изверженные породы, многие кристаллические сланцы, затем кварциты и сильно окремненные песчаники, к мягким породам относят известняки, большую часть песчаников, глинистые породы, туфы, филлиты, змеевиксы, мраморы, и т. д.

Наиболее твердые граниты	от 70	до 80	в процентах корунда
Граниты	от 30	» 70	»
Порфиры	34	» 102	»
Порфириты и андезиты	15	» 50	»
Трахиты	20	» 35	» и выше
Базальты	20	» 39	»
Известняки	0,4	» 5,1	»
Песчаники	7,0	» 42	»
Кварциты		107	»
Водоносный песчаник (Wasser sandstein)	7	» 36	»

Путем определения работы, затрачиваемой на сошлифовку объема в  $1 \text{ см}^3$ , Розиваль установил меру абсолютной твердости. Работа трения равна нормальному давлению, умноженному на коэффициент трения и на путь при шлифовке (Verh. d. Geol. R.-A., Wien, S. 133, 1916).

Методы Розиваля не представляют собой чистых методов определения твердости; они являются переходными методами к методам определения изнашивания.

**б) Изнашивание.** Для определения изнашивания проб в форме кубиков применяются следующие методы.

Метод Баушингера. Баушингер определяет количество материала, сошлифованного с пробы в форме кубика, который под известным давлением прижимается к вращающемуся горизонтальному чугунному диску. Трение между породой и гладкой поверхностью шлифовального диска поддерживается путем постоянной подсыпки определенных количеств наждака или стальных опилок (Stahlsand). Изнашивание (потеря в весе или объема, при средней толщине сошлифованного слоя) относят к проходимому пробую при шлифовке пути известной длины, определяющейся из расстояния между пробой и осью вращения (радиус шлифовки  $r$ ) и числа оборотов  $n$ . Для того чтобы достигнуть возможно более равномерного снятия слоя, пробу во время испытания медленно поворачивают в плоскости истирания (Hirschwald, Handbuch, S. 90).

Баушингер производит испытания при следующих условиях:  $n=200$ ,  $r=49 \text{ см}$ ,  $P=44,6 \text{ кг}$ , абразивный материал наждак № 3, 20 г на 22 оборота.

Беме и Гари—при таких условиях:  $n=450$ ,  $r=22 \text{ см}$ ,  $P=30 \text{ кг}$ , абразивный материал тот же.

Австрийские нормы: площадь истирания  $50 \text{ см}^2$ ,  $n=440$ ,  $r=25 \text{ см}$ ,  $P=30 \text{ кг}$ , абразивный материал 20 г наждака № 80 ( $d$  от 0,18 до 0,20 мм) на 22 оборота. Пробный кубик перед каждым испытанием предварительно стачивается на шлифовальном диске и во время испытания после каждых 22 оборотов поворачивается в плоскости истирания на  $90^\circ$ .

При слоистых, но не очень тонкослоистых породах для грани кубика, соответствующей направлению его главной плоскости излома спайности, достаточно пути шлифовки, равного  $10 \times 22$  оборота; затем сошлифовываются две другие грани кубика, находящиеся в положении нормальном к основанию его, каждая при условии прохождения пути шлифовки, равного  $5 \times 22$  оборота. Каждое из трех истираний перечисляется из расчета на  $20 \times 22$  (440) оборота.

Относительно усовершенствованной шлифовальной машины

с горизонтальной осью ср.: Гиршвальд-Брикс, в Bautechnische Gesteinsuntersuchung, III, 2, 1912. В этой машине обращено особое внимание на достижение равномерности трения. Абразивный материал (стальные опилки) подводится здесь равномерно небольшими порциями. В тот момент, когда между вращающимся диском и шлифуемой пробой должен быть введен абразивный материал, тело приподнимают и сейчас же снова опускают, так что стальные опилки попадают под шлифуемый предмет и полностью вступают в действие. Измеряется число оборотов, необходимое для того, чтобы снять слой толщиной в 1 мм. Это число, разделенное на 10, является „показателем твердости“ (Härteziffer).

Песчаноструйный прибор Гари (Sandstrahlgebläse nach Gary). При этом способе при помощи пара или сжатого воздуха упругостью в 3 атм. в течении двух минут с расстояния в 6 см выдувается кварцевый песок (0,775 до 1,35 мм), который бьет в виде струи по поверхности испытуемого тела; последняя покрыта шаблоном с вырезом в форме круга и приводится во вращательное движение при помощи центробежной машины. Изнашивание выражается потерей веса, приходящейся на 1 см<sup>2</sup> обработанной поверхности.

Песчаноструйный способ в противоположность методу шлифовки выявляет разницу в твердостях испытуемых поверхностей самым отчетливым образом, в виду чего этот способ в деле оценки равномерности изнашивания имеет величайшее значение. Если дело касается определения собственно изнашиваемости, то предпочтения заслуживает метод шлифовки, так как по характеру своему он ближе подходит к действительным условиям изнашивания горных пород в обычной жизни под влиянием скользящего трения, и т. д.

**Размягчаемость.** Размягчаемость породы определяется коэффициентом размягчения  $\eta$ , который представляет собой отношение сопротивления сжатию, растяжению, скалыванию, и т. д., насыщенной водою породы к соответствующему сопротивлению той же породы в сухом состоянии. Коэффициент размягчения менее или равен 1, смотря по тому, ухудшаются ли свойства сопротивляемости пород при лежании их в воде или нет. Коэффициенты размягчения больше 1 теоретически невозможны. В случае, если они тем не менее получаются, они, согласно Гиршвальду, указывают на то, что материалы, служившие для определения сопротивления в сухом и влажном состоянии, не были равноценны.

Размягчению подвержены вообще только глинистые породы; породы же кристаллические, невыветрившиеся, в пропитанном водою состоянии утрачивают самое большее 10% своего сопротивления в сухом виде ( $\eta = 0,9$ ). Эта незначительная потеря сопротивления объясняется уменьшением внутреннего трения вследствие водосодержания, влиянием гидростатического давления заключающейся в порах воды, и т. д. Более сильное размягчение при изверженных породах всегда указывает на их выветрившееся состояние.

Определение коэффициента размягчения производится главным образом, исходя из величин сопротивления породы сжатию. Если нет достаточного количества материала для изготовления пробных кубиков, то можно исходить также из величин сопротивления породы растяжению, скалыванию или бурению. Недостатком пробы,

предназначаемой для испытания сопротивления растяжению, является ее сложная и потому сравнительно трудно поддающаяся изготовлению форма. Как показал Шенк, данные испытания сопротивления скальванию, которое может производиться над пробой, имеющей форму простой пластинки, вполне заменяют собой результаты определения сопротивления растяжению. Менее подходящим для этого является испытание сопротивления бурению, так как на результаты его сильное влияние оказывают при твердых породах — притупление бура, а при влажных глинистых породах — скольжение его (Nichtangreifen).

При испытаниях сопротивления бурению бур, прижимаемый книзу определенным грузом, находится в неподвижном состоянии, а столик с лежащей на нем пробной пластинкой вращается. Когда бур внедрится на определенную глубину, мотор автоматически выключается, и по счетчику отмечается число оборотов столика. Отношение между числами оборотов, необходимыми для определенного углубления бура, с одной стороны, в насыщенной влагой, с другой — в сухой породе, дает коэффициент размягчения.

**Морозостойкость.** *Условия, определяющие морозостойкость.* Разрушающее действие мороза обуславливается расширением воды при переходе ее из жидкого в твердое состояние, происходящим с такой силой, что даже самые твердые породы не в состоянии противостоять его действию в течении долгого времени. Различают вообще: мерзлоту в порах (Porenfrost), следствием которой является разрыхление породы и постепенное превращение ее в песок, затем мерзлоту слоев (Schichtenfrost), когда скопившаяся в плоскостях наслоения вода вызывает расслоение (Abblättern) породы, и, наконец мерзлоту трещин (Spaltenfrost), когда тонкие волосные трещины расширяются до заметных на-глаз щелей.

Значительное воздействие мороза на стенки пор в породах бывает возможно лишь в том случае, если эти поры вполне или в большей своей части были заполнены водой. Если поры заполнены водой лишь отчасти, то расширяющийся лед внедряется в оставшуюся еще свободной часть пустого пространства, не производя заметного давления на стенки, как это показали эксперименты с наполненными водой стеклянными сосудами. Так как вода при замерзании увеличивается примерно на одну девятую часть величины первоначально занятого ею объема, то породы, поры которых заполнены водой лишь на девять десятых частей своей емкости (коэффициент насыщения  $S=0,9$ ), могут теоретически считаться морозостойкими вне зависимости от объема их пор.

Однако опыты и наблюдения в природе показали, что действительный предел морозостойкости определяется коэффициентом насыщения в 0,8 или ниже. Причины тому различны. Прежде всего нельзя упускать из виду, что коэффициент насыщения представляет собой некоторую среднюю величину, которая не дает полного представления о распределении воды в породе. А именно, возможен случай, что и при низком коэффициенте насыщения отдельные поры окажутся заполненными водой и подверженными воздействию мороза, в то время как другие поры будут пустыми. Если в этом случае заполненные водой поры окажутся соединенными с пустыми порами только тонкими капиллярами, то образующийся лед не

в состоянии будет свободно проникнуть в пустые поры через узкие каналы и произведет разрывающее действие (Sprengwirkung). В породах с глинистым связывающим цементом (отличающихся сильной размягчаемостью в воде) глинистое вещество жадно адсорбирует воду и следовательно вполне насыщается ею, между тем как иногда более значительная часть породы, имеющая свои поры, остается сухой. Несмотря на это, средний коэффициент насыщения может превысить допустимые пределы, и потому вся порода в целом окажется неустойчивой в отношении действия мороза. При слоистых породах опять-таки опасное состояние насыщения может проявиться вдоль плоскостей наслоения, что при морозе может вызвать явление

расслоения породы.

Коэффициент насыщения  $S$   
0,5 0,6 0,7 0,8 0,9 1,0

*Теоретическое определение морозостойкости.* В большинстве случаев при теоретическом испытании морозостойкости ограничиваются определением водопоглощения породы при различных условиях ( $W_1, W_2, W_3, W_4$ ) и вычислением коэффициента насыщения  $S$ , согласно данным на стр. 312 и 313. Если  $S$  оказывается меньше 0,8, то вообще порода может быть признана морозостойкой. Но можно однако рекомендовать производить также определение соотношения между величинами поглощаемых количеств воды, в которых собственно и выражаются условия пористости породы<sup>1</sup>.

Так, например, если наибольшее водопоглощение проявляется в

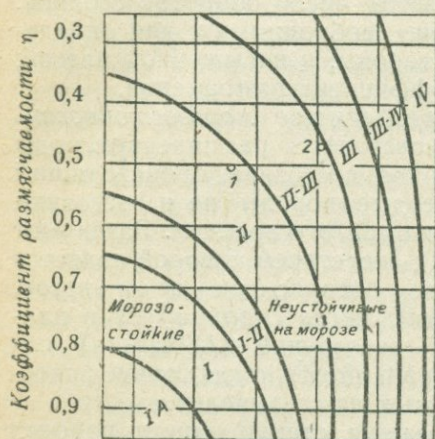


Рис. 119-а.

вакууме или под давлением, то из этого можно заключить о наличии значительных пустот, которые слабо связаны с остальными порами и потому в природных условиях водой не заполняются. Такие полуизолированные пустоты сильно снижают коэффициент насыщения и характеризуют породу как морозостойкую, несмотря на то, что при известных обстоятельствах большая часть пор может оказаться насыщенными водой. Поэтому в таких случаях для коэффициента насыщения можно принимать лишь величину, соответственно уменьшенную.

Если испытываемые породы отличаются явно выраженной слоистостью, то можно рекомендовать определение коэффициента водораспределения  $V$  (стр. 314). При значительной средней величине насыщения коэффициент водораспределения больше 1 представляется сомнительным.

Глинистые породы, песчаники с глинистым цементом, мергели и т. п. должны подвергаться испытанию на их размягчаемость (стр. 322). При однородных плотных породах и кровельных сланцах

<sup>1</sup> Об установленных Г и р ш в альдом типах пористости см. Handbuch, S. 211.

размягчаемость определяется легко путем испытания их на твердость при помощи склерометра. Значительная размягчаемость во всяком случае исключает морозостойкость.

Наконец, породы должны испытываться на волосные трещины (метод окрашивания, стр. 314).

Для песчаников Гиршвальд изобразил графически зависимости между — морозостойкостью, с одной стороны (классы I до IV) коэффициентами  $S$ ,  $V$  и сопротивлением растяжению в размягченном состоянии  $K_z^1$  с другой.

Определенные по главной схеме (рис. 119а) качественные показатели подлежат уточнению на основании данных дополнительных схем А и В (рис. 119 б и с).

*Пример.* Порода № 1 ( $S=0,672$ ,  $\eta = 0,50$ ,  $V=1,23$ ,  $K_z^1=34,36 \text{ кг/см}^2$ ) по главной схеме относится к классу II. На

Коэф. насыщ.  
0,7 0,8 0,9

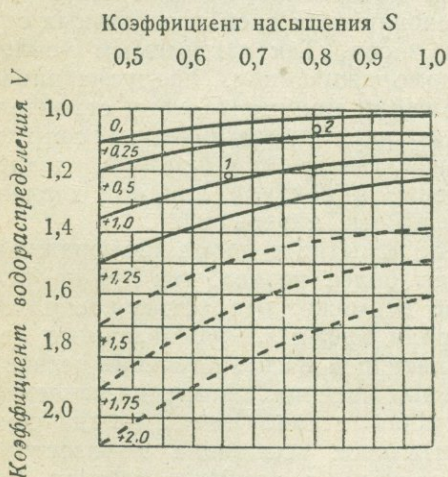


Рис. 119-б. Дополнительная схема А.

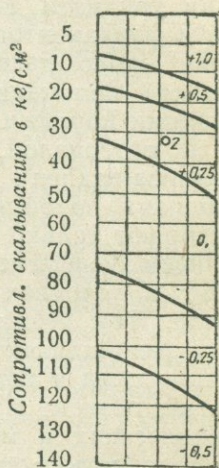


Рис. 119-с. Дополнительная схема В.

основании показания коэффициента водораспределения (дополнительная схема А) качество породы снижается на 0,5 класса, т. е. порода по качеству своему заключается между качественными классами II и III.

Порода № 2 ( $S=0,814$ ,  $\eta=0,47$ ,  $V=1,05$ ,  $K_z^1=31,49 \text{ кг/см}^2$ ) по главной схеме заключается между классами II и III; по дополнительным схемам А (+0,25) и В (+0,25) качество породы снижается на 0,5 класса, следовательно порода относится к классу III.

Кристаллические породы с водопоглощением ниже 0,5% испытанию на морозостойкость не подвергаются.

*Экспериментальное определение морозостойкости.* Оно производится над пробами, имеющими форму кубика, и заключается в том, что эти пробы в пропитанном влагою состоянии 25 раз промораживаются при температуре от  $-20$  до  $-22^\circ\text{C}$  каждый раз в течении 4 часов, в промежутках же между промораживанием их подвергают оттаиванию в течении 2 часов при температуре от  $+10$

до  $+20^{\circ}$ . После каждого промораживания пробы исследуются на образование щелей и трещин, причем в случае отпадения кусочков последние взвешиваются. В конце этого испытания исследуется сопротивление (сжатию, растяжению или скалыванию) влажного еще материала, и выводится коэффициент морозостойкости

$$F = -\frac{K_f}{K_w},$$

где  $K_w$  обозначает сопротивление влажной, а  $K_f$  сопротивление замороженной и снова оттаянной породы.

Пропитывание пробных кубиков водой перед испытанием их промораживанием производится путем выдерживания их под водой для материалов, предназначенных для подводных сооружений или особенно выдающихся архитектурных частей (карнизы, статуи и т. д.), в течении тридцати дней, для материалов, идущих на устройство цоколей и фундаментов — в течении трех дней, в остальных случаях в течении около двенадцати часов. Так называемым усиленным (verschärft) испытаниям промораживанием, предусматриваемым австрийскими нормами в отношении монументальных строительных камней и материалов, идущих на гидротехнические сооружения (Wasserbaumaterialien), и производимым над пробами, полностью пропитанными водой (насыщение в вакууме или под давлением), удовлетворяют только первоклассные материалы.

В общем экспериментальное испытание пород промораживанием протекает в условиях гораздо более резких, чем это происходит в природе. Тем не менее оно не может полностью воспроизвести медленно разрыхляющего породу эффекта, обусловленного переменяемостью тепла и холода, влияющей на нее в течении десятилетий и столетий; поэтому в отношении материалов, предназначенных для гидротехнических и монументальных сооружений, всегда рекомендуется дополнять экспериментальное испытание морозостойкости теоретическим расчетом. Последний в наиболее важных случаях также не следует никогда применять отдельно, но всегда совместно с практическим испытанием породы промораживанием.

**Погодостойкость.** Под погостойкостью горной породы понимается сопротивление выветриванию, т. е. механическому и химическому разрыхлению ее составных частей, поскольку это разрыхление происходит под влиянием деятелей атмосферы (осадков, активных составных частей воздуха, мороза и солнечных лучей), почвенной влаги и деятельности организмов. К выветриванию причисляют кроме того результат влияния содержащихся в воздухе больших городов дымовых газов и пылевых частиц, а также те изменения, которые горные породы претерпевают от соприкосновения с проточными или стоячими водами (гидротехнические сооружения).

Погодостойкость — понятие относительное. Наблюдения, произведенные в природной обстановке, показывают, что все без исключения горные породы в течении геологических периодов подпадают влиянию условий погоды (природное выветривание), и что таким образом абсолютно погостойких пород не существует. Что же касается материалов технического назначения, то по отношению

к ним вопрос о погодостойкости имеет лишь практическое значение, т. е. касается только их сопротивляемости в течении более коротких промежутков времени, отвечающих целям их применения. По отношению к этим срокам также предъявляются разнообразные требования. В то время как для строительных камней, идущих на сооружение частей построек чисто конструктивного характера, считается достаточным, если степень прочности их не падает ниже определенного минимума, для камней, идущих на скульптурные украшения, имеет значение уже незначительная убыль материала, у стальных же облицовок достаточно бывает появления шероховатости на поверхности или незначительного изменения цвета камня, чтобы от этого значительно пострадала красота облицовки. Поэтому при оценке погодостойкости горной породы приходится всегда иметь в виду ее техническое назначение и, принимая во внимание все обстоятельства, имеющие значение в данном случае, относиться к оценке с различной степенью строгости.

*Агенты выветривания.* Выветривание является результатом сложных химических и физических процессов. В качестве деятельных факторов (агентов выветривания) имеют значение:

1. Атмосферный воздух, содержащий  $O$ ,  $CO_2$  и пыль. Кислород действует как окислитель, он превращает минералы, содержащие закись железа, в минералы, содержащие окись железа (перемена цвета, большею частью побурение), разлагает сернистые минералы (колчеданы) с образованием свободной серной кислоты и окисных остатков и медленно сжигает углеродистые вещества (явления выцветания); углекислота способствует растворению, образуя растворимые углекислые соли; пыль отчасти производит механическую шлифовку, отчасти же портит внешний вид породы. Она благоприятствует произрастанию низших растений (водорослей, лишай и т. д.), а также содержит всегда органические вещества, которые, разлагаясь, образуют кислоты, действующие разрушительно на горные породы.

В городах и поблизости от промышленных предприятий воздух содержит значительные количества дымовых газов ( $CO$ ,  $CO_2$ ,  $SO_2$ ,  $SO_3$ , при случае  $HCl$ ) и сажу.  $SO_2$ ,  $SO_3$ ,  $HCl$  действуют на составные части горных пород, образуя растворимые соли серной и соляной кислот. Герсковичи показал, что разлагаемость минералов от действия  $H_2SO_4$  и других кислот пропорциональна содержанию в них  $CaO$ ,  $MgO$ ,  $K_2O$ ,  $Na_2O$ . Этому действию особенно легко подвергаются те окислы, которые, собственно говоря, не являются составною частью минералов и которые поэтому связаны с ними очевидно непрочно (например,  $CaO$  в ортоклазе, нефелине и мусковите). Поразительно большую сопротивляемость по отношению к действию сильно разбавленной серной кислоты обнаруживает известняк. На нем образуется защитный слой трудно растворимого гипса, препятствующий дальнейшему проникновению кислоты внутрь породы.

Сажа портит внешний вид пород тем, что закрывает их естественную окраску. Она также адсорбирует и сгущает в себе содержащиеся в воздухе кислоты, которые таким образом получают возможность проявлять свое вредное влияние более продолжительно и интенсивно, если только не будут смыты проливным дождем.

Газообразные составные части воздуха в сухом состоянии довольно безвредны, влияние их становится опасным лишь тогда, когда к нему присоединяется влияние влажности.

2. Вредные влияния, оказываемые водой, отличаются разнообразным характером. Чисто химический характер влияния сказывается на превращении металлических окислов или же окисных составных частей силикатов в водные окислы, т. е. превращение, совершающееся при расщеплении (диссоциации) воды на электро-положительные  $H$  и электро-отрицательные  $OH$  ионы, большею частью при одновременном содействии также кислорода (образование лимонита). Растворимость в чистой воде важнейших образующих горные породы минералов невелика. Она сильно повышается, если вода содержит кислоты ( $CO_2$ ,  $H_2SO_4$ ,  $HCl$ ), заимствуемые ею из атмосферы. Особенно вредно бывает содержание этих веществ в снеге, так как в этом случае действие их может продолжаться дольше, а испарение и медленное таяние снега способствуют все большему и большему их накоплению. Почвенная влага также богата соединениями ( $CO_2$ ,  $NH_3$ ,  $HNO_3$ , органические кислоты), разрушительно действующими на горные породы; эти соединения образуются отчасти при разложении органических веществ. Морская вода, содержащая солянокислые и сернокислые соли, действует значительно агрессивнее, чем содержащая преимущественно углекислые соли вода рек и озер.

В растворении некоторых составных частей горных пород принимает участие не только проточная вода, но также и та влага, которая содержится в самой породе. Соли, растворенные в этой влаге, при испарении ее переносятся изнутри породы на ее поверхность и выступают здесь в виде налетов.

У обтесанных камней (Werkstücke) выступающие в виде налетов на поверхность указанные соли часто образуют плотную наружную кору, которая, увеличиваясь в объеме, иногда пузыревидно оттопыривается над разрыхленной внутренностью камня. Такого рода выветривание наблюдается у песчаников, трахитов и других пористых горных пород, преимущественно в тех местах, где всего сильнее испаряется влага, т. е. вообще говоря на южной стороне построек, причем у обтесанных камней выветривается лицевая поверхность вблизи нижнего края, а у каменных карнизов — верхняя сторона. Этот случай выветривания тем более опасен, что часто трудно бывает заметить его снаружи. Только после разрушения наружной твердой оболочки рыхлая каменная мука высыпается из образовавшейся пробоины (шелушение, вызываемое выветриванием, Hirschwald).

Размывающая работа воды (проливные дожди, естественные проточные воды) действует только на те горные породы, которые содержат глинистые или рыхлые вещества, нецементированные известью или кремнеземом. Она особенно опасна для обломочных осадочных пород, у которых при вымывании их глинистого цемента нарушается связь между отдельными составными частями. Такие породы при поглощении и отдаче воды довольно значительно изменяются в объеме; повторное набухание и усыхание приводят также к постепенному разрыхлению их.

3. Колебания температуры. О влиянии мороза было уже

сказано на стр. 323. Под действием солнечных лучей горные породы, от неравномерного нагрева отдельных слоев их и неодинакового расширения их составных частей, распадаются на плиты или слои, особенно в тех случаях, когда нагревание сменяется быстрым понижением температуры (проливной дождь, низкая температура ночью). В наших странах горные породы разрушаются этим путем только на участках, особенно сильно освещенных солнцем, в южных же поясах явление это играет весьма важную роль.

4. Организмы. Растительные организмы, поселившиеся на поверхности горной породы, действуют на нее разрушительно вследствие физиологического процесса выделения кислот и разрывающей силы их корней. Они извлекают часть вещества из горной породы и удерживают влагу и пыль. В особых случаях покров, состоящий из лишайев, может предохранить камень от воздействия более агрессивных вредителей.

5. Вещества, образующиеся лишь во время процесса выветривания, иногда оказывают более вредное влияние, чем те деятели, о которых уже была речь. К ним относятся прежде всего образующаяся при окислении колчеданов (пирит) серная кислота и получающиеся при выветривании полевых шпатов углекислые щелочи, значительно разъедающие даже силикаты.

*Внешние формы выветривания в сооружениях.* Выветривание горных пород связано с потерей вещества, которая сказывается в виде появления закруглений на краях строительных камней и различного рода изменений на лицевой поверхности их. Действие мороза и солнечных лучей приводит к образованию трещин, которое сопровождается более или менее внезапным отскакиванием довольно больших кусков камня (грубое крошение или осыпание, отскакивание отдельных пленок, распад на угловатые куски, отслаивание листоватых отдельностей у сланцеватых и тонкослоистых пород). При медленно, но непрерывно идущем нормальном выветривании поверхность камней, соответственно степени их изменяемости, мало-по-малу разъедается, причем особенности их сложения выступают с величайшей отчетливостью. Сохранение выветривающимися камнями гладкой ровной поверхности возможно лишь у очень тонкозернистых пород с равномерной структурой и сложением. Если порода грубозернистая, а также если степень цементации зерен или состав входящих в породу минералов через короткие промежутки изменяются, то поверхность выветривания получается шероховатая и пористая. Неравномерно сложенные породы, в зависимости от распределения в них стойких по отношению к разрушению и менее твердых частиц, образуют волнистые, ребристые, рубчатые, бугристые, жилковатые, плоско-желобчатые формы выветривания. Поверхностному выветриванию, особенно у пористых пород, предшествует внутреннее разрыхление их сложения, служащее подготовкой к началу выветривания на поверхности.

**Условия погодостойкости.** Погодостойкость горной породы (не считая морозостойкости) зависит от химической стойкости ее составных частей и от цементации ее зерен.

Данные о подверженности изменениям отдельных минералов, входящих в состав горных пород, указаны в нижеследующем сопоставлении.

*Графит.* В виде окрашивающего пигмента не вреден, в противоположность углеродистому веществу, которое выцветает и более значительное содержание которого в горных породах делает их гигроскопичными и менее морозостойкими.

*Сульфиды.* Пирит, марказит и другие легко подвергаются выветриванию, причем образуют разрушительно действующую серную кислоту и служат причиной появления безобразных ржавых пятен.

*Окислы.* Кварц, опал, циркон, рутил, красный железняк и бурый железняк, магнетит и другие—все погодостойки.

*Углекислые соединения.* Прежде всего кальцит и доломит. Легко растворимы в воде, богатой содержанием углекислоты, что, однако, в строительных сооружениях в общем роли не играет. Опасно присутствие пирита, находящегося в состоянии выветривания, а также разъедающее действие кислот и воздуха ( $H_2SO_4$ ,  $H_2SO_3$ ,  $HNO_3$  и гумусовые кислоты почвы). Доломит подвергается выветриванию легче кальцита.

*Силикаты:* Полевые шпаты. В совершенно свежем состоянии весьма погодостойки. Трециноватые кристаллы под влиянием солнечных лучей и мороза лопаются.

Нефелин, лейцит. В совершенно свежем виде довольно погодостойки, но легко поддаются воздействию более сильных кислот.

Цеолиты легко выветриваются, одно их присутствие часто уже служит указанием на процесс разложения, совершающийся в породе.

Слюды, попадаясь в значительном количестве, вследствие своей способности расслаиваться, понижают погодостойкость породы. Богатый железом биотит легко выцветает и образует особенно в присутствии пирита, ржавые пятна. Мусковит химическому выветриванию не подвержен.

Хлорит и глауконит довольно погодостойки, при выветривании они выцветают. Змеевик легко разлагается водою, содержащую углекислоту, вследствие чего плиты из змеевика на открытом воздухе скоро приобретают шероховатый и невзрачный вид.

Группа роговой обманки—авгита. В свежем состоянии необыкновенно стойка, даже по отношению к действию серной кислоты, образовавшейся из разложившихся колчеданов. Роговые обманки отличаются от авгитов тем, что менее их подвержены разложению, авгиты же в свою очередь отличаются большею способностью расслаиваться (подверженность влиянию мороза).

Оливин окрашивается на воздухе от образования бурой водной окиси железа. Серная кислота на него сильно действует. Большие кристаллы всегда имеют трещины и на морозе легко раскрашиваются.

Гранат, кордиерит, андалузит, ставролит, турмалин, эпидот—погодостойки.

*Сульфаты.* Гипс и ангидрит в воде сравнительно легко растворимы. Ангидрит превращается в гипс, увеличиваясь при этом в объеме (вспучивание, Treiben).

Все силикаты, входящие в состав горных пород, практи-

чески погодостойки, если только они свежи и не разрушены и если они не предоставлены воздействию более концентрированных растворов кислот. Углекислые минералы и те довольно стойки, пока не войдут в соприкосновение с влажностью, проточной водой или растворами, содержащими  $\text{CO}_2$  или  $\text{HCl}$ . Вкрапления пирита и других сульфидов, наоборот, выветриваются скоро, причем образуется серная кислота, быстро разрушающая главным образом известняки и доломиты.

У кристаллических горных пород связь между зернами настолько прочна, что нарушение этой связи становится возможным лишь после химического разрушения составных частей породы. Воздействие мороза, конечно, и здесь может привести к механическому разрыхлению, но объем пор невыветрившихся и нерассыпающихся кристаллических горных пород настолько мал ( $P \approx 1,5\%$ ), что в этом отношении, вообще говоря, беспокоиться не приходится. Только при кристаллических сланцах, которые, в случае неравномерного распределения влаги и большого содержания слюды, легко распадаются от мороза, приходится прибегать к испытанию породы на морозостойкость. Кроме плоскостей сланцеватости проницаемости воды и других деятелей выветривания, подготовляющих разрушение горной породы, могут способствовать также волосные трещины, даже такие, которые образовались вследствие неумелой обработки камня.

Погодостойкость горных пород с посредственно связанными зернами сильно зависит от свойства цементирующего вещества. Оно не должно ни распадаться от мороза ни размягчаться от воды и кроме того должно обладать соответственной твердостью. Наилучшими качествами в этом отношении отличаются кремнеземистые цементы; известковые цементы менее доброкачественны. Связующая масса, состоящая из землито-пылеватых частиц, из частиц лимонита, глины или мергеля, непостоянна. Качество горных пород, так сцементированных, может улучшиться, если за время существования породы (im Laufe der Cesteinsgeschichte) рыхлый цемент подвергнется пропитыванию проникающим в него известковым или кремнеземистым веществом и таким образом порода закрепится.

Наконец, важным условием погодостойкости горной породы следует считать возможно большую равномерность ее сложения, мелкозернистость и неправильное расположение пор.

**Методы испытания погодостойкости.** Основанием для оценки погодостойкости какой-нибудь горной породы может служить сравнение давно валяющихся в каменоломне глыб этой породы со свежее добытым материалом. На старых постройках, в которых нашла применение данная порода, также можно собрать полезные сведения о ее качествах. Этот метод испытания погодостойкости имеет, конечно, известные недостатки: с одной стороны, климатические и другие условия того пункта, в котором должна найти применение данная порода, очень редко полностью совпадают с условиями, господствующими в той местности, в которой производятся наблюдения, с другой стороны, точное отождествление старого материала со свежим невозможно потому, что, как известно, даже горные породы одной и той же каменоломни в отношении погодостойкости являются часто совершенно различными.

Поэтому перешли к другому методу, согласно которому отвешенная проба испытуемого материала предоставляется влиянию естественного выветривания, причем определяются те изменения, которым материал с течением времени подвергается (убыль веса, потеря твердости, химические изменения) <sup>1</sup>. Как бы ни были интересны и важны в общем такие долгосрочные испытания для изучения процессов выветривания, они однако не удовлетворяют требованиям практики, которая не может заниматься исследованиями, поглощающими много времени и задающимися решением сложных вопросов. Поэтому от опытного определения выветриваемости в естественных условиях отказываются и довольствуются испытаниями, производимыми при условиях, создаваемых искусственно (искусственная или сокращенная проба на погодостойкость), или же чисто теоретическими исследованиями важных для погодостойкости качеств горной породы, влияние которых установлено опытом (теоретическое испытание погодостойкости).

Искусственное или сокращенное испытание на погодостойкость, по Сейппу, распадается на две части: нормальное испытание на морозостойкость (стр. 324 и 325) и испытание на влияние агентов. Второе из этих испытаний состоит в определении опытным путем влияния воды и наиболее деятельных составных частей богатого дымовыми газами воздуха— $O$ ,  $CO_2$  и  $SO_2$ .

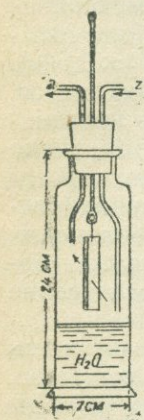


Рис. 120.  
Опытная бутылка (по Сейппу).

Для сокращения продолжительности испытания Сейпп применяет „агенты“ в концентрированном виде. Пробы испытуемого материала имеют форму пластин точно определенных размеров в  $70 \times 30 \times 8,5$  мм (для кровельного сланца  $70 \times 30 \times 5,0$ ) и помещаются в опытные бутылки (рис. 120) с налитыми в них  $295 \text{ см}^3$

воды. Через три отверстия вставленной в бутылку пробки проходят: стеклянная газопроводная трубка, конец которой спускается почти до самой поверхности воды, погруженный стержень, к нижнему концу которого при помощи платиновой проволоки прикрепляется испытуемая пластинка, и короткая газоотводная трубка. При помощи стержня пробная пластинка может быть погружена в налитую на дно бутылки воду. Газы сохраняются в сгущенном виде в стальных бутылках, откуда они через склянку, снабженную предохранительной трубкой, проводятся в первую опытную бутылку, газоотводная трубка которой соединена с газопроводной трубкой следующей бутылки. Число включенных таким способом друг за другом опытных бутылей отвечает числу проб испытуемого материала.

Согласно указаниям Сейппа, объемы применяемых для опыта газов  $CO_2$ ,  $O$  и  $SO_2$  должны быть пропорциональны тем количествам их, которые необходимы для изменения состава всей массы отдельных частей горной породы, доступных этому изменению. Расчет этих количеств газа можно найти в трудах Сейппа.

Так как обработка газами  $CO_2$ ,  $O$ ,  $SO_2$  производится не одно-

<sup>1</sup> Cp. Hirschwald. Handbuch, S. 320.—Seipp. Wetterbeständigkeit, S. 18.

временно, а поочередно, и работу ведут газовым током постоянной скорости, то расчет сроков прохождения этого тока должен быть сделан с соблюдением отношений, отвечающих этим условиям.

В начале опыта пробные пластинки, после непродолжительного подсушивания (во избежание отскакивания частиц вещества), высушиваются при 105 до 125° до постоянного веса, охлаждаются в эксикаторе и взвешиваются. Затем они вешаются в опытные сосуды и на 40 часов погружаются в воду. Подняв их из воды, начинают пропускать газы. Скорость газового тока должна равняться примерно 7 м в час, ее контролируют от времени до времени, считая пузырьки газа, проходящие через воду в чашке, в которую погружена стеклянная трубка, соединенная с последней газоотводной трубкой прибора. Более точного контроля можно достигнуть, проводя газ из последнего опытного сосуда в наполненный водою опрокинутый мерный цилиндр. Сначала пропускают по очереди CO<sub>2</sub> и O, а затем и SO<sub>2</sub>. Каждый раз, когда один газ сменяется другим, а то и во время пропускания одного из газов, пробные пластинки снова погружаются в воду, насыщаются ею и освобождаются от продуктов разрушения. По окончании опыта (после примерно 200-часового пропускания газов) пластинки осторожно кладут в чашки, наполненные водой, для излечения остатков серной кислоты и вновь образовавшихся продуктов, после чего их осторожно высушивают до постоянного веса. Убыль веса пересчитывается для сланцев на 1 м<sup>2</sup> поверхности пластинки, в остальных же случаях выражается в процентах от первоначального сухого веса ее. Убыль веса представляет собою меру, характеризующую выветриваемость данной горной породы.

Одновременно с испытываемыми образцами полезно бывает подвергнуть исследованию также еще три горные породы с хорошо известными свойствами, а именно — одну весьма погодостойкую (например кварцит), одну среднего качества (примерно гранит или сиенит) и одну легко подверженную изменению (мрамор). Принимая убыль веса, выраженную в процентах от первоначального веса, для кварцита за 1, получают для остальных горных пород коэффициент выветриваемости, обозначаемый через  $\varphi$ . Сей п п приводит следующую классификацию:

1. Морозостойкости нет, поэтому нет и погодостойкости; испытание на действие агентов бесцельно. Группа I.

2. При испытании на морозостойкость незначительные изменения. Для наружных архитектурных частей и гидротехнических сооружений непригодны. Для применений иного назначения требуется дальнейшее испытание на действие агентов:

а) Не удовлетворяют испытание агентами. Группа I.

б) Удовлетворяют испытанию агентами. Группа I до группы II.

3. При испытании на морозостойкость изменений нет, в крайнем случае получают совершенно ничтожные изменения на углах и ребрах:

а)  $\varphi$  больше, чем у взятой для сравнения породы среднего качества. Группа II.

б)  $\varphi$  меньше. Группа III.

К группе III Сей п п относит породы, которые хотя и сильно изменяются с поверхности от действия агентов, однако в природ-

ных условиях в общем довольно погодостойки, благодаря своей плотности или образованию защитного слоя (мраморы, серпентины).

Метод Сейппа имеет много недостатков, к числу которых относится то обстоятельство, что, вследствие сильной концентрации агентов, химические превращения протекают частью иначе, чем в природных условиях. Так например, каррарский мрамор при испытании агентами обнаруживает качества совершенно малоценного материала, тогда как в природных условиях он покрывается защитным слоем из гипса и в таком виде сохраняется очень хорошо. Таким образом условия опытного испытания действуют в данном случае менее благоприятно, чем условия природные. Что же касается многократной смены жары и холода, разбухания и усадки, то воспроизведение этих условий опытным путем вообще невозможно.

Теоретическое испытание погодостойкости, по Гиршвальду. Понимая недостаточность испытания погодостойкости опытным путем, Гиршвальд попытался установить соотношение между петрографическими свойствами горной породы и ее погодостойкостью. Для этой цели он изучил состояние сохранности строительного камня у 1059 построек, возрастом от 1 до 1850 лет. Руководствуясь уменьшением твердости и поверхностной выветрелости, принимая во внимание возраст постройки и назначение примененного материала, он установил шесть качественных классов (от I до VI), характеризующихся качественными признаками, обозначаемыми цифрами от 1 до 6. Класс отражает собою влияние отдельных свойств горной породы, качественная же цифра представляет собою сумму показателей этих свойств.

Когда отдельные свойства горной породы, как то: минеральный состав, твердость, структура, изнашиваемость, пористость, водопоглощение, размягчаемость известны, и показатели этих свойств установлены, тогда простым сложением показателей получается качественная цифра, которая определяет собою класс. Показатели свойств, различные для каждой горной породы, Гиршвальд вычислил для нижеследующих групп горных пород<sup>1</sup>: 1) песчаников, 2) серых вакк, 3) известняков, доломитов и мраморов, 4) кровельных сланцев, 5) гранитов, 6) гнейсов, слюдяных сланцев и т. п., 7) роговообманково-авгитовых пород (сиенитов, диоритов, габбро, диабазов), 8) порфиоров, 9) трахитов и андезитов, 10) базальтов, 11) шальштейнов, 12) туфов. Объем этой книги не позволяет конечно привести здесь многочисленные таблицы, картины структуры

---

<sup>1</sup> Показатели свойств вычислялись по так называемому методу исключения (Eliminationsverfahren). Предположим, горная порода обладает свойствами  $A, B, C, D$ , показатели которых  $a, b, c, d$  уже известны; по состоянию сохранности она должно быть отнесена к качественному классу II (качественная цифра 2). Это отвечает уравнению:  $a + b + c + d = 2$ . Положим, что другая, подобная же горная порода обладает теми же свойствами, но имеет кроме того еще одно свойство  $e$  (например, содержит некоторое количество слюды, пирита или т. п.), показатель которого требуется вычислить. Положим, что эта порода относится к качественному классу II до III (качественная цифра 2,5). Ухудшение ее качества должно быть очевидно связано с наличием этого свойства  $e$ . Для вывода качественной цифры можно опять написать уравнение:  $a + b + c + d + e = 2,5$ . Но так как  $a + b + c + d = 2$ , то  $e$  должно быть  $= +0,5$ .

и диаграммы, так что по вопросу о подробностях проведения этого метода испытания приходится ограничиться указанием на описание метода в оригинальной статье, помещенной в „Handbuch der bautechnischen Cesteinsprufung (S. 331).

**Основные данные для оценки погодостойкости горных пород. 1. Глубинные горные породы** (интрузивные породы). Коэффициент размягчения не должен быть менее 0,9, а коэффициент насыщения—более 0,75. Породы, обладающие объемом пор менее 0,5%, можно признать морозостойкими, не прибегая к дальнейшему их испытанию.

а) Горные породы, содержащие слюду (граниты, сиениты и диориты). Мерилом погодостойкости прежде всего служит состояние сохранности полевых шпатов. Последние должны отличаться стеклянным блеском и под микроскопом обнаруживать лишь незначительные следы разложения; хорошо образованные трещины вредны. Полевые шпаты слегка выветрившиеся, но еще твердые и на поверхности которых нельзя или почти нельзя провести царапины ножом, приносят мало вреда, если порода богата кварцем; в этих случаях кварц должен образовывать как бы связанную сеть, в петлях которой помещаются остальные составные части породы. Наоборот, тонкие или несвязанные между собой нити кварца, агрегаты изолированных зерен кварца и полевого шпата даже при очень богатом содержании кварца в породе не могут компенсировать несвежего состояния ее полевых шпатов. В том случае, когда полевой шпат образует собою сплошную массу, в которую погружены остальные составные части породы, на абсолютную свежесть его состояния должно быть обращено особое внимание. Для гидротехнических сооружений пригодны исключительно совершенно невыветрившиеся горные породы. Породы, в которых полевой шпат сравнительно легко царапается ножом, в дело не годятся.

Богатое содержание слюды и присутствие пирита вредно отзываются на качестве породы, тогда как содержание роговой обманки или авгита является желательным. Частицы слюды должны быть распределены равномерно. Зерна пирита и более значительные пачки богатого содержанием железа биотита образуют безобразные ржавые пятна.

В породах, богатых калийным полевым шпатом, присутствие пирита, вообще говоря, приносит меньше вреда чем в породах, богатых плагиоклазами.

Очень вредно влияют раздробленность и измельченность породы, поскольку трещины не заполнены совершенно инфильтрациями кремнезема. Если цементирующим веществом служит кальцит, то порода сохраняет свои плохие качества, особенно если содержит еще и пирит. Такого рода породы должны быть подвергнуты тщательному испытанию на морозостойкость. То же самое следует сказать о породах сланцеватых или покрытых на поверхности мелкими кристаллами (drusig). Породы мелкозернистые и с равновеликими зернами, при прочих равных условиях, более погодостойки, чем породы крупнозернистые и с зернами разной величины. Порфиroidные породы быстро подвергаются выветриванию, если полевошпатовые вкрапления их крупны, многочисленны и трещиноваты.

Если горная порода в естественных обнажениях мало выветрилась, то это служит указанием на хорошую погодостойкость ее, если, наоборот, она от выветривания покрылась довольно толстой корой, то это не может служить безусловным поводом для противоположного заключения. При изучении выветривания строительных камней на старых постройках следует обратить внимание главным образом на уменьшение твердости, округлость ребер и окраску их.

Высказанные здесь положения, касающиеся оценки погодостойкости, по смыслу своему могут быть применены отчасти при исследовании также остальных горных пород.

б) Роговообманково-авгитовые горные породы. Сюда относятся прежде всего сравнительно бедные роговой обманкой сиениты и диориты, тесно примыкающие к горным породам, содержащим слюду. Стоит упомянуть о том обстоятельстве, что значительные количества роговой обманки и авгита вреда не приносят, и что даже некоторая несвежесть этих темноцветных минералов большого значения не имеет, если только полевые шпаты находятся в свежем и неразложившемся состоянии.

У богатых роговою обманкою и авгитом диоритов и габбро офитовый структурный тип выражается в косо (sparrig) друг к другу расположенных лейсточках (Leisten) плагиоклаза, образующих сетку, промежутки которой заполнены темной составной частью породы. Этот тип обладает более благоприятными качествами, чем тип габбро, состоящий из зерен плагиоклаза и роговой обманки (авгита), беспорядочно сросшихся между собою. Еще более благоприятен тот случай, когда роговая обманка и авгит образуют собою основную ткань с редкими включениями полевого шпата. Такого рода породы принадлежат к числу наиболее прочно связанных и погодостойких материалов.

Богатые окисью железа и глиноземом черные авгиты выветриваются легче, чем окрашенные в зеленый цвет. Августоносные породы, превратившиеся в хлоритовые породы, ухудшают погодостойкость породы, тогда как новые образования роговой обманки зернистого, лучистого или волокнистого сложения вреда не приносят. Горные породы, авгит которых превратился в зеленую землю (Grünerde), представляют собою материал совсем плохого качества.

Соскритизированные полевые шпаты не только не приносят вреда, но бывают крепки и погодостойки, если в числе продуктов превращения не образуется значительных количеств кальцита. Щели и трещины между составными частями породы могут быть прочно сцементированы альбитом и эпидотом. Углекислые и хлоритовые массивы, наоборот, погодостойкостью не отличаются, особенно в присутствии колчеданов.

Вполне свежие авгиты и роговые обманки лишь в слабой степени подвержены влиянию серной кислоты, получившейся при разложении пиритов, вследствие чего содержание небольших количеств пирита в сильно основных горных породах, бедных плагиоклазом, вреда не оказывает. Совместное присутствие пирита и оливина, наоборот, вызывает сомнение; оливин, вообще говоря, представляет собою нежелательную составную часть горной породы, так как он

всегда пронизан трещинами, на морозе легко лопаются и, встречаясь в более значительных количествах, может служить источником чувствительных нарушений связности горной породы.

2. *Эффузивные горные породы.* а) Порфириовидные горные породы (кварцевые порфиры, порфиры, порфириты). Погодостойкость этих пород зависит, с одной стороны, от соотношения между количеством и величиной порфировых включений и количеством основной массы породы, с другой стороны — от свойств этой последней. Стекловидные породы хрупки, в общем легко выветриваются и потому малоценны. Основная масса мелкокристаллического сложения необыкновенно тверда и погодостойка, особенно если она очень богата кварцем или вторично пропитана кремнеземом; в этом случае она может даже компенсировать собою некоторую несвежесть включений полевого шпата, если содержание последних не слишком велико. Техническую доброкачественность основной массы можно определить при наружном осмотре по ее эмалевидной, фарфоровидной или роговидной внешности, занозистому излому и значительной твердости, благодаря которой она совершенно не царапается ножом. Пропитанные кремнеземом породы кроме того дают искры при ударе о сталь. При согревании дыханием ни в коем случае не должно ощущаться глинистого запаха.

Полевошпатовые включения в порфире, если они встречаются в большом количестве, должны быть подвергнуты исследованию на свежесть и отсутствие трещин. Темноцветные составные части породы при оценке в большинстве случаев значения не имеют.

К испытанию морозостойкости приходится прибегать только при задетых выветриванием или порфировых разновидностях.

б) Трахитовые горные породы (липариты, трахиты, андезиты). Они отличаются от порфировых пород преимущественно своей более рыхлой основной массой. Если эта масса имеет мелкозернистое, кристаллическое сложение и довольно компактна, то она хорошо противостоит влияниям погоды, особенно когда содержит много кварца. Присутствие же полостей между кристалликами понижает ее морозостойкость. Очень стекловидные, особенно же пористые, подобно пемзе, основные массы нестойки. Флюидальное расположение составных частей породы может привести к отслаиванию листочков (*Abblätierungen*). И для этих горных пород условием величайшей важности является свежее состояние основной массы и вторичное пропитывание ее кремнеземом.

Включения санидина или плагиоклаза выветриваются здесь гораздо легче, чем в порфириовидных породах; включения роговой обманки и авгита в меньшей мере обнаруживают это неприятное свойство.

Для гидротехнических сооружений и кладки фундаментов в сырой почве трахитовые породы, вообще говоря, рекомендовать нельзя. При их употреблении следует во всех случаях самым тщательным образом исследовать их на морозостойкость и определять их размягченность.

Фонолиты, содержащие большие количества нефелина и обладающие плитообразной отдельностью, отличаются незначительной погодостойкостью.

с) Диабазы и мелафиры. Испытание погодостойкости

производится на основании правил, принятых для испытания роговообманковых и авгитовых пород. Кроме того следует обращать внимание на те случаи, когда присутствует легко выветривающаяся стекловидная основа, часто проявляющая себя появлением коричневой, ржавой окраски, характерной для процесса выветривания. Диабазы и мелафиры, которые в природных условиях обнаруживают большую склонность к образованию лимонита или зеленой земли, отличаются столь же малой погодостойкостью как и сильно спрессованные хлоритовые разновидности.

Базальты. Нефелиновые и лейцитовые базальты, хотя и менее погодостойки чем полевошпатовые базальты, однако все же проявляют высокую сопротивляемость изменениям, поскольку нефелин или лейцит в доставленных с каменоломни образцах сохранили полную свежесть. Базальты с зернами средней величины и крупнозернистые (долериты) большей частью мало постоянны.

Большинство базальтов порфировидных.

Включения (авгит, магнетит, титанистый железняк) с мелкозернистым сложением не ухудшают в общем их погодостойкости даже в том случае, если попадают в более значительных количествах, при том условии, чтобы они были свежи и прочно сцементированы свободной от трещин неразложившейся основной массой. Неблагоприятно влияет лишь присутствие оливина, особенно если он встречается в виде более значительного размера желваков и обнаруживает несвежесть с самого начала.

Величайшее значение имеет состояние основной массы; последняя должна быть свежа и тверда и при согревании дыханием не должна издавать глинистого запаха. Поверхность излома должна иметь компактное сложение, должна быть гладка или раковиста, но отнюдь не зазубриста или грубобугриста. Шлакбвые базальты (базальтовые лавы) могут быть погодостойки, если только каменная масса, лежащая в промежутках между пузыревидными полостями, отвечает требованиям, которым должна удовлетворять погодостойкая основная масса.

Обильное содержание авгита улучшает качество основной массы, стекловидные и цеолитовые включения ухудшают ее: авгит придает породе крепость и погодостойкость, стекло делает ее хрупкой и легко поддающейся выветриванию. Так как, однако, не всегда стекловидная масса в одинаковой мере подвержена изменениям, то разлагаемость ее должна быть испытана травлением соляной кислотой, которому подвергают тонкие шлифы или порошкообразные пробы. Основные массы, в которых авгит образует связную сетчатую ткань, содержащую остальные минералы в виде отдельных включений, заслуживают предпочтения по сравнению с теми, твердая основа которых состоит из плагиоклаза или нефелина. Основные массы, состоящие из местами сросшихся минеральных зерен, отличаются невысокими качествами.

Многие базальты, которые в наземных постройках держались хорошо, совершенно не оправдали возлагавшихся на них надежд, когда их применили в гидротехнических сооружениях или в качестве камней для карнизов. Причиной этому была их природная или образовавшаяся под влиянием солнечных лучей трещиноватость. Рекомендуется поэтому базальты, предназначенные для названного

употребления, подвергнуть сначала повторному нагреванию до  $100^{\circ}$ , а затем испытать их на морозостойкость. В подобных случаях коэффициент насыщения породы не должен превосходить 0,6. Для распознавания так называемых „зонненбреннеров“ (Sonnenbrenner) рекомендуются следующие приемы: повторное нагревание от  $+50$  до  $+100^{\circ}$  с последующим исследованием на образование трещин; продолжительное кипячение в дистиллированной воде (в течении нескольких часов и даже дней) в водных растворах углеаммониевой соли, угленатровой соли или уксусной кислоты (от 1 до 2 часов). Скорее всего приводит к цели кипячение в соляной кислоте в течении примерно 10 минут, но средство это, согласно указаниям Гоппа и Келлермана, столь энергично, что оно действует также на породы, не относящиеся к числу „зонненбреннеров“. Гоппе и Келлерман рекомендуют применение углекислоты, проявляющей свое действие и в природных условиях; они дают испытываемому материалу пролежать от 8 до 10 дней в растворах углекислого газа или двууглекислого кальция. На зонненбреннерах, обработанных одним из указанных способов, появляются после высушивания пробы всем известные белые пятна, а при случае образуются также типичные трещины. Рекомендуется подвергать этим испытаниям базальтовые пластинки, так как на подобных объектах могущие получиться изменения проявляются наиболее ясно. При помощи одного лишь микроскопического исследования зонненбреннеры распознать не удается.

d) Туфы. Туфы, несмотря на пористость и незначительную твердость, могут служить прочным строительным материалом, когда они, благодаря морфорологическим особенностям своих пор, противостоят влиянию мороза. Поэтому они прежде всего должны быть испытаны на морозостойкость (испытание на размягчаемость, насыщаемость водою, морозостойкость). Включения лейцита и пемзы вредны. Химическая стойкость стекловидного вещества должна быть испытана растворением в соляной кислоте. Погодостойкость и твердость туфов в значительной мере зависят от степени пропитанности их кремнеземом.

3. *Осадочные горные породы.* а) Песчаники, серные вакки, аркозы, конгломераты и брекчии. При испытании подобных пород следует прежде всего установить, имеются ли в числе зернистых составных частей породы обломки таких пород и минералов, которые, вследствие несвежего состояния или природной подверженности изменениям, легко выветриваются, и присутствие которых могло бы поэтому явиться причиной нарушения связности горной породы (кусочки глинистого сланца, осколки выветрелых на поверхности кристаллических пород или несвежего полевого шпата, куски извести с примесью пирита, углистые включения, и т. д.). Относительное содержание этих составных частей может быть определено по методу Розиваля. Необходимо на всякий случай установить, может ли разрушение этих частей повлечь за собой существенное разрыхление сложения породы или нет.

Затем подвергают исследованию связь между отдельными зернами в отношении связующего материала. Чем ниже, при прочих равных условиях, показатель (Bindungszahl) связности, т. е. число зерен, связанных с каждым отдельным зерном в тонком шлифе

или в изломе (Anbruch), тем теснее и крепче связь зерен между собою, тем лучше погодостойкость породы. Мера (Bindungsmass) связности, выраженная в виде частного:  $\frac{\text{связанная часть периметра зерна}}{\text{общий периметр зерна}}$  должна возможно более приближаться к 1, отвечающей ее максимальному значению.

Состав связующего вещества имеет более важное значение, чем его геометрическое распределение. Наибольшую стойкость проявляют кремнистые цементы (кварц, халцедон, опал). В наиболее благоприятном случае кварцевый цемент обволакивает обломочные (Klastischen) кварцевые зерна, рост которых таким образом как бы продолжается, в результате чего в конце концов образуются кварциты с непосредственно сцементированными зёрнами (рис. 113). Менее благоприятная, хотя еще первоклассного качества, цементация получается в тех случаях, когда цемент связывает зерна, если не обволакивая их, то все же совершенно не оставляя пустот между ними. Если же между зёрнами остаются свободные промежутки в форме пустот, т. е., если мера связности  $< 1$ , то качество связи понижается. Гиршвальд считает, что породы с кремнистым цементом, мера связности которых превышает 0,5, все еще относятся к числу первоклассных по качеству.

Породы с известковым цементом погодостойки, если цемент имеет компактное кристаллическое сложение и пирит отсутствует. От действия дымовых газов на поверхности их образуется защитный слой из гипса, препятствующий дальнейшему проникновению кислот. Порошкообразно-известковые цементы (kalkigpulverige Bindemittel) вымываются и легко разрушаются морозом, так как, вследствие своей пористости, жадно впитывают воду<sup>1</sup>. Глинисто-известковые и глинисто-доломитовые цементы не обладают ни морозостойкостью ни стойкостью по отношению к дымовым газам; они содержат слишком мало извести, необходимой для образования защитного гипсового слоя на их поверхности.

Глинистые, каолиновые, лимонитовые, гематитовые и глауконитовые цементы сами по себе погодостойкостью не отличаются. Стойкость свою они приобретают лишь при вторичном пропитывании кремнеземом, степень которого должна быть проверена испытанием породы на твердость (царапанием цемента стальной иглой) и размягчаемость<sup>2</sup>. Основанием для оценки прочности связи между зёрнами, иначе говоря, размягчаемости породы, служит то сопротивление, которое сухая, а также влажная породы оказывают при разбивании их молотком. Легкость, с которою удаётся обламывать пальцами заостренные ребра сухой или же влажной породы, может, также послужить указанием на степень ее размягчаемости.

Содержание в некремнеземистом цементе более значительных количеств слюды, пирита, землистой извести, доломита, углистого

<sup>1</sup> Известковые цементы узнаются посредством смачивания HCl, порошкообразно-известковые главным образом посредством испытания окрашиванием.

<sup>2</sup> По Гиршвальду, коэффициент размягчаемости для наружных стен не должен быть ниже 0,75, а для фундаментов, отдельных архитектурных частей и гидротехнических сооружений — не ниже 0,90. Коэффициенты насыщения у неяснослоеватых пород не должны превышать 0,8 (или иногда 0,65), а у яснослоеватых — 0,75 (или иногда 0,60).

вещества (главным образом бурого угля) понижает качества этого связующего начала. Вредное влияние этих примесей выступает тем заметнее, чем меньше цемент пропитан кремнеземом.

Приведенные до сих пор данные касались исключительно цемента, как связующего материала; если же образовавшиеся между цементированными песчаными зернами пустоты заполняются разнообразным по составу материалом, то речь идет уже о цементе пор (Porezement) Кремнистые или пропитанные кремнеземом цементы пор могут в значительной мере послужить к улучшению твердости и постоянства породы, тогда как не пропитанные кремнеземом коллоидальные или порошкообразные массы существенному повышению ее твердости не способствуют; особого вреда разрушение или вымывание этих веществ также не приносит. Водопоглощающие цементы пор могут оказаться вредными постольку, поскольку они угрожают понижением морозостойкости породы.

Обломочные породы, состоящие из песчаных зерен или более крупных включений, расположенных изолированно в основной массе цемента (базальтовый цемент), представляют собою всегда материал от среднего до плохого качества, даже в том случае, если цемент значительно пропитан кремнеземом.

Если природная слоистость породы такого характера, что она бывает заметна уже в обтесанном камне, или если при помощи испытаний окрашиванием могут быть обнаружены параллельные слои, обладающие большой водопоглощающей способностью, то погодостойкость породы обыкновенно неудовлетворительного качества. Особенно сомнительны те случаи, когда слоистость бывает вызвана не чередованием зерен различной величины, а прожилками и прослойками глины, слюды, или углистого вещества. Тонкосланцеватые песчаники, серые вакки и конгломераты также мало надежны и поэтому должны быть испытываемы на морозостойкость.

в) Известняки (Kalke), доломиты, мраморы, мергели. Погодостойкость известняков зависит от характера цементации зерен, от содержания вредных примесей и от степени слоистости и трещиноватости их.

Известняки с непосредственно связанными зернами (мраморы и др.) тем более погодостойки, чем они более мелкозернисты и чем менее они пористы. Известняки из тонкого пылевидного (staubfeinen) кальцита (пелитоморфные известняки, по Гиршвальду), легко размягчаются в воде и потому скоро выветриваются.

У известняков с посредственной связью между зернами, зерна кальцита, известковые остатки животных или оолитовые шарики связаны цементом, от свойств которого зависит качество горной породы. При известковом цементе имеют значение величина зерен цемента и полнота связи между ними. Последняя может быть определена под микроскопом или при помощи метода окрашивания. Если цемент по составу различен (глинистый, лимонитовый, битуминозно-углистый, кремнистый), то степень его размягчаемости <sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> По Гиршвальду, коэффициент размягчаемости для наружных стен должен быть больше 0,85, а для гидротехнических сооружений, фундаментов и карнизов — больше 0,93; коэффициенты насыщения у ясно-слоеватых известняков должны быть ниже 0,70 или иногда 0,50.

имеет решающее значение. Последняя может быть определена приблизительно простым разбиванием молотком сухой и пропитанной водой породы. Известняки, содержащие в своем цементе или внутри кальцитовых зерен в виде тончайших включений глину (мергели), легко разрушаются морозом; известняки, пропитанные кремнеземом, наоборот, отличаются повышенной твердостью и стойкостью, в зависимости от степени этого окремнения. Тонкослоистые известняки, а также известняки, содержащие прослойки глины, морозостойкостью не обладают. Нестойки также те известняки, в которых при испытании окрашиванием окрашивающее вещество слообразно проникает в толщу породы.

К числу вредных посторонних примесей должны быть отнесены помимо пирита прежде всего более грубые прослойки глинистого или углистого вещества. Включения из кварцевого песка не вредят погодостойкости породы.

с) Глинистый сланец и кровельный сланец. Глинистые сланцы, вследствие их большой размягчаемости, могут быть применяемы для строительных целей лишь в том случае, если они в сильной степени окремнены. За исключением разновидностей, носящих название кровельных сланцев, они большого значения не имеют.

Кровельные сланцы представляют собою раскалывающиеся на тонкие пластины разновидности глинистых сланцев и филлитов, которые, хотя частью и состоят из малостойкой глины (с кварцем и слюдой), однако, благодаря особенностям своей структуры, противостоят влиянию погоды иногда в течении столетий. Дело в том, что если плоскости наслоения у них покрыты сплошными, не слишком тонкими пленками слюды, то вода не имеет возможности проникать нормально к направлению сланцеватости, вследствие чего не наступает и изменений составных частей породы, легко поддающихся этим изменениям. Плоскость, расположенная на пути вредных влияний, направленных параллельно сланцеватости породы, мала, и значит опасность проникновения воды меньше. Во всяком случае слюдяные пленки, имеющие чечевичеобразное строение, оказывают проникновению воды большее противодействие, чем пленки ровные, сложенные из параллельных слоев (*ebenflächig parallel*); кроме того породы, имеющие чечевичное строение, при начинающемся выветривании лупятся (*abschuppen*) лишь постепенно, тогда как ровно-сланцеватые раскалываются довольно быстро, поэтому чечевичное сложение безусловно заслуживает предпочтения перед чисто-сланцеватым, если только отдельные чечевичи не столь толсты и коротки, что нарушают даже самую сланцеватость породы.

Сложение кровельных сланцов исследуется или в тонких шлифах (поперечный шлиф), или невооруженным глазом. О количестве слюды и равномерности ее распределения судят на-глаз по блеску плоскостей наслоения. Если они совершенно ровны, то это свидетельствует о вероятности параллельного-сланцеватого сложения, если же они сравнительно ровны лишь на большом протяжении (*im grossen Eben*), на небольших же участках у них замечаются многочисленные выпуклые неровности, тогда налицо имеется более благоприятный случай чечевичной структуры.

Степень водопоглощаемости сланца по направлению нормальному

к сланцеватости может быть испытана по Гиршвальду следующим простым способом: поверхность поперечного излома пластинки сланца покрывают кругом слоем асфальтового лака, так что обе поверхности главного излома остаются свободными, пластинку высушивают в эксикаторе и взвешивают, затем кладут ее в воду; после 24-часового пребывания в воде снова взвешивают и по прибыли веса вычисляют количество поглощенной воды  $1 \text{ см}^2$  поверхности. Для первоклассных сланцев эта величина должна лежать в пределах между 0,027 и 0,12  $\text{г/см}^2$ , тогда как у плохого материала она достигает от 0,84 до 1,376 г. Большая водопроницаемость не оказывает вреда только тогда, если сланцы богаты кварцем или вторично пропитаны кремнеземом. Чтобы иметь данные для суждения об этих отношениях, определяют при помощи склерометра твердость породы и ее размягчаемость после 14-дневного пребывания в воде.

Для определения величины водопоглощения в направлении, параллельном сланцеватости, по способу Бруннера поступают следующим образом: из сланца вырезают куски длиной в 16 см и шириною в 6 см и ставят их стоя в стакан, на дно которого налита вода. Стакан покрывают и тщательно оберегают от сотрясений. Через 24 часа наблюдают, насколько вода поднялась в сланце выше уровня ее в стакане.

Так как углистые частички жадно притягивают влагу, то сланцы с большим содержанием этих частиц непостоянны. От имеющих с ними сходную окраску, но погодостойких сланцев, богатых графитом и магнетитом, их отличают при помощи следующих испытаний:

1. Нагревание порошка породы в колбочке: в случае присутствия угля — пригорелый запах.
2. Накаливания порошка породы в тигле до белого каления: в случае отсутствия угля — побледнение темной окраски.
3. Порошок графитового сланца при растирании на белой бумаге оставляет трудно стираемые, с матовым блеском, штрихи.
4. Магнетит может быть извлечен из порошка при помощи магнита.
5. В тонком шлифе углистое вещество отличается неправильно расплывчатыми (облакообразными) очертаниями от резко ограниченных зерен магнетита и блесков графита.

Очень вредной примесью является пирит, особенно если он встречается вместе с глиною и углекислыми солями. Его особенно легко можно узнать при ярком искусственном освещении по его золотистому цвету. О количестве углекислых солей судят по выделению углекислого газа при смачивании порошка породы  $\text{HCl}$ . В отсутствие пирита более значительное содержание извести влияет неблагоприятно лишь в присутствии воздуха, богатого дымовыми газами. При более точных исследованиях имеет значение количественное химическое определение сернистого и углекислого газов.

Морозостойкость кровельных сланцев испытывается или опытным путем, или же о ней судят по степени насыщаемости породы водою. У первоклассных сланцев  $S \leq 0,5$ . Не менее важное значение имеет испытание на „солнцепек“ („Sonnenbrand“). При этом испытании пробную пластинку кладут на 1 час в воду, затем, после

обсушивания, ее помещают на железную пластинку, постепенно и равномерно нагревают ее до  $160^{\circ}$  и полчаса держат при этой температуре. Если после этой обработки образуются трещины и щели, то это дает повод подозревать подверженность породы „солицепеку“; если пластинка лопается уже при  $80^{\circ}$ , то такой материал может быть с уверенностью причислен к разряду малоценных.

Определение погодостойкости опытным путем (стойкости по отношению к действию химических агентов) производится по методу Сейппа, стр. 333) или по методу Фрезениуса. Второй из этих методов касается главным образом стойкости по отношению к действию дымовых газов и заключается в определении тех изменений, которым подвергаются кусочки сланца после четырехнедельного пребывания в замкнутых стеклянных сосудах над концентрированным водным раствором  $\text{SO}_2$ .

Техническая пригодность сланцевого месторождения зависит не только о погодостойкости материала, которая при случае может быть констатирована в самой каменоломне по внешнему виду старых выцветших осколков верхнего слоя породы, но оно зависит также от того, насколько легко сланец поддается обработке. Нужно, чтобы сланец был тонкий и ровнослоист и мог быть добываем в форме пластин требуемых размеров. Включения более крупных зерен (твердых желваков кварца) затрудняют работу раскалывания и строгания, и потому присутствие их является нежелательным.

Качества хорошего правильного сланца должны отвечать еще целому ряду других условий и испытываются следующими способами. При исследовании на сопротивление прогибу из породы вырезаются две полосы в перпендикулярных друг другу направлениях (при ясном направлении слоеватости одна из полос должна быть вырезана параллельно этому направлению), которые и подвергаются испытанию на прогиб. Для испытания сопротивляемости ударам града по способу Романовича берут 2 стальных шарика диаметром в 2 см и заставляют их падать на квадратную пластинку из сланца ( $33 \times 33$  см), лежащую на твердой рамке ( $30 \times 30$  см). Начинают с высоты падения в 1 м, а затем дважды повышают ее, каждый раз на 25 см. Огнестойкость испытывается лучасовым накаливанием пластиночки из сланца толщиной от 0,4 до 1 см на горелке Мекера (Meker-Brenner). Допустимым считается лишь легкое расслаивание сланца; при этом лопаться он не должен (Гренг).

Если сланец должен служить в качестве изолирующего материала в области теплотехники и электротехники, то необходимо произвести испытание его теплопроводности по способу Пенстена (V. D. I. Zeitschr., S. 1653, 1912) и электропроводности.

4. *Кристаллические сланцы.* Что касается испытания кристаллических сланцев, то по поводу исследования их минерального состава следует сказать то же самое, что сказано об изверженных породах.

Особенно важное значение имеет в данном случае изучение сложения породы и, прежде всего соотношения между процессами ее деформации и перекристаллизации (у динамометаморфизованных сланцев), а также морфологии сланцеватости породы.

Кристаллические сланцы тем более погодостойки, чем полнее бывшие следы раздробления их составных частей сглажены последующей перекристаллизацией.

Сланцеватое строение породы представляет собою во всяком случае недостаток ее, который допускает проникновение в породу воды по направлению сланцеватости и который при наступлении морозов влечет за собою ее расслаивание; степень этого повреждения, однако, сильно зависит от характера сланцеватости. Если сланцеватость обуславливается только более или менее продолговатой формой, или параллельным расположением зернистых составных частей породы (кварц, полевой шпат), или их слоевидной отдельностью (*lagenartige Sonderung*), то она довольно безвредна. Если же она вызвана накоплением слюдянистых минералов в параллельном расположении, то, в зависимости от формы ее образования, она может сильно понизить погодостойкость породы. Короткие не связанные между собой чечевицы слюды приносят сравнительно мало вреда, особенно если отдельные слюдяные пластинки внутри чечевиц расположены не строго параллельно по отношению друг к другу. Если же чечевицы слюды соединены в непрерывные пленки, то они влияют на стойкость породы тем более неблагоприятно, чем толще пленки и чем меньше расстояние между ними. Чечевичное расположение слюдяных полос, при прочих равных условиях, влияет на качество породы более благоприятно, чем параллельное. В известных случаях и форма срастания между собой светлоокрашенных составных частей породы может оказывать влияние на ее погодостойкость, так как при скреплении, имеющем вид зазубрин, минеральные агрегаты лучше противостоят разным влияниям и менее легко рассыпаются в песок, чем сложенные в виде мостовой из многоугольных шашек.

В амфиболитах и роговообманковых гнейсах слюду заменяет роговая обманка. Такого рода породы более погодостойки, чем породы слюдяные. Некоторые амфиболиты состоят из беспорядочного войлокообразного сплетения между собой роговообманковых призм; при надлежащей толщине пласта эти породы представляют собою материалы, отличающиеся наивысшей сопротивляемостью.

Некоторые кристаллические сланцы отличаются более или менее массивным сложением (эклогиты, некоторые амфиболиты, гранулиты и т. д.); оценка их производится на основании соображений, подобных положенным в основу оценки изверженных горных пород.

## 2. ОЦЕНКА ПОРОД ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ ЦЕЛЕЙ.

а) Породы для надземных (*Hochbau*) сооружений. Строительные камни для кладки фундаментов в первую очередь испытываются на раздавливание. Так как они должны противостоят действию почвенной влаги, богатой растворенными в ней кислотами и солями, то они должны слабо поддаваться влиянию химических агентов, быть нерастворимыми и, по возможности, слабо пористыми. Более всего пригодны для этого плотные кристаллические силикатовые породы, песчаники и конгломераты с кремнистым цементом. При заложении фундаментов на сухом строительном грунте могут применяться также известняки. Испытание пород касается следующих определений: сопротивления сжатию, размягчаемости, пористости, морозостойкости и сопротивления растворению и воздействию химических агентов.

Породы, предназначенные для облицовки цоколей, не должны быть ни сланцеватыми ни тонкослоистыми, так как иначе они будут впитывать послойно грунтовую воду и тогда при замерзании легко расслаиваться. Испытание морозостойкости (иногда и водораспределения) в этом случае гораздо важнее, чем в случае пород, предназначенных для кладки самого фундамента.

Породы, предназначенные для возведения наружных стен, должны при соответственном сопротивлении на сжатие быть морозо- и погодостойкими, не проводящими тепла и проницаемыми для воздуха. Оба последних свойства требуют наличия в породе некоторой пористости и в то же время обуславливают более легкий объемный вес ее (песчаники, пористые изверженные породы, туфы, кирпичи). Породы, лишенные пор, препятствуют вентиляции и осаждают на себе влагу („потеют“). Чтобы сделать невозможным проникновение почвенной сырости в пористую кладку стен, последние отделяются от фундаментной кладки непроницаемыми изолирующими веществами. Слоистые и сланцеватые породы легко приводятся обработкой в удобный для кладки вид и для достижения связи требуют сравнительно немного известки. Конечно, их приходится укладывать в положении, параллельном плоскости основания, и они должны быть морозостойкими.

Испытания строительных камней, предназначенных для обыкновенных построек, заключаются в определении сопротивления сжатию, морозо- и погодостойкости. Материалы для возведения жилых строений в известных случаях испытываются также на их воздухопроницаемость. Основанием для оценки ее служит степень водопоглощения породы при медленном насыщении ее водой ( $W_2$ ). Определение воздухопроницаемости непосредственным путем можно произвести, измеряя количество воздуха, которое проникает в единицу времени через единицу поверхности сухой изготовленной из породы пластинки известной толщины в условиях определенного избыточного с одной стороны давления. Строительные камни для сооружения памятников должны испытываться на постоянство цвета. Иногда встречается также необходимость производить испытание равномерности изнашивания породы при помощи песчаноструйного прибора:

Породы, предназначенные для устройства карнизов и других омываемых воздухом архитектурных частей, а также для изготовления стоящих под открытым небом статуй, не должны заключать в себе волосных трещин, щелей, плоскостей сланцеватости и наслоения; испытание морозостойкости должно производиться в этих случаях с особой строгостью. В некоторых случаях может представиться необходимость в производстве испытания сопротивления на изгиб.

Материалы, служащие для устройства каменных дверных порогов и каменных полов, должны обладать соответственной величиной сопротивления сжатию и незначительной и равномерной изнашиваемостью, а ступени лестниц кроме того еще и достаточным сопротивлением изгибу и постоянством при изменениях температуры. Если камни закладываются близ главных входов (рампы, передние), то приходится учитывать влияние вносимой с улицы сырости (определение размягчаемости или изнашиваемости во

влажном состоянии). Известняки с значительным или неравномерно распределенным содержанием глины для подобных целей непригодны.

Для испытания породы на сопротивление изменениям температуры изготовленные из нее пробные кубики нагревают в течение двух часов на газовом пламени и затем сразу охлаждают водой. После охлаждения материал подвергают испытанию на уменьшение его сопротивления давлению. Известняки, песчаники с известковым цементом и кварцевые породы для этого совершенно непригодны, грубозернистые граниты менее пригодны; лучше всего удовлетворяют этому испытанию тонкозернистые и равномерно-зернистые силикатовые породы.

Породы, идущие на облицовку стен, должны отличаться красивой окраской, не иметь трещин и хорошо поддаваться полировке. Ноздреватые, сланцеватые и богатые содержанием слюды породы столь же трудно поддаются шлифовке, как и породы глинисто-землистые (туфы, мергели). Разница в твердости отдельных составных частей породы не должна быть значительна, так как иначе получение ровных поверхностей представляется невозможным (песчаники).

Хотя уже одна шлифовка сама по себе повышает погодостойкость породы, так как этим затрудняется воздействие на нее агентов выветривания, приходится все-таки при наружной облицовке стен обращать особое внимание на погодостойкость материала и неизменяемость окраски последнего. Породы, содержащие тронутый выветриванием полевой шпат, оливин или змеевик, быстро шершавеют и теряют свой блеск, породы, окрашенные углистым веществом, легко выцветают. Особенно вредными являются сульфиды (пирит), которые не только выделяют опасную серную кислоту, но и образуют ржавые пятна. Подобные же ржавые пятна производят богатые железом биотиты и неравномерно распределенные в породе карбонаты марганца и железа. Неизменяемость окраски породы, согласно Гренгу, может быть испытана путем направления на нее лучей ультралампы (лампы с ртутными парами) или обработкой ее водными растворами  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{NaOH}$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .

Относительно оценки кровельных материалов ср. стр. 342.

**б) Породы для инженерных сооружений.** Материалы, предназначенные для сооружения мостовых арок, опорных стенок, для облицовки туннелей, и т. д., оцениваются с точек зрения свойств, указанных в отношении пород, применяемых для наземных построек, с учетом особых условий сопротивления и агентов воздействия ( $\text{SO}_2$  в туннелях).

В гидротехнических сооружениях добавочным отягчающим обстоятельством является постоянное соприкосновение породы с водой, что, с одной стороны, приводит к значительному заполнению водою пор и вытекающей отсюда соответственной чувствительности породы к действию мороза, с другой—создает условие, при котором в полной мере может проявиться растворяющее и размывающее действие воды. Задачей исследования горных пород таким образом является в первую очередь определение морозостойкости, размягчаемости и растворимости в слабо кислот-

ной воде или под повышенным давлением (плотины). Породы, легко размягчающиеся (глинистые песчаники, мергели) или при слабом выщелачивании теряющие свою связность (песчаники, цементированные известью), в гидротехническом строительстве вообще не применяются. Так как желательной является возможная водонепроницаемость пород, то и пористые породы также исключаются из обращения. Таким образом оказываются пригодными для применения только абсолютно свежие глубинные породы, плотные изверженные породы, кристаллические сланцы (поскольку они окажутся морозостойкими), песчаники и конгломераты с кремнистым цементом и плотные массивные известняки. Последние, вследствие их растворимости, также не должны были бы применяться при устройстве плотин и в других сооружениях, в которых вода находится под высоким давлением.

Для массивных стен наиболее подходящим материалом, вследствие своего высокого объемного веса, являются основные изверженные породы (габбро, диабазы, мелафиры, базальты, иногда амфиболиты).

При испытаниях сопротивлений ограничиваются определением сопротивления сжатию, а при сланцеватых породах иногда определяют еще и сопротивление скалыванию; имея в виду передвижение валунов и ледоход, представлялось бы желательным определять кроме того и сопротивление изнашиванию.

**с) Породы для дорожного строительства.** Подстилочные камни. Назначение дорожной подстилки заключается в том, чтобы распределять в себе и передавать грунту давление, которое производят колеса на сводчатый дорожный покров, вызывая упругий прогиб последнего. Подстилочные камни таким образом не подвержены ни непосредственному давлению колес и копыт и сопровождающему его изнашиванию ни влиянию атмосферных агентов. Дождевая вода при надлежащем свойстве покровного слоя и почвы (Untergrund) быстро отводится, так что интенсивного насыщения водой самой подстилки не происходит. Поэтому для подстилок можно применять также сланцеватые и менее крепкие породы вроде кристаллических сланцев, между тем как для устройства наружных покровных слоев должны идти только высокосортные материалы.

**Мостовые камни.** Мостовые камни получают путем раскалывания более крупных глыб и укладываются на прочном основании. Смотри по формату камней, различают: крупные мостовые камни (лицевая поверхность от 200 до 400 см<sup>2</sup>, высота от 15 до 18 см), средние мостовые камни (лицевая поверхность—около 150 см<sup>2</sup>, высота—от 11 до 14 см) и мелкие мостовые камни (лицевая поверхность—от 30 до 130 см<sup>2</sup>, высота—от 7 до 13 см). Швы между отдельными камнями должны быть по возможности узкими; их можно заливать каким-либо упругим заполняющим материалом, например, асфальтом и пр.

В месторождениях, предназначенных для добычи мостовых камней, трещины должны быть расположены таким образом, чтобы можно было выламывать желаемого формата камни, не содержащие трещин, без получения слишком большого количества отбросов. Для того чтобы по возможности более совершенно использо-

вать выломанный материал, совместно с добычей мостовых камней различного формата обычно организуют также и добычу щебня (каменный бой). Для того чтобы возможно было без затруднения изготовлять годные для употребления камни различного формата, порода должна легко раскалываться на куски, ограниченные ровными плоскостями.

Уложенный на месте мостовой камень должен быть в состоянии воспринимать давления колес и удары от происходящего на дороге движения, не лопаясь и не раздробляясь с поверхности. Изнашивание его должно быть незначительно и равномерно, и плоскости изнашивания должны оставаться шероховатыми. Края камней не должны округляться, так как иначе со временем образуются „кошачьи головы“, обуславливающие сильную тряску и неприятный шум.

Водопоглощение (пористость) камней из гигиенических целей и в видах морозостойкости должно быть незначительно. Само собой разумеется, что предназначенный для мощения материал не должен ни размягчаться в воде ни поддаваться в течении известного времени действию выветривания.

В качестве материала для изготовления мостовых камней могут применяться только массивные твердые и нетрещиноватые породы (массивные изверженные породы, иногда серые вакки и сильно окремненные песчаники). Сланцеватые, ноздреватые, порфиновые и обломочные (kataklastische) породы должны быть исключены. Большое содержание слюды, разумеется, вредно.

Испытания породы на пригодность ее в качестве мостовых камней всегда следует начинать с микроскопического исследования, которое с успехом может быть дополнено испытанием на окрашивание. При помощи микроскопического исследования распознаются изломы минералов, щели и трещины, менее твердые или несвежие составные части и своеобразные структурные особенности породы. Несвежие породы сразу же исключаются. При одинаковой структуре богатые кварцем и полевым шпатом породы сравнительно хрупки, богатые роговой обманкой и авгитом—вязки. Грубо-зернистые и неравномерно-зернистые породы изнашиваются и выветриваются быстрее, чем мелкозернистые. Очень мелкозернистые, плотные или состоящие лишь из одного минерала породы (базальты, кварциты, известняки) при употреблении становятся гладкими и скользкими, что особенно неприятно при проезжих, идущих в гору, дорогах, почему для мощения их выбирают всегда более грубый материал, чем в случае дорог, проложенных в ровной местности<sup>1</sup>.

Велтер исследовал влияние минералогического состава, а также абсолютной и относительной крупности зерна на качество гранитных мостовых камней. По количественному соотношению между минералогическими составными частями он различает следующие группы:

---

<sup>1</sup> Согласно Шейерману (Städtischer Tiefbau, S. 65, 1924), базальты применимы лишь при дорожных уклонах до 4,5%; при уклонах между 4,5 и 6% рекомендуется применять граниты, при более крутых уклонах—кварцевые порфиры, серые вакки и грубозернистые мелафиры.

Таблица XVIII.

Составная часть	Группа I (высокое содержание)	Группа II (среднее содержание)	Группа III (низкое содержание)
Полевой шпат (F) . . . . .	68—63,31%	63,30—57,36%	57,35—50,10%
Кварц (Q) . . . . .	39,80—34,31%	34,30—28,26%	28,25—21,55%
Темноцветные состав- ные части (Gl) . . . . .	18,79—11,01%	11,00—5,01%	5,00—0,90%
Побочные составные части (A) . . . . .	0,95—0,61%	0,60—0,26%	0,25—0,00%

В отношении крупнозернистости<sup>1</sup> имеется следующее подразделение на группы:

Таблица XIX.

Составная часть	Группа I	Группа II	Группа III
Полевой шпат . . . . .	1,35—0,91 мм	0,90—0,56 мм	0,55—0,25 „
Кварц . . . . .	1,05—0,76 „	0,75—0,51 „	0,50—0,25 „
Темноцветные состав- ные части . . . . .	0,80—0,61 „	0,60—0,41 „	0,40—0,25 „

Равнозернистыми считаются комбинации следующих групп:  $(F_I + Q_I + Gl_I)$ ,  $(F_{II} + Q_{II} + Gl_{II})$ ,  $(F_{III} + Q_{III} + Gl_{III})$ ,  $(F_{III} + Q_{I,II} + Gl_I)$ ,  $(F_{III} + Q_{II,III} + Gl_{II})$ . К неравномерно-зернистым относятся все остальные комбинации.

Соотношения между количественным минералогическим составом пород, абсолютной и относительной крупностью зерна и качеством пород, выявленным путем испытания их на опытных дорогах, явствуют из следующей таблицы (по Велтеру):

Таблица XX.

№	Оценка	Соотношение минералогического состава				Абсолютная крупность зерна			Относительная крупность зерна
		F	Q	Gl	A	F	Q	Gl	
1	Хорошая . . . . .	II	III	II	II	II	II	II	Равная
2	Удовлетворительная	I	III	II	III	III	III	III	„
3	Очень хорошая . . . . .	III	I	III	III	III	III	II	„
4	Удовлетворительная	I	II	II	II	I	I	I	„
5	Мало удовлетворительная . . . . .	I	II	III	—	II	II	III	Неравная

<sup>1</sup> Не принимая во внимание порфировых включений, которые не должны быть в большом количестве.

Технико-механическое испытание заключается в определении пористости (плотность свыше 0,99), сопротивления сжатию, степени водопоглощения<sup>1</sup>, сопротивления удару (вязкость), изнашиваемости, морозо- и погодостойкости. Величина сопротивления сжатию насыщенного водой материала должна быть свыше 1000, а для мелких плит даже свыше 2500 кг/см<sup>2</sup>. Изнашиваемость определяется по методу шлифовки Баушингера: толщина снимаемого шлифовкой слоя при хороших мостовых камнях не должна превосходить 0,2 см на 608 м проходимого при шлифовке пути<sup>2</sup>.

Для определения степени шероховатости (Rauhigkeitsgrades) плоскостей изнашивания, попутно и для контроля степени равномерности изнашивания, применяется метод обработки породы песчаноструйным прибором.

Сопротивляемость изнашиванию ребер, имеющая чрезвычайно важное значение для мостовых камней, испытывается на образцах приблизительно кубической формы путем окатывания их в мельничном барабане, о котором будет речь дальше (стр. 356); количество отхода определяется отсеиванием на 7-миллиметровом решете и выражается в процентах от сухого веса вещества.

Для определения вязкости пород, имеющей огромное значение в отношении сопротивления породы действию выдочков, частью изобретены специальные, частью соответственно видоизменены старые методы испытания.

При испытании вязкости по способу Феппля (Föppl) заставляют гирию весом в 50 кг падать на пробный кубик (размер ребра около 3,5 см), расположенный на несгибающейся стальной пластинке, до тех пор, пока этот кубик разломится. Высота падения (*h*) составляет 1 см на каждые 25 см<sup>3</sup> объема кубика. При втором, третьем, четвертом ударах берут высоту падения вдвое, втрое, вчетверо большую по сравнению с первым разом. Суммарную работу, необходимую для разрушения кубика, вычисляют по формуле

$$A = 50 \cdot (h + 2h + 3h + \dots) \text{ см/кг,}$$

<sup>1</sup> Иногда среди хороших камней встречаются отдельные экземпляры, сильно поглощающие воду, так называемое „водопийцы“ (Wassersöffer). Их узнают по тому, что они после дождя остаются мокрыми в течении более долгого времени, чем остальные камни. Эти „водопийцы“ очень быстро изнашиваются, и потому их необходимо как можно скорее удалять, так как иначе окружающие их хорошие камни начнут округляться в краях и терять свое достоинство. Водопоглощающие граниты представляют собой частью катакластические (kataklastische), частью миаролитовые (miarolitische) разности.

<sup>2</sup> Изнашивание гранитов, согласно Баушингеру, составляет при сопротивлении давлению:

в 2800 до 1827 кг/см <sup>2</sup> . . . . .	от 7,8 до 11,8 г
„ 1770 „ 1530 „ . . . . .	„ 7,4 „ 16,9 „
„ 1520 „ 1300 „ . . . . .	„ 8,2 „ 15,5 „
„ 1290 „ 850 „ . . . . .	„ 8,2 „ 16,9 „

Гиршвальд по величине изнашивания в миллиметрах различает:

Очень твердые породы . . . . .	от 0,90 до 1,1 мм
Твердые породы . . . . .	„ 1,2 „ 1,4 „
Довольно твердые породы . . . . .	„ 1,6 „ 1,8 „
Мягкие породы . . . . .	„ 2,2 „ 2,6 „

где за  $h$  принимают или действительную высоту падения, или (в усовершенствованных испытательных машинах) высоту падения, уменьшенную на величину отскока. Работа удара, разделенная на объем кубика, дает числовую величину вязкости. Согласно Шейерману, эта величина должна превосходить  $600 \text{ см/кг/см}^3$ . Ясно, что при испытании по методу Феппля играет роль не только вязкость, но также и сопротивление давлению. Поэтому в австрийских нормах под вязкостью ( $s$ ) подразумевают частное, получаемое от деления:

$$\frac{\text{числовая величина вязкости}}{\text{сопротивление давлению}}$$

В Англии и Америке, согласно данным Пажа, заставляют молот весом в  $2 \text{ кг}$  падать на цилиндрическую пробную колонку ( $d \text{ } 2,5 \text{ см}$ ,  $h \text{ } 2,5 \text{ см}$ ), начиная с высоты подъема в  $1 \text{ см}$ , причем после каждого удара высота подъема увеличивается на  $1 \text{ см}$  до тех пор, пока проба разломится. Мерию вязкости служит последняя высота подъема перед разломом пробы. Соответственно этому различают очень хорошие камни ( $h \text{ max. } \geq 19 \text{ см}$ ), хорошие камни (от  $16$  до  $18 \text{ см}$ ), довольно хорошие (от  $13$  до  $15 \text{ см}$ ), довольно плохие (от  $8$  до  $12 \text{ см}$ ) и плохие породы ( $h \text{ max. } < 8 \text{ см}$ ).

Гиршвальд и Брикс (Bautechn. Gesteinsuntersuchung, III/2, 1912) перед испытанием на изнашивание (стр. 321) наносят подвергающейся испытанию поверхности пробного кубика ряд ударов зубилом для того, чтобы учесть влияние ударов подков и колес, которые вызывают образование в камнях волосных трещин и тем способствуют изнашиванию. Величиной комбинированного сопротивления пробы удару и изнашиванию является число оборотов шлифовального диска, необходимое для снятия слоя в  $1 \text{ мм}$ , разделенное на  $10$ .

При испытании при помощи мельничного барабана (стр. 356) также приходится иметь дело с комбинированным сопротивлением удару и изнашиванию.

Качества породы лучше всего могут выявиться в том случае, если ее испытывать на пробных участках улицы. Если таким путем подлежат сравнению между собой несколько сортов породы, то отдельные пробные участки должны быть поставлены в одинаковые условия испытания, т. е. они не должны отличаться один от другого своими основаниями, уклонами, затененностью и интенсивностью уличного движения. Так как для испытания пород на пробных улицах требуется продолжительное время, то в Америке и Англии применяют теперь для этого также и специальные опытные дороги, представляющие собой устроенные в форме окружности проезды пути, шириной около  $1 \text{ м}$  и диаметром примерно в  $16 \text{ м}$ , которые выкладываются подлежащими испытанию камнями. По этим дорогам каруселеобразно, подражая уличному движению, катаются нагруженные колеса и производят борозды изнашивания, глубина которых измеряется. Путем применения различных шин, изменения нагрузки и скорости вращения опытных колес, а также подсыпки на дорогу абразивных материалов представляется возможным в короткий срок изучить сопротивляемость материала в условиях, примерно соответствующих действительным.

*Исполинский щебень* (Riesenschotter). Нечто среднее между

мелкой мостовой и мостовой из каменных осколков (Steinschlagdecke), согласно Дейдесгеймеру, представляет собой мостовая из исполинского щебня (Riesenschotterdecke). Наколотые от руки камни, имеющие примерно форму кубиков с ребрами длиной от 10 до 12 см, укладываются в мозаичном порядке на постель из мелких осколков каменной толщиной в 10 см, которая с своей стороны расположена на покрове из каменного боя.

Путем укатки исполинский щебень впрессовывается в постель из мелких осколков; последние выдавливаются в промежутки между отдельными камнями и расклинивают их. После укатки дорога покрывается мелкими осколками, смолится, снова пересыпается теми же осколками и опять укатывается.

Для изготовления исполинского щебня пригодны все твердые породы, разбитые не слишком близко друг к другу расположенными трещинами, даже в том случае, если эти породы неравномерно раскалываются и следовательно не годятся для изготовления мостовых камней. Испытание их производится с точек зрения, установленных в отношении мостовых камней, за исключением требований расщепления пород на правильные отдельности и незначительного изнашивания ребер, на что в данном случае можно и не обращать внимания.

*Дорожный щебень (каменный бой).* В дорогах из каменного боя на подстилку толщиной в 15—30 см накладывается покров из каменного боя толщиной в 15—18 см, который плотно укатывается, пересыпается мелкими осколками или гравием и снова укатывается. Назначение покрова из каменного боя заключается прежде всего в распределении производимого дорожным движением давления и передаче его подстилке; кроме того он должен противостоять разрушению, вызываемому сильным давлением, ударами и истиранием, а также действием атмосферных агентов.

Распределение давления колес на более значительную площадь несущего основания возможно лишь с том случае, если камни покрова из каменного боя связаны между собою, образуя как бы прочный каменный свод. Связность слоя щебня достигается путем укатки; она тем совершеннее, чем равномернее формат и выше вязкость отдельных камней. Наиболее подходящими являются камни, имеющие примерно форму куба с ребрами длиной от 5 до 7 см. Так как каменный бой, полученный механическим путем, отличается менее равномерной формой кусков, чем приготовленный вручную, то последний заслуживает предпочтения перед первым, тем не менее, вследствие меньшей стоимости машинного щебня, он приобретает все большее и большее распространение. Хороший каменный бой при укатке расщепляется лишь в слабой степени, так что отдельные камни могут непосредственно соприкасаться между собой более широкими плоскостями. Материалы менее высокого достоинства при укатке дают много мелких осколков, которые препятствуют соприкосновению крупных кусков и исключают возможность расклинивания последних (рис. 121 а, б, с). Кроме того более крупные куски часто трескаются, что способствует более быстрому расщеплению их под влиянием давления, испытываемого ими при дорожном движении.

Продукты раздробления, образующиеся при укатывании дороги

и нормальном дорожном движении, должны обладать способностью связывать (bindig), т. е. образовывать с водой плотную массу, которая, с одной стороны, прочно связывает между собой отдельные камни щебня, с другой — оказывает достаточное сопротивление присасывающему действию грузовых шин.

Чтобы иметь возможность предопределить отношение данного щебня к действию давления при укатке, Гиршвальд и Брикс сконструировали два аппарата. Более старая конструкция представляет собой поршневый пресс, в который помещают щебень. Давление постепенно усиливается, причем производится попеременно то в осевом, то в эксцентричном направлении, соответственно действию давления при укатке. Если после десятикратной пресовки сжатия щебня больше не происходит, то испытание считается законченным. Объем пустых промежутков в щебне находят, заливая наполненный щебнем сосуд водою; состав зерен пресованного материала определяется ситовым анализом. Чтобы иметь возможность отличить старые плоскости излома от плоскостей излома, образовавшихся во время испытания, куски щебня перед опытом окрашиваются каким-либо растворимым в алкоголе красящим веществом (Bautechn. Gesteinsuntersuchung, III/2, S. 8, 1912). Более новый и более совершенный аппарат представляет собой вальцовый пресс, в главных чертах состоящий из ящика со щебнем, который продвигается под вальцовым сектором, соответствующим образом нагруженным (Bautechn. Gesteinsuntersuchungen, IV, S. 40, 1918).

Материалы, предназначенные для изготовления дорожного щебня, должны быть погодо- и морозостойкими и отличаться значительным объемным весом и малой пористостью. Способность их к водопоглощению должна быть очень мала. Большое значение следует придавать тому, чтобы материал обладал соответствующим сопротивлением ударам и изнашиванию. Слишком большая твердость нежелательна, так как она вызывает сильное изнашивание шин и подков.

Испытанию петрографического состава должно быть уделено особенное внимание.

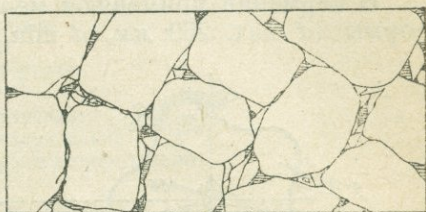
Испытание сопротивления давлению может производиться или над пробными кубиками из соответствующей породы, или (по Руделюфу) непосредственно над самим щебнем. В последнем случае подлежащий испытанию материал помещают в стальной цилиндр, имеющий в свету 12 см в диаметре и высотой в 20 см; его насыщают при утряхивании слоем в 10 см высоты и при помощи поршня, действующего в осевом направлении, подвергают медленному давлению, доводимому до 20 000 кг. Количество получающейся при испытании давлением мелочи определяется отсеиванием. Из числа не менее чем трех испытаний определяется средний вес осколков, проходящих через решето с отверстиями шириной в 7 мм, который в процентах от веса навески и принимается за меру сопротивления щебня давлению. Испытание производится как над сухим материалом, так и над влажным и находившимся ранее в замерзшем состоянии. Рекомендуются ставить параллельные испытания над образцами пород уже известного качества.

Изнашиваемость и вязкость породы, предназначенной для по-

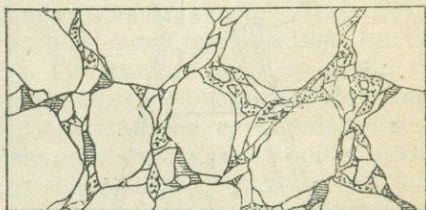
лучения щебня, могут определяться теми же способами, которые применяются и в случае изготовления из нее мостовых камней, поскольку оказывается возможным приготовить из данной породы пробные кубики соответствующих размеров и форм. Этими же способами можно испытывать и готовый щебень, если связать его цементом в бетонный монолит. Но гораздо удобнее представляется способ испытания посредством тряски готового щебня, дающий ясную картину комбинированного сопротивления щебня ударам, давлению и изнашиванию. При этих испытаниях определенное количество щебня известной крупности зерна помещается в барабан, имеющий некруглую форму, и вращается в нем в течении определенного промежутка времени; по окончании испытания определяется степень измельчения зерна. Огромное преимущество испытания посредством тряски заключается в том, что при ней одновременно имитируются все разнообразные механические причины, действующие на щебень в условиях дорожного движения, и кроме того при этом исключается необходимость дорого стоящего и кропотливого изготовления правильных пробных кубиков.

Австрийскими нормами для подобных испытаний предусмотрен трехгранный мельничный барабан (поперечное сечение в форме равностороннего треугольника с округленными углами), в который могут быть вставлены два жестяных решета с отверстиями шириной в 2 мм<sup>1</sup>. Испытуемые куски щебня должны иметь стороны длиной 40—50 мм. Они вводятся в барабан в количестве 2800 г совместно с тремя одинаковой величины закаленными стальными шарами (общим весом 1700 г) и в нем вращаются. После 3240 оборотов (1 час) материал взвешивается, и потеря в весе (отсев из 2-миллиметрового решета) возмещается присадкой свежего щебня. Испытание продолжается до тех пор, пока изнашивание при вращении в течении часа три раза подряд окажется одинаковым. Изнашивание пересчитывается на проценты от веса навески (а).

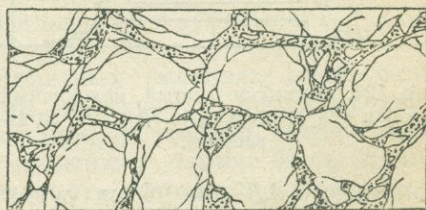
Тот час, когда было получено первое среднее значение изнашивания, отмечается в скобках рядом с численной величиной а



а



б



с

Рис. 121. а — хороший, б — средний и с — плохой каменный бой в смысле укатки (по Гиршвальду и Бриксу).

<sup>1</sup> Эта мельница применима для мокрого помола, который достигается путем подвода воды во внутренность барабана через просверленные выступы его оси.

этого значения<sup>1</sup>. У твердого щебня  $a$  равно от 3 до 12, у щебня средней твердости  $a$  равно от 12,1 до 22, у щебня малой твердости  $a$  равно от 22,1 до 50. Состояние равномерного изнашивания должно наступать по истечении 3—5 часов. Щебни, которые достигают состояния равномерного изнашивания спустя 7 или большее число часов, рассматриваются Гренгом как сомнительные, так как медлительность в достижении этого состояния указывает на неравномерность свойства сопротивляемости щебня, т. е. на происхождение его из обломков пород различной степени твердости.

В Германии применяют мельничные барабаны пятибороздчатой формы ( $d$  max. 250 мм,  $d$  min. 187 мм, длина 600 мм, рис. 122), которые делают 52 оборота в минуту.

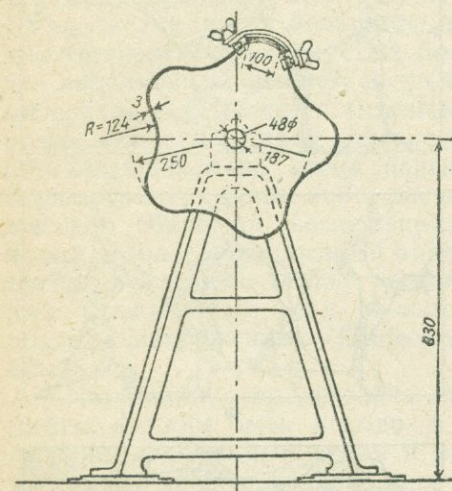


Рис. 122. Пятибороздчатый, мельничный барабан (по Нейманну, Neuzeitze. Straßenbau).

В барабан помещают 5 кг щебня, состоящего из кусков по возможности кубической формы (остающихся на грохоте с отверстиями в 4 см, но проваливающихся через отверстия в 6 см), и крутят их в течении получаса; затем производят отсеивание на решете с отверстиями в 7 мм, и определяется потеря в весе, выражаемая в процентах от сухого веса навески. Результат выводится как среднее из трех согласующихся между собой испытаний.

В Чехо-Словакии для определения изнашиваемости и вязкости применяется испытание ударом по способу Спасека.

В ящик призматической формы

помещают 2,5 или 5 кг сухого щебня, число кусков которого известно. Движением рычага заставляют испытуемые куски падать с высоты 1 м на находящиеся на дне ящика железные зубцы. Затем аппарат переворачивают, содержимое его снова сбрасывают и т. д. После 10-кратного сбрасывания испытуемого материала его вынимают и отсеивают на 20- и 10-миллиметровых решетках; остаток взвешивают и определяют число его кусков. Мелочь, проваливающаяся через 10-миллиметровое решето, удаляется, остатки собирают, помещают снова в аппарат и подвергают 20-кратному сбрасыванию. Затем следует опять просеивание, взвешивание, определение числа кусков и 30-кратное сбрасывание. После дальнейших 40 и 50 сбрасываний, следовательно

<sup>1</sup> Сомнительный в отношении морозостойкости материал перед испытанием его сопротивления изнашиванию подвергается промораживанию. Изнашиваемость песков может испытываться подобным же способом, как и изнашивание щебня. Вставленные решета в этом же случае заменяются жестяными листами без отверстий, и материал мелется совместно с фарфоровыми шарами. Австрийские нормы предусматривают: 2800 г испытуемого материала, 11 одинаковой величины шаров из твердого фарфора общим весом 400 г, 3240 оборотов мельницы в час, помол в течении 5 часов, через каждый час отсеивание и взвешивание пыли крупностью  $d < 0,2$  мм.

в общем 150 сбрасываний, определяется вес оставшихся кусков с  $d > 10$  мм („сокращенный вес“). Разница между начальным и сокращенным весом дает вес мелочи с  $d < 10$  мм. Этот вес, разделенный на 5, составляет коэффициент сокращения  $\delta$  (Abschlagziffer), соответствующий следовательно работе удара в 75 или 150 кг/м. Подсчет кусков щебня и определение их размеров отсеиванием дают возможность контролировать равномерность изнашивания материала.

Спасек устанавливает следующую оценочную таблицу:

$\delta$ = от	0	до	16	—	превосходно
„	16	„	24	—	отлично
„	24	„	32	—	очень хорошо
„	32	„	40	—	хорошо
„	40	„	48	—	посредственно
„	48	„	56	—	удовлетворительно
„	56	„	64	—	менее удовлетворительно
					свыше 64 — плохо

Пыль, получающаяся при испытании тряскою, может быть применена для определения свойства щебня связываться. Пыль замешивается с водой в густую кашу, и из нее при помощи пресса формируются цилиндрические брикеты. По высушении эти цилиндры дробятся ударами молотка в специально сконструированной для этого ударной машине (ср. Neumann. Neuzzeitlicher Strassenbau, S. 302). Число необходимых для их раздробления ударов определяет силу цементации материала. Вяжущая пыль, наряду с достоинством, заключающимся в ее способности к цементации, имеет тот недостаток, что в смоченном виде она образует вязкую клейкую грязь, которая прилипает к колесам экипажей и вызывает „сматывание“ („Aufwickeln“) дорожного покрова.

В качестве мер борьбы с неприятным явлением образования уличной пыли в последнее время применяют пропитывающие вещества — смолу и асфальт. Последние не только препятствуют образованию пыли, но также и связывают камни. Если применяется асфальт, то камни должны иметь угловатую форму и не быть загрязненными глинистыми примесями. Прочность сцепления асфальта с камнями должна быть достаточно велика. Она зависит от формы, пористости и шероховатости зерен. Для того чтобы достигнуть возможно более плотного сложения покрова при незначительном расходе смолы, зерна должны быть распределены по своей величине таким образом, чтобы мелкие осколки и песок совершенно заполняли промежутки между более крупными камнями. Само собой разумеется, что зерна при соприкосновении с горячим цементирующим веществом не должны получать повреждения. Глубина проникновения пропитывающих веществ, применяемых в дорожном строительстве, испытывается, по Шмельцеру, при помощи ультралампы, т. е. лампы с ртутными парами, в которой через особый светофильтр пропускаются только одни ультрафиолетовые лучи. Растворы растворимого стекла для того, чтобы стать заметными, предварительно окрашиваются флюоресцином.

1. Первоклассный материал для щебня дают рогообманково-авгитовые породы (бедные оливином базальты, неизмененные

диабаз, диорит, габбро, мелафир, эклогит), затем порфиры, порфириты и кремнистые сланцы.

2. Хорошие материалы: свежие мелкозернистые граниты и сиениты, массивные и бедные слюдой кристаллические сланцы, как то: амфиболиты, гнейсы, гранулиты, затем серые вакки и кварциты.

3. Материалы среднего достоинства: раздавленные или сланцеватые видоизменения материалов, перечисленных в пп. 1 и 2, окремненные песчаники, массивные известняки<sup>1</sup>.

4. Непригодные материалы: все выветрившиеся, мягкие и размягчающиеся породы.

*Щебень для железнодорожного балласта.* Оценка материалов, предназначенных для железнодорожного балласта, производится способом, схожим с тем, который применяется для оценки дорожного щебня. Материал для балласта должен быть достаточно прочен и погодноустойчив и, благодаря своей вязкости, оказывать необходимое сопротивление толчкам, вызываемым движением и ударами инструментов, применяемых при балластировке пути. Слой балласта должен быть достаточно порист для того, чтобы атмосферные осадки могли быстро удаляться с пути. Сопротивление изнашиванию в данном случае не имеет большого значения; поэтому здесь могут применяться также и крупнозернистые граниты, серые вакки, известняки и другие материалы средней твердости. Кварциты имеют то преимущество, что вследствие малого содержания в них питательных начал они препятствуют произрастанию растений, которые вредны тем, что удерживают влагу; известняки замедляют ржавление железных частей. Вместо щебня, полученного дроблением, можно применять также речной гравий; последний, однако, должен быть свободен от глинистых примесей, которые удерживают воду и способствуют преждевременному загниванию шпал.

*Бетонный щебень в дорожном строительстве.* Применяемый в дорожном строительстве бетонный щебень в общем оценивается на основании тех же соображений, которыми руководствуются и при оценке присадочных бетонных материалов (Betonzuschlagstoffe) для инженерных и наземных сооружений; но тут должно быть обращено соответствующее внимание на влияние толчков, вызываемых дорожным движением, и изнашивание материала. Сопротивление материала толчкам и изнашиванию испытывается или на несвязанном щебне в мельничном барабане, или на бетонных кубиках по методу Баушингера, причем эти кубики конечно должны быть совершенно одинакового состава и изготовления для того, чтобы результаты, получаемые при нескольких испытаниях,

<sup>1</sup> Их неприятное свойство пылеобразования при условии умеренного дорожного движения может быть значительно понижено путем пропитывания их растворимым стеклом (богатые SiO<sub>2</sub> специальные препараты, например „Strassil“ Акц. об-ва химических продуктов, Wien, VII, Lindengasse). Оно выделяет кремнезем, который с известняком дает силикат кальция, придавая известняку большую твердость, цементирует щебневый покров, заполняет поры и тем делает дорогу водонепроницаемой и менее изнашивающейся. Для возможности применения этого способа известковый щебень должен на две трети состоять из непромытого, но свободного от глины известкового песка, состоящего из зерен крупностью от 0 до 2 см. Если растворимым стеклом пропитывается щебень из силикатовых пород, то он должен быть предварительно смешан на одну треть с пористым известковым песком.

были сравнимы между собой. Испытание на опытных дорогах в данном случае особенно удобно.

**д) Присадочные бетонные материалы.** Естественные или искусственно приготовленные обломки горных пород (песок, гравий, щебень, мелочь от дробления, каменный бой), которые в смеси с цементом и водою образуют бетон, с одной стороны, должны отвечать требованиям, предъявляемым к их прочности, с другой — удовлетворять известным условиям в отношении своей геометрической формы.

Петрографический состав отдельных зерен влияет на прочность бетона и потому должен был бы всегда подвергаться исследованию. Дело в том, что с одной стороны имеет значение твердость отдельных разновидностей пород, с другой — способность их химического взаимодействия с затвердевающим цементом. Тем не менее на практике обычно пренебрегают петрографическим исследованием и определяют только сопротивление бетонных кубиков, изготовленных из данного материала. В известных случаях следует подвергать исследованию также и изнашиваемость (мостовая подстилка в условиях усиленного дорожного движения, бетонные дорожные покрытия); исследованию можно подвергать или несвязанный материал при помощи одного из описанных на стр. 356 мельничных барабанов, или, еще лучше, пробные кубики из бетона по методу шлифовки Бауши и Герра. В отношении сопротивления давлению пригодны все более или менее здоровые кристаллические и плотно сложенные осадочные породы. Само собой разумеется, что породы, содержащие от природы или в виде загрязнения пирит (колчедан), гипс, гумусовые вещества, кусочки угля, масла (Öle), золу и другие вредные для бетона примеси, не должны быть применяемы. Равным образом следует избегать применения сильно пористых пород, так как они жадно отнимают от свежего бетона воду и тем препятствуют его затвердеванию. Если применения их избежать нельзя, то перед замешиванием бетона следует их хорошо пропитать водою.

Породы, размягчающиеся в воде (глинистые или сильно выветрившиеся), столь же непригодны, как и сильно загрязненные илом или глиной или богатые слюдою песок, гравий и щебень. Количество такого рода загрязнений можно легко определить приблизительно, если материал взболтать с водою, дать ему отстояться и наблюдать затем висящую в воде муть. Если влияние глинистых загрязнений желают определить непосредственно на бетонных пробах, то исследуемый материал перед замешиванием бетона не нужно высушивать, так как глина в сухом состоянии менее вредна, чем во влажном.

Иногда бывает желательно добавлять к бетону молотый гидравлический трасс; последний делает бетон упругим и увеличивает срок его схватывания, что особенно важно в тех случаях, когда бетон во время схватывания подвергается сотрясениям и в нем образуются тонкие трещины, которые в данном случае в стадии вторичного схватывания (Nachabbindung) еще могут зажить. Присадка трасса не должна производиться за счет количества цемента во избежание потери бетоном некоторой части его сопротивляемости.

Что касается влияния естественных присадочных материалов на огнеупорные свойства бетона, то следует заметить, что кварцевые

и богатые кварцем породы в огне легко трескаются и следовательно непостоянны. Хорошие свойства в этом отношении проявили, согласно произведенным в Америке опытам (Proceedings of the Concrete Institute, 21, p. 284, 1925, по Грюну), базальты и трахиты. Поскольку, согласно тому же источнику, совершенно особые свойства сопротивления были проявлены при этом известняками, следует заключить, что нагрев бетона во время испытания явно не был настолько значителен, чтобы могло произойти химическое разложение карбонатов.

В отношении геометрических форм присадочных материалов к последним предъявляется требование, чтобы зерна различной крупности были распределены в них в таком соотношении, при котором поры между зернами определенной величины в точности

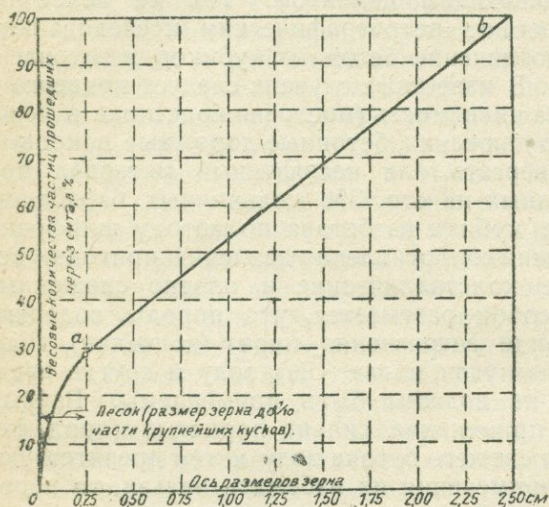


Рис. 123. Идеальная смесь песка и гравия (по Фуллеру).

заполняются зерном следующего за ними по мелкости разряда, т. е., когда суммарный объем пор является минимальным. Цемент в качестве пылеобразного веществ должен заполнять промежутки между мельчайшими зернами и таким образом скреплять рыхлый скелет присадочных материалов в единое плотное тело. Но так как количество цемента в точности фиксировано заранее установленной пропорцией между составными частями бетона, то плотность, а с нею и крепость его в готовом виде зависят от отсутствия промежутков в упомянутом скелете.

При исследовании вопроса о том, в каком соотношении должны быть смешаны между собой зерна разных размеров определенной формы, чтобы образовать по возможности беспористый агрегат, на самые крупные зерна (щебень, каменный бой) можно, очевидно, не обращать внимания, так как речь идет лишь о плотности самого сравнительно мелкозернистого вяжущего вещества, скрепляющего крупные камни. Верхний предел крупности зерна, до которого должно простираться это исследование, устанавливается различными исследователями различно. Фуллер принимает его в 25 мм, Граф в 7 мм.

Идеальный, т. е. желательный, состав мелкого присадочного материала изображается названными авторами в форме диаграмм (рис. 123 и 124).

Если нужно произвести испытание данного месторождения песка и гравия или партии мелочи от дробления на пригодность (геометрическую) их в качестве присадки к бетону, то прежде всего берут

несколько средних проб, около 5 кг каждая, и подвергают их ситовому анализу. С этой целью соединяют несколько решет в одну общую оправу таким образом, чтобы решето с наиболее крупными отверстиями находилось наверху, а с наименьшими отверстиями внизу, и всю систему подвешивают к балке. Точно отвешенная качательными движениями последней разлагается на последовательные фракции. Согласно Графу, для анализа применяют сита: с 900 отверстиями на 1 см<sup>2</sup>, затем с отверстиями в 1 мм, 3 мм и 7 мм; при этом получают фракции зерен I (от 0 до 0,24 мм), II (от 0,24 до 1,0 мм), III (от 1,0 до 3,0 мм), IV (от 3,0 до 7,0 мм) и V (крупнее 7 мм); по исключении фракции крупнее 7 мм, количественное содержание остальных фракций ( $P_1, P_2, P_3, P_4$ %) исчисляется в весовом процентном отношении. Результаты ситового анализа изображаются на диаграмме Графа (или Фуллера), для чего у абсциссы 0,24 наносят ординату  $P_1$ , у абсциссы 1,0 — ординату ( $P_1 + P_2$ ), и т. д. Если сравнить полученную таким образом кривую действительного состава песка и гравия с идеальной кривой, то, принимая во внимание количество добавляемого цемента, легко вычислить, в каком размере нужно добавить к смеси или отнять от нее материала той или иной крупности зерна.

Другой метод достигнуть пригодности гравия или, иначе, выяснения условий, необходимых для его исправления, заключается

в том, что после ситового анализа берут литровый сосуд, наполняют его при встряхивании материалом наиболее крупнозернистого класса и определяют объем пустых промежутков между зернами путем заполнения сосуда водой. Затем к наиболее крупнозернистому материалу (сухому) добавляют материал следующего по крупности класса в количестве, соответствующем объему пор, плюс 10%, и снова измеряют объем оставшихся свободными пор. Продолжая тот же прием, определяют, в каком соотношении должны быть смешаны отдельные фракции, или сколько той или другой из них должно быть прибавлено в смесь или убавлено от нее. При определении необходимого участия в смеси наиболее мелкозернистого класса необходимо иметь в виду, что цемент сам по себе принадлежит к этому же классу, и следовательно присадка мельчайшей фракции должна быть уменьшена на количество добавляемого к смеси цемента. Отсюда следует, что тощие (бедные цементом) бетоны должны содержать мельчайший песок в большем количестве, чем жирные.

К этому можно добавить, что как в естественном гравии, так

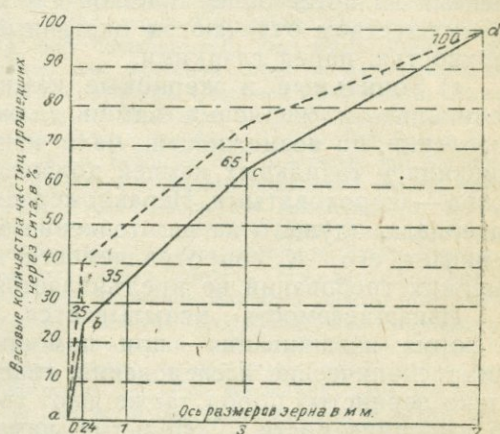


Рис. 124. Идеальная смесь песка и гравия (по Графу).

и в механически получаемой при дроблении мелочи часто наблюдается относительно малое содержание некоторых фракций средней крупности (см. Grengge. Zeitschr. f. Geschiebeforschung, Bd. 3, 1927). Механически измельченные присадочные материалы обычно бывают бедны самой мелкой фракцией, почему в большинстве случаев рекомендуется добавление к ним естественного песка. Получающаяся при дроблении мелочь в форме длинных занозистых частиц кроме того не укладиста и способствует поэтому образованию пустот, вследствие чего в этом случае в интересах сохранения прочности бетона необходимо бывает добавлять мелкое зерно в большом количестве (пунктирная часть кривой Графа, рис. 124). С этой точки зрения при естественном гравии следовало бы отдавать предпочтение состоящему из кругло-окатанных частиц по сравнению с гравием, сложенным из частиц продолговатой формы. Несомненным преимуществом мелочи от дробления перед естественными песками является более прочное сцепление с нею цемента; тем же преимуществом отличаются окатанные частицы с шероховатой поверхностью перед гладкими.

**е) Точильные и жерновые камни, порошки для шлифовки.** Точильные и жерновые камни должны быть тверды и при употреблении, по возможности, мало изнашиваться. Плоскости изнашивания у точильных камней должны оставаться гладкими, у жерновов — шероховатыми. Неравномерная плоскостная изнашиваемость материала, идущего на изготовление этих камней, совершенно обесценивает его. К сопротивляемости материала давлению обычно высоких требований не предъявляется.

Изнашиваемость испытывается по методу Баушингера, а форма изнашивания — при помощи песчаноструйного прибора. Микроскопические исследования, главным образом в случае очень тонко зернистых пород, также дают хороший материал для суждения об изнашиваемости. Точильные камни должны иметь тем более тонкозернистый и однородный состав, чем тоньше те инструменты, которые на них точат.

В точильных порошках важна возможно большая твердость их составных частей и равномерность зерна. Порошок исследуется ситами на характер зернистости, а под микроскопом — на его минеральный состав и прежде всего на загрязненность менее твердыми веществами. Для испытания шлифующей способности порошка определенное количество его истирается на шлифованной каменной пластинке до прекращения его шлифующего действия, после чего измеряется убыль веса пластинки. В качестве меры для выражения шлифовальной способности порошка применяют одинаковое количество наждачного порошка той же крупности зерна, шлифовальную способность которого принимают за 1000.

**Литература.** Vauschinger. Mitt. a. d. Mech.-techn. Laboratorium d. Techn. Hochschule in München, 1884, 1889 (Баушингер. Сообщ. Механ.-технич. лаборат. Высш. техн. школы в Мюнхене). — Vöhme-Gary. Mitt. d. techn. Versuchsanstalt. Berlin, 1889, 1892, 1898. (Беме-Гари. Сообщ. Техн. опытно. инст., Берлин). Vurchartz. Vorl. Richtlinien f. d. Prüfung von natürl. Gesteinen als Strassenbaustoffe. Der Strassenbau, Heft 10, 1927. (Бургарт. Предварит. руковод. указания для испыт. природных горных пород в качестве материалов для дорожного строительства). — Vurge. Ueber die Eignung von Gesteinen zu Talsperrenbauten. Zeitschr. f. prakt. Geologie, 1925 (Бурпе. О пригодности горн. пород для сооружения плотин). —

Förrl. Mitt. d. Mech.-techn. Laboratoriums, München, 1906 (Сообщ. Механ.-технич. лабораторий, Мюнхен). — F u n k. Der Quarzit und seine techn. Bedeutung, insbesondere im Strassenbau. Der Strassenbau, Heft 14, 1927 (Функ. Кварцит и его технич. значение, в особенности для дорожного строительства). — G a r y. Mitt. a. d. Techn. Versuchsanstalten zu Berlin, 1897, 1898, 1900. (Гари. Сообщ. Технич. опытн. инст. в Берлине). — G a r y. Prüfung der Gesteine, Handbuch d. Steinindustrie von K. Weiss, II Teil, Berlin, 1915 (Гари. Испытание горных пород). — G r a f. Der Aufbau des Mörtels und des Betons. Berlin, Springer (Граф. Приготовление извести и бетона). — G r e n g g. Ueber zweckmäßige Prüfungsverfahren von Gesteinen für Strassenbauzwecke. Berlin, Allg. Industrieverlag (Гренгг. О целесообразных способах исследования горных пород для дорожного строительства). — G r e n g g. Ueber ziffermäßiges Erfassen der Gefügeigenschaften der Gesteine. Tschermaks Mineral. petrogr. Mitt., Bd. 38, 1925. (Гренгг. О цифровом выражении свойств слоения горных пород). — G r e n g g. Die Darstellung von Körnerformen und der Kornverteilung loser Massen sowie Gesetzmäßigkeiten beim Werden von Schottern und Sanden. Zeitschr. f. Geschiebeforschung, Bd. 3, 1927. (Гренгг. Изображение формы и распределения зерен рыхлых масс, а также закономерностей в процессе возникновения щебня и песков). — G r e n g g. Bemerkungen zu „Vorläuf. Richtlinien f. d. Prüfung von natürl. Gesteinen als Strassenbaustoff“. Asphalt- u. Teerindustriezeitung, № 35, 1927 (Гренгг. Замечания к „Предварит. руководящим указаниям для испытания природных горных пород в качестве материалов для дорожного строительства“). — G r e n g g. Der österr. Normenblattentwurf „Natürl. Gesteine f. Strassendeckung und Gleisbettung“. Der städt. Tiefbau, 1927 (Гренгг. Естественные горные породы для мощения дорог и жел.-дорожн. балласта). — G r e n g g. Ueber die Bewertung von natürl. Gesteinen für bautechn. Zwecke. Abh. f. prakt. Geol. u. Bergwirtschaftslehre, Bd. 15, Berlin, 1928 (Об оценке естественных горных пород для строительн.-технических целей). — G r ü n. Der Beton. Berlin, Springer, 1923 (Грюн. Бетон). — H a n i s c h. Resultate der Untersuch. mit Bausteinen d. öst.-ung. Monarchie. Wien, 1892 (Ганиш. Результаты испытаний строит. камней австр.-венгерск. монархии). — H a n i s c h. Frostversuche mit Bausteinen d. öst.-ung. Mon. Wien, 1895 (Ганиш. Опыты промораживания строит. камней австр.-венгерск. монархии). — H e r m a n n. Steinbruchindustrie u. Steinbruchgeologie. Berlin, Bornträger, 1919 (Германн. Промышленность и геология каменоломен). — H e r s c o v i c i. Die Einwirkung d. Rauchgase auf d. gesteinsbildenden Mineralien. Bautechn. Gesteinsuntersuchungen, II, 1910 (Герковиси. Влияние дымовых газов на порообразующие минералы). — H i r s c h w a l d. Die Prüfung d. nat. Bausteine auf ihre Wetterbeständigkeit. Berlin, 1908 (Гиршвальд. Испытание естественных строит. камней на их погодостойкость). — H i r s c h w a l d. Die schalenförmige Verwitterung und ihre Beziehung zum Gehalt der Gesteine an wasserlöslichen Bestandteilen. Bautechn. Gesteinsuntersuch., II, 1910 (Гиршвальд. Скорлупообразное выветривание и его отношение к содержанию в породе растворимых составных частей). — H i r s c h w a l d. Handb. d. bautechn. Gesteinsprüfung. Berlin, Bornträger, 1922 (Гиршвальд. Руководство к строит.-технич. испытанию горных пород). — H i r s c h w a l d - B r i x. Untersuchungen an Kleinschlagdecken behufs Gewinnung einer Grundlage f. d. Prüfung d. natürl. Gesteine auf ihre Verwendbarkeit als Strassenbaumaterial. Bautechn. Gesteinunters., I, II, 1912, 1918, 1921 (Гиршвальд-Брикс. Испытания мелко-щебневых дорожных покрытий в целях получения данных для испытания естественных камней на их применимость в качестве дорожных материалов). — H o p p e u n d K e l l e r m a n n. Zur Kenntniss u. künstl. Erzeugung des Sonnenbrandes an Basalten. Zeitschr. f. prakt. Geol., 1928 (Гоппе и Келлерманн. К познанию и искусственному воспроизведению солнечного загара на базальтах). — I d d i n g s. Igneous Rocks. New York, 1913 (Иддингс. Изверженные породы). — N e u m a n n. Neuzeitl. Strassenbau. Berlin, Springer, 1927 (Нейманн. Современное дорожное строительство). — O e n i g. Österr. Normenausschuss f. Industrie und Gewerbe (Ениг. Австрийская комиссия по выработке промышленных норм. Таблицы норм). — P o l i a k. Verwitterung i. d. Natur. u. an Bauwerken. Wien, Waldheim-Eberle, 1923 (Поллак. Выветривание в природе и в постройках). — P r e k l i k. Die Bedeutung der krist. Schieferbildg. f. d. Untersuchung u. Bewertung von Bausteinen. Steinindustrie, 1927 (Преклик. Значение кристалл. образования сланцев для исследования и оценки строит. камней). — R i p p e. Gesteinskunde. Leipzig, Jänecke (Риппе. Породоведение). — R o s e n b u s c h - O s a n n. Elemente der Gesteinslehre. Stuttgart, 1923 (Розенбуш-Озанн. Основы учения о горных породах). — R o s i w a l. Neue Untersuchungsergebnisse über die Härte von Mineralien und Gesteinen. Verh. d. Geol. Reichsanstalt. Wien, 1896 (Розиваль. Результаты новых исследований над твердостью минералов и горных пород). — R o s i w a l. Ueber geometrische Gesteinanalysen. Verh. d. Geol. Reichsanstalt. Wien, 1898 (Розиваль. О геометрическом анализе горных пород). — R o s i w a l. Ueber einige neue Ergebnisse der techn. Untersuchung

von Steinbaumaterialien u. s. w. Verh. d. Geol. Reichsanstalt, S. 204. Wien, 1899 (Розиваль. О некоторых новых результатах испытаний каменных строит. материалов).—Schenck. Beitrag zur Bestimmung der Erweichungskoeffizienten natürl. Gesteine. Bautechn. Gesteinunters, I, 1910 (Шенк. Дополнение к вопросу об определении коэффициентов размягчения естеств. камней).—Smidt. Natürl. Bausteine. Leipzig, Jänecke, 1908 (Шмидт. Естеств. строит. камни).—Schmölzer. Ueber Anwendungsmöglichkeiten der Ultralampe i. d. techn. Gesteinsuntersuchungen. Die Steinindustrie, S. 196, 1916 (Шмельцер. О возможности применения ультра лампы для технич. исследования горных пород).—Seipp. Die Wetterbeständigkeit natürl. Bausteine u. d. Wetterbeständigkeitsprobe. Jena, Costenoble, 1900 (Сейпп. Погодостойкость естеств. строит. камней и испытание погодостойкости).—Seipp. Die abgekürzte Wetterbeständigkeitsprobe. Frankfurt a. M., Keller, 1905 (Сейпп. Сокращенное испытание погодостойкости горных пород).—Steinke. Die Riesenschotterdecke System Dr. Deidesheimer. Wasser- u. Wegebauzeitschr., 1926 (Штейнке. Дорожный покров из опилового щебня сист. Дейдесгеймера).—Steuer. Ueber die petrogr. u. techn. Prüfung der im Strassenbau verwend. Gesteine. Der Strassenbau, H. 28, 1927 (Штейер. О петрографич. и технич. испытаниях применяемых в дорожном строительстве горных пород).—Stiny. Technische Gesteinskunde. Wien, Waldheim-Eberle, 1919 (Стини. Техническое породоведение).—Stiny. Die Untersuchung von natürlichen Gesteinen für Bauzwecke und die Klüftigkeit der Felsarten. Der Strassenbau, H. 30, 1927 (Стини. Испытание естественных камней для строительных целей и трещиноватость скалистых пород).—Tapphäuser. Die Verwitterungsursache der als Sonnenbrenner bezeichneten Basalte. Bautechn. Gesteinsuntersuchung, I, 1910 (Тангейзер. Причина выветривания базальтов, называемых „зонненбреннерами“).—Tetmayer. Methoden und Resultate der Prüfung künstl. u. natürl. Bausteine. Zürich, 1900 (Тетмайер. Методы и результаты испытания искусств. и естеств. строит. камней).—Zelter. Petrogr. Unters. über die Eignung von Graniten als Strassenbaumaterial. Abhandl. z. prakt. Geologie u. Bergwirtschafstl, Bd. 12, 1927 (Целтер. Петрографич. испытания гранитов на применимость их в качестве материалов для дорожного строительства).

КАРЛ КЮН

### 3. МЕРЫ К ОХРАНЕ КАМЕННЫХ СООРУЖЕНИЙ.

Вопрос о выветривании камней и мерах к их охранению от этого явления представляет собой не только научную проблему, но имеет также особое значение и в деле нашего попечения о памятниках; ведь для нас важно не только научное исследование причин разрушения камней и мер борьбы с ними, но также фактическое предохранение наших ценнейших строительных памятников от их медленного уничтожения. В отдельных случаях разрушение камней уже достигло сейчас такой степени, что мы можем прямо-таки говорить об умирающих строительных памятниках.

Вопрос об охранении горных пород от выветривания имеет также еще и хозяйственное значение; и это не только потому, что находящиеся под угрозой разрушения постройки требуют усиленного, сопряженного с значительными затратами попечения, но и вследствие заинтересованности в этом вопросе всех связанных с обработкой камней отраслей промышленности, задачу коих должны составлять: выбор камней достаточной сопротивляемости, надлежащая обработка их и защита от последующего влияния разрушительных агентов.

**Влияние способов обработки и кладки камней на их погодостойкость.** Помимо петрографических свойств горной породы, в первую очередь определяющих степень ее выветриваемости, большое значение в этом отношении имеют также способ обработки ее и

укладки в сооружаемой постройке. Так, например, нерациональной обработкой лицевой поверхности камней остроконечным камнетесным молотком, долотом или зубилом вызывается поверхностное разрушение породы, что влечет за собой механическое выветривание. Изъяны от подобного рода обработки особенно заметно сказались на камнях из эльбинских песчаников. Гиршвальд называет их выветриванием от ударов (Schlagspurenverwitterung). Этот опыт указывает на то, что зачерненные или загрязненные камни (не говоря о прочих изъянах, вызываемых иногда попечениями о памятниках) никогда не следует очищать насечкою, так как при этом удаляется верхняя погодостойкая оболочка камня, вследствие чего обнаженная поверхность его гораздо скорее и сильнее поддается влиянию дымовых газов.

Выветривание может быть ускорено также нецелесообразной укладкой насеченных камней, в особенности когда они укладываются не плашмя, т. е. „обработаны наперекор влиянию времени“ („gegen die Jahre gearbeitet sind“), как гласит специальная терминология.

Выветривание может быть вызвано также выбором плохого материала для заполнения швов. В этом случае или не достигается тесная связь между камнями, или известь выпадает, оставляя пустые швы (соборы в Страсбурге и Фрейбурге). Водонепроницаемая известь вызывает в водопроницаемых камнях скопление влаги, которая влечет за собой преждевременное разрушение строительного материала. Некоторые исследователи признают также возможность химического воздействия извести на горные породы. Во всяком случае известь как прочностью, так и пористостью своею должна отвечать свойствам скрепляемой ею породы.

В числе различных воздействий механического характера следует упомянуть также о тех повреждениях, которые причиняются камням нецелесообразным применением железа в форме скоб, шипов и скрепов. Ржавление железа развивает чрезвычайно опасные разрушающие напряжения, вследствие чего в современных постройках вместо железа всегда применяются только латунь, бронза, черная медь, дюранометалл (Duranometall) и др.

Но разрушение камней может быть ускорено также различными техническими недостатками самих построек, почему в рамках настоящей главы следует вкратце упомянуть и об этих причинах их повреждения. Постоянная смена сухости и влажности вредна; постоянная мягкая теплая влажная среда может оказаться неблагоприятнее, чем резкие изменения погоды. Равномерная спертая влажная атмосфера в закрытых помещениях, как-то: в извилистых подземных помещениях, погребках и пр., действует на строительные камни разрушительно; только постоянное проветривание, отвод поверхностных вод и мероприятия против надвигающейся снизу сырости и могут в этих случаях помочь делу. Эта именно сырость и представляет огромную опасность, в особенности в том случае, если стены гигроскопичны. Если поднимающаяся влага насыщена солями (Дебо), то последние на некоторой высоте над почвою при высыхании стен выделяются в форме налетов (глауберова соль, селитра и пр.), причем вызывают разложение породы и постепенное выкрашивание ее. Характерный пример подобного разруше-

ния наблюдался на сделанных из французского известняка цокольных плитах здания оперы во Франкфурте на Майне (*Deutsche Bauzeitung*, 1887—1889). На устранение поднимающейся влажности необходимо обращать особенное внимание в случае высеченных из песчаника фигур (прокладка изолирующих слоев), так как только при совершенно сухом материале можно рассчитывать на успешное пропитывание камня предохраняющим веществом.

Не менее вредной является также внешняя сырость, поскольку она не удерживается в достаточном отдалении от построек надлежащим о них попечением. Это в особенности относится к водонепроницаемым карнизным камням, если они не снабжены вовсе или имеют плохие водоотводные желоба и открытые швы, вследствие чего расположенные под ними камни подвергаются постоянному смачиванию. То же самое относится и к цокольным камням, если они часто омываются стекающей с крыши водой, или если последняя по ним может беспрепятственно проникать в фундамент, являясь затем источником упомянутого надвигания сырости снизу. Покрывающие цоколи зеленые водоросли служат признаком этого явления. Предотвращение его возможно только путем целесообразного отвода стекающей с крыши воды от стен и от почвы (водоотводные канавки, *Rigole*). Все эти причины могут быть сведены до минимума путем целесообразного попечения о постройках.

Кроме уже описанных повреждений химико-физиологического порядка, причиняемых растениями, согласно Хагеру, могут иметь место также и повреждения физико-механического характера, они вызываются разрывающим действием корней растений на кладку фундамента и наружных стен, скоплением сырости и связанной с этим деятельностью мороза, а также движениями колеблемых ветром ветвей.

Несмотря на указанный вред, причиняемый растениями, во многих случаях едва ли имеется основание в интересах сохранения памятников высказаться за безусловную необходимость удаления с них старого плющевого покрова, так как, с одной стороны, присутствие этого рода растений придает большую прелесть старинным постройкам, с другой же — мнения о вредном влиянии плюща, особенно согласно опыту англичан, по меньшей мере различны. Из современных разновидностей таких растений предпочтительнее применять японский ползучий виноград (*Ampelopsis tricuspidata* Veitschii), который также своей яркой осенней окраской способен усиливать живописность построек.

**Мероприятия против выветривания.** Вышеописанные вредные влияния различных факторов на камни были известны уже в древнее время и тогда уже изыскивали пути к устранению или уменьшению этого влияния при помощи ряда искусственных мероприятий. Так, например, известно, что выбор разновидности строительных камней производился с величайшей осторожностью; для частей строения, ограниченных гладкими поверхностями, согласно В и о л е-ле Д ю к, сознательно выбирался более твердый камень, чем предназначавшийся для устройства более тонких конструкций (Париж, Собор богоматери). Для различных архитектурных целей изыскивались различные камни из разных каменоломен, как это явствуют из строительных счетов, сохранившихся еще и по настоящее время

(Прага, Собор св. Вейтса, Veits-Dom, еженедельные строительные счета).

Часто самые камни еще кроме того подвергались специальной обработке, чтобы придать им большую сопротивляемость влажнотности. В целях более скорого стока воды складам одежд у статуй, украшениям и отдельным архитектурным частям сооружений придавалась соответствующая форме и швам—определенное направление. При возведении некоторых частей, в целях скорейшего просыхания их, в них оставлялись открытые швы, которые затем заполнялись масляным цементом (Olkitz). Камни покрывались также маслом и обрабатывались составом Tempera, состоящим из яйца или творога (казеин), чтобы образовать на них водонепроницаемую пленку. Наконец, в древних и средневековых постройках из камня прибегали к окрашиванию каменных поверхностей не только ради красоты, но также из практических соображений для защиты их от выветривания, о чем имеются сведения в сообщении Витрува, трактующем о придании прочности окраске киноварью путем покрытия ее слоем пунического воска.

Окраска масляными красками часто приводила к результатам, прямо противоположным преследовавшейся цели. Богемский кремнистый известняк (Plänerkalk) распыливается, если он некоторое время находился под слоем штукатурки; подобное же распыливание имеет место, если масляною краскою покрывают мягкий песчаник.

Новейшие предохранительные меры основаны на процессе пропитывания камней и требуют некоторых предварительных подготовительных операций. Камни прежде всего должны быть очищены от приставших к ним загрязненных слоев и должны быть сухи, для того чтобы пропитывающее вещество могло быстро и глубоко внедриться в раскрытые поры. Выполнение этих операций является одним из немаловажных условий продолжительного действия пропитывающих веществ. Всякого рода очистка камней механическими средствами, при помощи зубила, шлифовкою и пр., как уже указывалось, недопустима ни с технической стороны ни с точки зрения попечения о памятниках.

Очистка камней производится повторным обмыванием их чистой мягкой водой при помощи соломенных щеток (не проволочных) и без добавления кислот, так как последние могут вызвать обесцвечивание их. Если слой грязи проник очень глубоко, то рекомендуется обмывание камней равальфлюатом (Ravallifluat, фтористый кремний и избыток свободной кремнефтористоводородной кислоты 40° Боме). После этого, однако, камни сейчас же должны обмываться чистой водой. Равальфлюат очищает камень и в то же время делает его тверже.

Очистку камней посредством песчаноструйного прибора следует применять с величайшей осторожностью, чтобы не вызвать образования на поверхности камня маленьких ямочек; рекомендуется поэтому указанный способ очистки применять путем осторожного дутья со стороны. Выяснилось, что от этого способа гранит, порфир, гнейс и песчаник подвергались порче в большей степени, чем известняк, диабаз и базальт. В последнее время были произведены удачные опыты очистки камней посредством пароструйных приборов (фигуры в парке Версаля).

В целях предохранения камней от выветривания изобретен ряд мероприятий, которые частью сводятся к мерам предохранения, применявшимся уже древними. Они заключаются в том, что камни или закаляют путем воздействия на них химических реагентов, или же делают их поверхность недоступной влиянию воды.

Для применения этих мероприятий необходимо выполнение следующих условий;

1. Они не должны портить производимого камнем эстетического впечатления.

2. Они не должны портить камень и сами должны быть безупречными в техническом отношении.

3. Они не должны приводить камень в состояние совершенной изоляции от доступа к нему воздуха.

Требования эти приводят к тому, что меры к предохранению камней от порчи могут с успехом проводиться в жизнь лишь в ограниченных пределах. Необходимость выполнения предварительных мероприятий для сообщения камню способности воспринимать предохранительные вещества, а также необходимость наносить их на камень сплошным ровным слоем представляют собой требования, возрастающие вместе с увеличением размеров возводимого из камня сооружения; выполнение их оказывается все более и более затруднительным и наконец становится невозможным. По этой причине применимость мер к предохранению камней от порчи представляется условной. При небольших постройках из камня и при статуях применять их легче, чем в случае крупного сооружения, при котором достижение одинаковой степени сухости, одинаковой способности к восприятию предохранительных веществ и равномерного нанесения последних в отношении всех его отдельных частей невозможно. В этом случае единственным успешным мероприятием может быть только добросовестнейшая замена непрочных камней погодостойкими разновидностями их.

**Предохранительные средства против выветривания.** Известные нам средства предохранения камней с точки зрения охраны памятников и с технической стороны могут быть подразделены на следующие группы:

а) пропитывающие вещества в водных растворах, образующие с камнем химическое соединение;

б) нерастворимые пропитывающие вещества, покрывающие камень водонепроницаемой оболочкой;

в) музейные консервирующие вещества, которые в рамках настоящей главы, предусматривающей архитектурные сооружения, не приняты во внимание. Подробные исследования, посвященные этому предмету, опубликованы проф. Ратгеном в Берлине.

а) *Водные пропитывающие вещества.*

1. Растворимое стекло. Растворимый в воде силикат калия, натрия или кремнекислая соль того и другого металла.

Действие его заключается во введении в породу кремнекислоты, одновременно с этим могут образоваться углекислые соли щелочей, обуславливающие появление налетов.

Недостатки. Слишком сильно окремненные камни приобретают стекловидную поверхность, которая закрывает поры и образует внешнюю воздухонепроницаемую оболочку. Камень под этой

оболочкой отмирает, или от действия образующего под нею слоя льда она отрывается от камня вместе с частицами последнего. Растворимые щелочные соли выступают в виде белых налетов. При фресках они соединяются с красками их и образуют белую нерастворимую вуаль. Камень приобретает временно несколько более темную окраску.

Соединения растворимого стекла с хлористым кальцием или сернокислым глиноземом применяются по методу А. Кубелка в Будишовице (Budischowitz) в Моравии (примерно с 1890 г.); М. Левин (1874 г.) применял растворимое стекло и сернокислый глинозем, а Ранзом (до 1870 г.) — растворимое стекло, хлористый барий, или хлористый кальций; применение последнего рекомендовалось также Ленером.

Последние из перечисленных пропитывающих веществ упомянуты больше в интересах исторического освещения вопроса. Их совместное применение нельзя рекомендовать, так как концентрацию растворимого стекла, которая соответствовала бы плотности данной породы, установить с точностью трудно, и получающийся вред (налеты, разрывающее действие) оказывается больше, чем теоретические выгоды.

2. Фтористые соединения (Fluate) представляют собой соли плавиковой кислоты и поступают в продажу в виде фтористых: магнезия, цинка, алюминия, гипса, квасцов. Действие их заключается в том, что они, проникая быстро в породу (в противоположность растворимому стеклу), образуют фтористые силикаты, не содержащие растворимых солей. Действие их особенно сильно проявляется в отношении известняков, цементов, глинистых веществ (Tonwaren), известковой обмазки и штукатурки. При песчаниках необходимо предварительно выполнение некоторых подготовительных операций.

Наиболее употребительным средством является фтористый силикат магнезия или фтористый магнезий. При помощи этого средства были достигнуты хорошие результаты в тех случаях, конечно, когда оно применялось правильно. Рекомендуются применение кристаллических фтористых солей в растворах собственного изготовления вместо пользования порошкообразными или готовыми уже фтористыми соединениями. Характер воздействия фтористого магнезия на различные камни различен. Известняки хорошо закаляются немедленно же по обработке им. В случае меловато-глинистых вяжущих веществ рекомендуется сначала вводить известь в форме известковой воды, как это с успехом было испробовано при богемских кремнистых известняках. К пропитыванию фтористым магнезией следует приступить позднее, часто лишь по истечении целого года.

Песчаники закаляются в том случае, если они не содержат железа; но в целях уплотнения вяжущего вещества их следует подвергать предварительно подготовительной обработке (Vorflaut) или литурином. Но и предварительной обработкой известковой водой при богемских песчаниках были достигнуты хорошие результаты.

Фтористый магнезий не имеет запаха и бесцветен; он не должен изменять окраски камня. Нанесение его в излишек влечет за собой выделение растворимых солей, почему предписывается тотчас же после применения его тщательно обмывать камень водою. Рекомендуются поручать пропитывание камней только опытным исполни-

телями. Необходимо иметь в виду, что фтористый магний действует на металлы, и прежде всего на железо, вследствие чего приходится применять при работе с ним деревянные сосуды.

Согласно Ратгену, можно считать установленным, что применение фтористого магния в отношении мрамора не предохраняет его, но скорее приносит вред.

3. Тесталин (Testalin) состоит из раствора в алкоголе масляно-кислого калийного мыла и раствора Tonerdeazetol (укусно-кислого глинозема), которые наносятся на камень последовательно один за другим. Действие их заключается в том, что камень закаляется и вместе с тем становится водонепроницаемым. Опыт применения этих растворов по настоящее время имел хорошие результаты; двукратное нанесение этих растворов, однако, представляется несколько затруднительным.

На подобных же, частично химических, воздействиях основано применение Мейеровской каменной мастики (С. Гюльсман, Фрейбург), кеймского камнеукрепляющего средства (кремнекислота), фресколита, кеймских минеральных красок и др.

в) *Нерастворимые пропитывающие вещества.* Их действие состоит в том, что камень покрывается тонкой предохранительной пленкой. Не водные пропитывающие вещества не вступают с камнем в химическое взаимодействие, но обволакивают его, не изолируя в то же время полностью от доступа к нему воздуха. Для применения их необходимо, чтобы камень был совершенно сух и имел определенную температуру; по этой причине возможность их практического применения ограничена.

К не водным пропитывающим веществам относятся:

1. Льняное масло и льняная олифа. Их наносят большей частью в горячем состоянии; льняное масло или олифу часто растворяют в бензине или нефтяном эфире, для того чтобы вещество могло глубоко проникнуть в камень и по возможности совершенно заполнить его.

Необходимая полная сухость камней в постройках недостижима. К недостаткам этих средств между прочим относится то, что светлый известняк после их применения несколько темнеет и приобретает жирный блеск. Путем применения отбеленного льняного масла (опыты с собором в Кельне) окрашивание камней может быть умерено.

2. Раствор воска. Воск растворяется в бензине, скипидаре или хлороформе; действие его то же, что и предыдущего средства.

3. На подобном же действии основного применения *церезина* (горное сало) или *цирина* (cirine), причем первый наносится в слегка подогретом состоянии.

4. Шерелмей Szerelmeу Lapidensin был открыт в 1841 г.; он состоит из углеводорода и парафина. Действие его заключается в том, что поры камня покрываются нейтральной (епкаустиче) упругой оболочкой, внедряющейся в его толщу на глубину около 5 см. Химического соединения здесь не получается, но образуется лишь несмачивающаяся оболочка, под которой в то же время камень не отмирает. Согласно данным, сообщаемым Ратгеном и Гертелем, известняки при этом приобретают сначала грязный, а песчаники темнокоричневый до черного оттенка, которые спустя некоторое время исчезают.

В последнее время указанный недостаток устранен путем усовершенствования способа получения этого средства.

Многообещающим, повидимому, является вновь открытый и усовершенствованный нейтральный способ проф. Шмидта в Мюнхене. Он состоит в том, что после обработки камня по старому способу на него кистью накладывают горячий расплавленный воск вместе с красками, причем в наших широтах поверхность камня должна быть также предварительно подогрета до соответствующей температуры.

**Литература.** G. Vogtmann. Wetterbeständigkeit unserer Bauten. Leipzig (Богнеманн. Погодостойкость наших сооружений).— L. Debo. Der Einfluss der Temperatur und der Nässe auf Stein und Mörtel. Hannover, 1897 (Дебо. Влияние температуры и влажности на камень и известь).— F. W. Fröde. Das Konservieren der Baumaterialien. Wien, 1910 (Фреде. Консервирование строительных материалов).— Tg Grohmann Erfahrungen und Anschauungen über Rauchschäden im Walde und deren Bekämpfung. Berlin, P. Parey, 1910 (Громанн. Опыт и взгляды по вопросу о вреде, причиняемом дымом, и о средствах борьбы с ним).— H. Hauenschild. Die Kesslerschen Fluats, Berlin, Polytechn. Buchhdlg., 1895 (Гауеншильд. Фтористые соединения Кесслера).— Kaiser. Über Verwitterungserscheinungen an Bausteinen Neues Jahrb. f. Min. u. s. w. Köln, 1907 (Кайзер. О явлениях выветривания в строительных камнях).— Mitteilungen der Zentralkommission für Erforschung und Erhaltung der Kunst- und historischen Denkmale. Wien, Jahrg. 1909/10 (Сообщения Центральной комиссии по изучению и сохранению художественных и исторических памятников).— F. Rathgen. Die Konservierung von Altertumsfunden, I Teil. Berlin, De Gruyter, 1926 (Ратген. Консервирование древних находок).— F. Rathgen. Die Pflege öffentlicher Standbilder. (Ратген. Уход за статуями в публичных местах).— H. Schmid. Enkaustik und Fresko auf antiker Grundlage. München, Georg D. W., 1926 (Шмидт. Энкаустика и фрески).— M. Setz. Ueber Konservierungsmittel zum Schutze u. s. w. Oesterr. Wocheschr. f. d. öffentl. Baudienst, Wien, 1909, 1915 (Зетц. О консервирующих средствах для защиты и т. д.).— Steinerhaltungsmittel. Berichte über Untersuchungen mit Steinerhaltungsmitteln und deren Wirkungen. Dresden, Kühmann, 1907 (Средства для сохранения камней. Сообщения об исследованиях, произведенных над средствами для сохранения камней и над их действием).— Werbeschriften der Szerelmey-Imprägnierungs-Gesellschaft in Frankfurt a. M., der Hauenschild G. m. b. H. in Hamburg; des Vereines für chemische Production in Karlsbad über Fluats; der Holzverkohlungs-Industrie A. G. in Hannover, über Testalin und andere.

# ГЛАВА ДЕСЯТАЯ. ГРУНТ КАК СЕЛЬСКО-ХОЗЯЙСТВЕННЫЙ ФАКТОР.

КАРЛ ШАРПЕР

## 1. ПОДРАЗДЕЛЕНИЕ И СВОЙСТВА ПОЧВО-ГРУНТОВ С СЕЛЬСКО-ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТОЧКИ ЗРЕНИЯ.

Согласно определению Е. Раманна<sup>1</sup>, основателя научного почвоведения как самостоятельной дисциплины, почвой называется верхний выветрившийся слой твердой земной коры. Митчерлих<sup>2</sup> определяет почву как состоящую из твердых, жидких и газообразных частей смесь, на которой при известных климатических условиях могут произрастать культурные растения. Под возделываемой почвой разумеют земельные участки, используемые в сельском хозяйстве для насаждения культурных растений. Пахотной землей называют верхний обработанный плугом слой возделываемой почвы, обогащенный гумусом, образующимся от разложения остатков растений и искусственного удобрения. Мощность этого слоя представляет собой функцию от глубины возделывания почвы. Так как свойства подпочвы — слоя, залегающего под пахотной землей, имеют важное значение для питания растений, то и этот слой также причисляется к возделываемой почве, поскольку он оказывает влияние на жизнь растений.

Принимая во внимание климатические условия, Раманн подразделяет почвы на почвы влажных и полувлажных или жарких и полужарких климатов; при этом он под жаркой местностью разумеет такую, в которой преобладающим фактором является испарение, а под влажной — такую, в которой над испарением преобладают осадки. В полужарких областях Раманн различает: красноземы (бедные гумусом, богатые гидратами окиси железа; область Средиземного моря), каштано-бурые почвы, бедные гумусом (Венгрия, Румыния), черноземы (богатые гумусом; Россия, Венгрия, Богемия, Моравия, Галиция), солончаковые почвы (богатые растворимыми соединениями; если преобладают натриевые и магниевые сульфаты или поваренная соль, то говорят о светлощелочных почвах, если содержится также сода, то разумеют темнощелочные или содовые почвы). Во влажных областях находятся буроземы (довольно много гумуса, окрашены водной окисью железа в желтый до красно-бурого цвет; Средняя Европа) и сероземы или подзольные почвы (богаты кислым гумусом; более холодные части Средней Европы).

В сельскохозяйственном почвоведении грунты большей частью подразделяются по системе классификации пахотных почв установленной Таером<sup>3</sup>, основателем научного сельского хозяйства.

<sup>1</sup> E. Ramann. *Bodenkunde*. Berlin, 1911.

<sup>2</sup> E. A. Mitscherlich, *Bodenkunde für Land- und Forstwirte*. Berlin, 1920.

<sup>3</sup> A. Thaer. *Versuch einer Ausmittlung des Reinertrages bei produktiven Grundstücke*. Berlin, Realschulbüchhandlung, 1813.

При этом в основу распределения Таер кладет главные составные части отдельных видов почв, т. е. те части, которые в составе данной почвы постоянно преобладают. Соответственно с этим мы имеем следующие группы почв: 1) каменистые, 2) песчаные (до 10% отмучиваемых частей), 3) суглинистые (от 20 до 30% отмучиваемых частей), 4) глинистые (не менее 30% отмучиваемых частей), 5) мергелистые, 5) известковистые, 7) гумусовые, 9) торфяные. При этом необходимо обратить внимание на то, что лишь песчаные и известковистые грунты обязаны своим названием преобладанию в них процентного содержания главной составной части, между тем как в основу схемы подразделения остальных грунтов положены те составные части, которые представляют для данного грунта наибольшую важность в физическом отношении, вне зависимости от того, являются ли они преобладающими количественно или нет. Песчаные почвы отличаются незначительной способностью абсорбции и незначительным содержанием веществ, служащих для питания растений, но зато они легко доступны проветриванию; их влагоемкость мала. Суглинистые почвы отличаются средним содержанием питательных веществ, благоприятными свойствами в отношении абсорбции, влагоемкости и проветривания.

Глинистые почвы богаты питательными веществами и отличаются большой абсорбционной способностью, но зато плохо доступны проветриванию и обладают высокой влагоемкостью.

Кроме того на практике применяется еще другая система подразделения почв, заключающаяся в том, что разновидности почв получают свое название от того растения, которое преимущественно на них выращивается. Так, глинистая почва называется „пшеничной“, суглинистая — „ячменной“, песчано-суглинистая — „ячменной, овсяной и ржаной“, песчаная — „ржаной почвою“.

Смотря по водопроницаемости, обусловленной ею температуре и быстроте, с которой происходит химический обмен веществ, сельский хозяин различает: горячие (hitzige) или активные (tätige) почвы (легкие песчаные почвы) и холодные или мокрые и инертные почвы (тяжелые суглинистые и глинистые почвы). В то время как легкие почвы, как уже упоминалось, в общем бедны питательными веществами, но обладают благоприятными физическими и коллоидо-химическими качествами, тяжелые почвы, хотя и богаты питательными веществами, но проявляют зато в большинстве случаев менее желательные физические и коллоидо-химические свойства.

Так как сельский хозяин в первую очередь рассматривает почву как место, предназначенное для произрастания растений, то его прежде всего интересует вопрос о плодородности находящихся в его распоряжении почв. Поэтому задачу агропедологии и агрокультурной химии составляет изыскание методов исследования почв.

Раз мы рассматриваем почву как место для произрастания растений, то мы должны иметь в виду, что наряду с климатическими и метеорологическими условиями для роста растений имеют значение еще и факторы механического, физического и биологического характера, а также содержание в почве питательных веществ.

Необходимым условием для успешного развития наших культурных растений является присутствие в почве всех тех веществ, которые физиология признала существенными питательными началами. Так, растения для своего роста безусловно нуждаются в углероде, кислороде, водороде, азоте, железе, кальции, магнии, калии, фосфоре и сере, не говоря уже о незначительных количествах других элементов, которые быть может всегда, или по крайней мере для некоторых семейств растений (например, натрий для всех видов репы), необходимы для их успешного созревания<sup>1</sup>. За исключением углерода, который растения получают в форме угольной кислоты из атмосферы, все остальные перечисленные элементы растения заимствуют из почвы. Все они поэтому должны содержаться в почве в достаточном количестве, как это обыкновенно и бывает для большинства из них, за исключением так называемых основных элементов, калия, извести, фосфорной кислоты и азота. Со времени установления закона Либиха о минимуме нам известно, что урожай определяется всегда тем питательным веществом, которое содержится в этом минимуме. Позднейшие видоизменения этого основного закона в общем подтверждают это положение<sup>2</sup>. Для того чтобы не понести чувствительных потерь, сельский хозяин таким образом вынужден иметь совершенно точные данные о содержании в своей почве этих основных элементов, которые очень часто имеются в минимальном количестве. Известь играет еще особую роль; она является не только удобрением для растений, подобно остальным из перечисленных элементов, но еще также и удобрением почвы, т. е. служит не только для питания растений, но должна в то же время еще поддерживать почву в состоянии, которое практик называет зрелостью почвы (Bodengare); это понятие по существу обозначает сумму оптимальных коллоидо-химических и биологических факторов.

Если известь отсутствует, то тем самым разрушается обуславливающая зрелость почвы „мякишная структура“ (Krümmelstruktur), коллоиды превращаются из гелей в золи и создают тогда опасную „крупичатую“ (Einzelnkornstruktur)<sup>3</sup> структуру. Содержание извести в почве обуславливает также и реакцию ее; недостаток извести вызывает слишком кислую реакцию среды, тем самым препятствует сохранению состава ценных цеолитов почвы и подавляет развитие полезных почвенных бактерий, так как эти микроорганизмы могут развиваться лишь в условиях нейтральной или слабо щелочной среды.

„Мякишной“ называют почву тогда, когда отдельные мельчайшие частицы ее собираются в группы, образуя более крупные агрегаты; в „крупичатой“ структуре частички почвы плотно при-

<sup>1</sup> Ср. например, F. Merckenschlager. Tafeln zur vergleichenden Physiologie und Pathologie der Kulturpflanzen. Berlin, O. Schlegel, 1927.—K. Spiro. Einige Ergebnisse über Vorkommen und Wirkung der weniger verbreiteten Elemente. Ergebnisse der Physiologie, 24, S. 474, 1925.

<sup>2</sup> Ср. O. Lemmermann, P. Hasse und W. Sessen. Die Beziehungen zwischen Pflanzenernährung und Pflanzenwachstum und die Methode Mitscherlichs zur Bestimmung des Düngerbedürfnisses des Bodens, Ztschr. f. Pflanzenernährung, Düngung und Bodenkunde, Bd. 7, 49, 1928. H. Niklas und M. Miller. Beiträge zur mathematischen Formulierung des Ertragsgesetzes. Ztschr. f. Pfl. und Düngung, A, 1927.

<sup>3</sup> P. Ehrenberg. Die Bödenkolloide. Dresden und Leipzig, 1918.

легают одна к другой. Вследствие такого плотного расположения частиц почвы с „крупичатой“ структурой проявляют чрезвычайно вредные физические свойства и поэтому для сельского хозяина являются нежелательными. Напротив, „мякишное“ строение почвы выгодно отражается на ее водопроницаемости, как равно и на ее термических условиях, и препятствует чрезмерному вымыванию грунтовых солей или, во время засухи, вредному скоплению солей у поверхности. Наконец, „мякишное“ строение почвы облегчает проникновение в почву корней растений.

## 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЧВ ДЛЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЦЕЛЕЙ.

Так как кроме содержания в почве различных питающих растений веществ плодородность ее обуславливается также ее физическими и механическими свойствами, геологическим строением и биологической деятельностью, то анализ почв соответственно с этим распадается на исследования: механические, физические, химические, растительно-физиологические, биологические и минералогопетрографические.

**а) Взятие пробы.** Правильное взятие пробы чрезвычайно важно и имеет величайшее значение в деле производства анализа для сельскохозяйственных целей. Предпочтительными являются не смешанные средние пробы данного сельскохозяйственного участка, но отдельные характерные пробы, взятые в возможно большем количестве. Из пахотной земли и подпочвы почвенные пробы должны быть взяты отдельно. Отдельные пробы могут быть смешаны между собой лишь в том случае, если при предварительном, производимом на месте испытании их соляной кислотой на углекислый кальций они оказались одинаковыми. В случае проявления разного отношения к испытанию необходимо брать смешанные пробы в количестве, соответствующем степени проявленного ими при этом различия. Союз сельскохозяйственных испытательных станций Германии установил следующую унификацию в деле взятия почвенных проб<sup>1</sup>: „Взятие грунтовых проб, в зависимости от размеров площади (принимая, что свойства почвы распределены по площади по возможности равномерно), производится в трех, пяти, девяти, двенадцати или большем числе мест, расположенных в одинаковых расстояниях друг от друга. Пробы берутся в вертикальном направлении на одинаковую глубину заправки в случае испытании подпочвы на глубину от 60 до 80 см. Отдельные пробы или испытываются порознь, или, если дело касается получения среднего значения, тщательно перемешиваются, и из смеси берется необходимое для испытания количество“. Почвенные пробы (для полного анализа необходимо иметь в своем распоряжении по крайней мере 6 кг вещества) высушиваются зимой в нетопленной комнате или при 30—40° температуре в сушильном шкафу, а летом при нормальной температуре, причем пробы должны быть предохранены от доступа к ним паров, топливных газов, пыли и пр. Более крупные камни из почвы удаляются и при случае подвергаются минералогопетрографическому

<sup>1</sup> Landw. Versuchsst., 38, 293, 1890.

анализу. Необходимо в точности отмечать положение и наклон поля, климатические и геологические условия, род и количество употребленного удобрения, род культуры и плодосмена, уровень грунтовых вод и прочие заслуживающие внимания подробности.

**в) Механический анализ**<sup>1</sup>. Количественное определение соотношения между образующими почву более мелкими и более грубыми составными частями составляет задачу механического почвенного анализа. Последний разделяется на анализ: отсеиванием, отсадкой и отмучиванием.

Различают между собой грубые составные части почвы, почвенный скелет и тонкие земляные фракции. Границы между ними устанавливались различно, в настоящее время большей частью к мелким фракциям причисляют частицы менее 2 мм диаметром. Установление размеров зерен дает возможность выводить заключение о важных физических свойствах почвы, но при этом не принимается во внимание порядок расположения отдельных частиц почвы, что значительно снижает ценность механического анализа почвы и выдвигает вопрос о желательности дополнения его путем исследования ее структуры.

**Отсеивание.** Для отсеивания служат или проволочные сита, или, что выгоднее, дырчатые с точно просверленными отверстиями. Просеивание должно производиться каждым ситом до тех пор, пока частицы перестанут проходить через отверстия. Путем отсеивания могут быть отделены частицы грунта размерами до 0,25 мм. Хотя дальнейшее отделение частиц размером до 0,1 мм и представляется возможным, тем не менее для этой цели применяют иные методы, более точные и скорее приводящие к цели. Объединением сельскохозяйственных испытательных станций Германии, по предложению К. Кюна, были установлены следующие общие правила просеивания<sup>2</sup>. Подлежащая испытанию проба, по возможности в свежем состоянии, растирается до такой степени разрыхленности, при которой после просеивания ее на 5-миллиметровом сите на последнем остаются только одни камни. После этого ее распределяют ровным слоем в защищенном от пыли и газа месте и оставляют там до принятия ею воздушно-сухого состояния. Затем ее взвешивают и просеивают через 5-миллиметровое сито. Оставшиеся на сите камни (> 5 мм) путем ополаскивания водой очищаются от приставших к ним частиц земли и взвешиваются в воздушно-сухом состоянии. Вес их выражается в процентах от общего веса почвенной пробы. Почва, просеянная через 5-миллиметровое сито, состоит из более грубых обломочных частей горной породы и из мелких земляных частиц (< 2 мм). Первые в случае намывных почв называются гравием (Kies), в почвах же, образовавшихся выветриванием, хрящем (Crus) (см. табл. XII).

**Отсадка.** Методы осаждения особенно пригодны для отделения более мелких зерен, методы отмывки выгоднее применять для отмучивания более грубых частиц. Отсадка основана на осаждении почвенных зерен в спокойной воде. Путем встряхивания

<sup>1</sup> Ср. также: M. Köhn. Beiträge zur Theorie und Praxis der mechanischen Bodenanalyse. Landw. Jahrb., 67, 485, 1928.

<sup>2</sup> Landw. Versuchsst., 42, 154, 1892; 43, 335, 1893.

почвы в цилиндре с водой она равномерно распределяется в последнем; при этом образуется взвешенная смесь, в которой мелкие и крупные частицы одинаково распределены на всех уровнях. После встряхивания частицам дают отстояться определенное время в цилиндре. Продолжительность осаждения определяется с таким расчетом, чтобы частица известного диаметра могла за это время пройти расстояние от верхнего до нижнего пункта водяного столба. По прошествии этого времени жидкость сливается сифоном. Этим путем удаляются все те частицы, которые обладают тем же или меньшим диаметром по сравнению с частицами, размер которых был положен в основу определения продолжительности падения.

Таблица XXI.

Размер зерна (диаметр в м.м)	Обозначения
Свыше 5,0	Камни (хрящ, гравий)
От 5,0 до 2,0	Гранд (Grand)
" 2,0 " 1,0	Очень крупный песок
" 1,0 " 0,5	Грубый песок
" 0,5 " 0,2	Песок средней крупности
Ниже 0,2	Мелкий песок
Мелкозем	Тонкий песок, пыль, глина

частиц. После этого вода доливается до прежнего уровня, сосуд встряхивается; опять дают смеси отстояться и по прошествии времени той же продолжительности снова сливают сифоном. Это продолжается до тех пор, пока сливаемая вода окажется совершенно прозрачной, и следовательно окажутся отмытыми все частицы, диаметр которых меньше диаметра частиц принятого для расчета.

Путем установления различного времени падения частиц таким образом достигается отделение частиц самой разнообразной крупности. Что касается подробностей выполнения этого испытания, которое может производиться как по способу объединения (Verbandsmethode) при помощи шламмового цилиндра <sup>1</sup> Кюна, так и по методу Аттерберга <sup>2</sup> его шламмовым цилиндром, то за недостатком места, по этому поводу приходится ограничиться ссылкой на оригинальные источники или на подробные справочники по вопросу исследования почв <sup>3</sup>.

<sup>1</sup> J. König. Die Untersuchung landw. wichtiger Stoffe, S. 9. Berlin, 1923.

<sup>2</sup> A. Atterberg. Internat. Mittlg. f. Bodenkunde, 2, 312, 1912.

<sup>3</sup> M. Fléischer. Die Bodenkunde auf chemisch-physikalischer Grundlage. Berlin, 1922.—F. Shucht Entstehung, Eigenschaften und Einteilung der Böden. Handbuch der Landwirtschaft. Berlin, 1928.—E. Mitscherlich. Bodenkunde für Land- und Forstwirte. Berlin, 1923. H. Pucher. Bodenkunde für Landwirte. Stuttgart, 1927.—E. Ramann. Bodenkunde. Berlin, 1911.—K. K. Gedroiz. Chemische Bodenanalyse. Berlin, 1926.—J. Stoklasa und G. Doerell. Handbuch der biophysikalischen und biochemischen Durchforschung des Bodens. Berlin, 1926.—F. Wahnschaffe und F. Schucht. Anleitung zur wissenschaftlichen Bodenuntersuchung. Berlin, 1924.—G. Wiegner. Anleitung zum quantitativen agrikultur chemischen. Prakticum. Berlin, 1926.—H. Wiessmann. Agriculturchemisches Praktikum. Berlin, 1926.

*Отмучивание.* По сравнению с отсадкой этот метод обладает тем недостатком, что посредством него нельзя отделять частицы крупностью ниже 0,03 мм; зато частицы крупностью свыше 0,05 мм можно разделять между собой довольно точно. Здесь разделение отдельных частиц почвы достигается благодаря различным скоростям струи воды, препятствующей своим встречным движением падению частиц. К испытаниям отмучивания, основанным на этом принципе, относятся способы Шёне<sup>1</sup>, Копеки<sup>2</sup>, Гильгарда<sup>3</sup> и Крауса<sup>4</sup>. Так, например, аппарат Копеки состоит из трех шламовых цилиндров, диаметры которых относятся между собой как 30 : 56 : 178. При помощи применяемых Копеки скоростей отмучивания в 0,2, 2,0 и 7,0 мм получают зерна крупностью менее 0,01 мм (самые мелкие), от 0,01 до 0,05 мм (пыль), от 0,05 до 0,1 мм (тонкий песок), от 0,1 до 2 мм (песок).

Как отсадка, так и отмывка основаны на вычислении крупности частиц, исходя из скорости падения их по уравнению Стокса<sup>5</sup>

$$W = 6 \pi r \eta v,$$

где  $v$ —скорость частицы,  $W$ —сопротивление жидкости,  $\eta$ —внутреннее трение жидкости,  $r$ —радиус частицы. Когда частица достигла постоянной скорости, ее сила тяжести должна быть равна сопротивлению от трения. Если  $g$  означает ускорение силы тяжести,  $d$ —удельный вес частицы,  $d_1$ —удельный вес жидкости, то следовательно

$$6 \pi r \eta v = \frac{4}{3} \pi r^3 (d - d_1) g.$$

Отсюда вычисляется

$$v = \frac{2}{9} g r^2 \frac{d - d_1}{\eta}.$$

Если удельный вес частиц почвы  $d$  принять в среднем равным 2,65, удельный вес  $d_1$  (воды) за 1, внутреннее трение воды  $\eta = 0,01006$  и  $v$  выразить в сантиметрах в секунду, то получим:

$$v = 3,58 \cdot 10^4 r^2,$$

$$r = \sqrt{\frac{v}{3,58 \cdot 10^4}}.$$

Для разделения частиц почвы на основании определения удельного веса отдельных получаемых отмучиванием фракций

<sup>1</sup> E. Schöne. Ueber Schlämmanalyse und einen neuen Schlämmaparat. Berlin, 1867.

<sup>2</sup> J. Кореcky. Die Bodenuntersuchung zum Zwecke der Drainagearbeiten mit besonderer Berücksichtigung der Ausführung mechanischer Bodenanalysen mittels eines neu kombinierten Schlämmaparates. Prag, 1901.

<sup>3</sup> E. W. Hilgard. Forschungen auf dem Gebiete der Agrikulturphysik, 21, 441, 1879.

<sup>4</sup> G. Krauss. Compt. rend. Rom., 1924.

<sup>5</sup> S. Oden. Ztschr. f. Kolloidchemie, 18, 33, 1916.

Г. Вигнер и Г. Геснер<sup>1</sup> выработали специальный способ и сконструировали соответствующий аппарат.

с) **Физическое исследование почвы.** За ограниченностью места в нижеизложенном изложении даются лишь краткие указания на важнейшие физические свойства почвы, представляющие особый интерес для сельского хозяина. Относительно способов их определения приходится отчасти сослаться на подробные справочники.

1. **Удельный вес.** Он обычно определяется при помощи пикнометра. Последний наполняют дистиллированной водой при температуре 15° и определяют его вес. Берут от 10 до 15 г почвы с влажностью, определенной высушиванием при 105°, и кипятят ее с небольшим количеством воды до полного удаления воздуха. После полного остывания полужидкую смесь почвы с водой помещают в пикнометр, добавляют его необходимым количеством дистиллированной воды при температуре 15° и затем взвешивают. Вес высушенной при 105° пробы складывается с весом наполненного водой пикнометра; из полученного суммарного веса вычитают вес пикнометра с водой и помещенной внутри его пробой и получают вес объема воды, соответствующего объему высушенной пробы.

2. **Объемный вес** (кажущийся удельный вес, вес объема сырой пробы). Удельный вес характеризует вес объема, заполненного плотным веществом почвы без учета имеющихся в нем пор; объемный же вес относится к общему весу почвенной пробы, включая и находящиеся в ней пустоты (поры). Этот объемный вес для одной и той же почвы различен в зависимости от большей или меньшей степени ее разрыхленности или содержания влаги. Объемный вес лучше всего определять по столбикам почвы, сохранившим ее естественное сложение и неизмененную структуру. Для этого применяют железную трубу длиной в 10 см и такого же диаметра, слегка сужающуюся книзу, которую внедряют в вертикальном направлении в почву. Когда труба вполне углубилась, ее закрывают крышкой и извлекают наружу. Путем взвешивания трубы пустой и наполненной определяют влажность почвы на месте взятия пробы и по измерении убыли в объеме извлеченного из почвы цилиндра после усыхания его получают кажущийся удельный вес сухой (природной) пробы.

3. **Объем пор** (пористость). Под объемом пор подразумевают объем заключенного в пробе воздуха, выраженный в процентах. Объем пор или пустот обуславливает пористость почвы и влияет на порядок расположения ее частиц. Объем пор вычисляется по формуле

$$\frac{S - V}{S} \times 100,$$

где  $S$ —удельный вес,  $V$ —объемный вес. Непосредственное определение объема пор при мелкозернистых минеральных почвах производится путем измерения количества воды, необходимого для ка-

<sup>1</sup> G. Wiegner. Ueber eine neue Methode der Schlämmanalyse. Landw. Versuchsst., 91. 41, 1918.—H. Gessner. Der Wiegnersche Schlämmapparat und seine praktische Anwendung. Kolloid. Ztschr., 38, 115, 1926.

пилярного насыщения пробы. Так как этот метод неприменим для торфа, то объем пор последнего определяется путем кипячения его в толуоле и измерения вытесненного при этом воздуха.

4. *Влагоемкость* (Wasserkapazität). Способность почвы при соприкосновении с водой впитывать в себя известное количество последней называют водоудерживающей способностью или влагоемкостью. Для определения последней применяют плоские цилиндрические известного объема сосуды из жести, дно которых, снабженное отверстиями, покрывается полотняной тряпочкой. В эти сосуды, предварительно тарированные, помещают сухую пробу почвы, после чего их ставят в плоскую ванну, наполненную водой, и оставляют там до прекращения прироста пробы в весе. Впитанное количество воды делится на вес или объем почвы.

5. *Способность к фильтрации* или водопроводимость. Под этим названием разумеют свойство почвы, обуславливающее просачивание через нее воды в течении более или менее продолжительного промежутка времени.

6. *Капиллярное поднятие* (способность к всасыванию воды). Способность к всасыванию находится в теснейшей связи с механическим сложением почвы; чем мельче составные части смеси, тем многочисленнее капиллярные промежутки и тем значительнее, естественно, способность к всасыванию.

7. *Испарительная способность почвы*. В тени при обыкновенной комнатной температуре все почвы отличаются почти совершенно одинаковой испарительной способностью. Наоборот, будучи в достаточно мощном слое подвергнуты под открытым небом перемежающемуся влиянию прямого солнечного света и тени, разные почвы проявляют явно свойственные каждой из них характерные особенности.

8. *Способность почвы к проветриванию*. Под этим свойством разумеют ту большую или меньшую степень сопротивления, которую различные почвы во влажном состоянии представляют проникновению через них воздуха. Определение этой способности важно не только в целях испытания почвы с точки зрения гигиены, но также и для решения вопроса о том, имеется ли необходимость в дренажировании поля.

9. *Абсорбирование почвою кислорода* из атмосферного воздуха. Абсорбирование обусловлено физическими и химическими причинами. Физическая абсорбция вызывается сгущением кислорода на поверхности частичек почвы; химическое связывание происходит путем окисления имеющихся в наличии закисных соединений железа, гумусовых веществ и сульфидов.

10. *Абсорбирование почвою водяного пара* или гигроскопичность почвы. Сухая почва обладает способностью, смотря по температуре и степени влажности воздуха, поглощать и сгущать водяные пары. Митчерлих и Родевальд<sup>1</sup> разумеют под „гигроскопичностью“ то количество воды, отнесенное к 100 частям сухой почвы, которое последняя содержит, когда поверхность ее,

<sup>1</sup> Mitscherlich. Bodenkunde für Land und Forstwirte. Berlin, 1923. Ср. также Landw. Jahrb., 31. 655, 1902; Landw. Versuchsst 59, 433, 1904.

т. е. суммарные поверхности отдельных почвенных частиц, едва покрыты слоем воды. Таким образом гигроскопичность является величиной, пропорциональной поверхности частиц почвы. Так как поверхность почвы в каждом отдельном случае представляет собой типичную и неизменяющуюся характеристику ее, обуславливающую попутно другие важные в сельскохозяйственном отношении свойства почвы, то и гигроскопичность является важной постоянной для почвы величиной.

11. *Абсорбирование почвою тепла.* Окраска и теплоемкость разновидностей почв обуславливают способность почвы к нагреванию. Огромнейшее значение, однако, для абсорбирования почвою тепла имеет бóльшая или меньшая степень ее влажности; это объясняется сильным охлаждением влажных почв вследствие происходящего на их поверхности испарения воды, но также и тем что 100 г воды для нагрева на  $1^{\circ}\text{C}$  нуждаются в 100 тепловых единицах, тогда как то же количество глины потребует для этой цели всего 17,8, а песка—12,8 тепловых единиц.

12. *Теплопроводность почвы.* Под теплопроводностью разумеют то выраженное в калориях количество тепла, которое в одну секунду проходит через ровный слой толщины в 1 см и в  $1\text{ см}^2$  поперечного сечения, при разнице температур по обе стороны слоя в  $1^{\circ}$ . Теплопроводность отдельных составных частей почвы в общем незначительна. Небольшое увлажнение, однако, значительно повышает проводимость почвы.

13. *Теплота от смачивания.* Теплотой от смачивания почвы (энергия почвы) называют то количество тепла, которое почва развивает при смачивании ее водой. Это свойство обуславливается величиной и формой поверхности частиц ее, а также сцеплением отдельных частей почвы.

14. *Осмотическое давление почвы*<sup>1</sup>. Если почву отделить от воды полупроницаемой пленкой, то она воспринимает воду и притом тем в большем количестве, чем выше содержание в почве растворимых солей. Подходящую полупроницаемую пленку можно получить из фильтровальных цилиндров Шамберлана-Пастера; с этой целью очищенные и высушенные цилиндры пропитывают желатином и переводят последней обработкой формальдегидом в нерастворимое в воде состояние; после этого цилиндры пропитывают внутри 4,2% раствором железисто-синеродистой соли и выдерживают в течении 48 часов в 5% растворе медного купороса.

15. *Электролитическая проводимость* почвы представляет собой меру содержания в почве растворимых солей<sup>2</sup>.

*а) Химическое и растительно-физиологическое испытание почвы.* Задачей химического исследования почвы является создание картины содержания в почве питающих растения веществ.

Для химического исследования применяют мелкую землю (Fein-

<sup>1</sup> J. König und J. Hasenbäumer. Zeitschr. f. angew. Chem., 22, 1009, 1070, 1909.—J. König, J. Hasenbäumer und Grossmann. Landw. Versuchsst., 69, 1. 1908.

<sup>2</sup> В отношении физических исследований почвы ср. также: Н. Jaunert. Neue Methoden zur Bestimmung der wichtigsten physikalischen Grundkonstanten des Bodens. Landw., Jahrb., 66, 425, 1927.

boden), т. е. ту часть почвы, которая получается от сухого просеивания ее через 2-миллиметровое сито. В этой мелкой земле можно или, для исследований в целях чисто научного почвоведения, определить общее содержание всех имеющихся в твердой почве веществ путем так называемого валового анализа, или же определить лишь ту часть питательных веществ, которая растворима в определенных растворителях. При валовом анализе почва разлагается или посредством углекислого калия и натрия, или плавиковой кислотой, но о формах химических соединений, образуемых определяемыми веществами, валовой анализ нам ничего не говорит. Если рассматривать почву только как место, предназначенное для произрастания растений то нужно признать, что при этого рода анализе попутно определяются также и вещества, не имеющие отношения к вопросу о питании растений.

Способ определения в почве питательных веществ путем извлечения их специальными растворителями находит в сельскохозяйственной практике более широкое применение. Во всяком случае вопрос об изыскании способа определения, которым действительно охватывались бы одни только усвояемые растениями (wurzellöslichen) питательные вещества, следует пока признать лишь проблемой сельскохозяйственной химии (о чем ниже будет сказано подробнее). Чем сильнее применяемый растворитель, тем вернее возможность выявления общего запаса питательных веществ, или, так сказать, их „потенциального“ запаса в почве.

Для аналитического определения общего содержания питательных веществ обычно рекомендуется применение соляной кислоты и притом самой разнообразной концентрации. Для того чтобы перевести в раствор не только карбонаты, сульфаты, фосфаты и разложенные основные силикаты (глинозем, окись железа и щелочи), но также и поддающиеся обмену силикаты (цеолиты), в целях получения остатка, состоящего преимущественно из кварца, сырой глины и силикатов, И. Кениг<sup>1</sup> поступает следующим образом: 100 г мелкой земли с 300 см<sup>3</sup> дымящейся соляной кислоты уд. веса 1,19 помещают в колбу, снабженную вертикальной трубкой, нагревают на проволочной сетке и в течении трех часов поддерживают в состоянии энергичного кипения. Затем содержимое колбы выпаривают досуха в фарфоровой чашке на водяной бане и остаток для разрушения органических веществ несколько раз обрабатывается азотной кислотой. После этого раствор фильтруют, основательно промывают и фильтрат вместе с промывными водами досуха выпаривают в фарфоровой чашке на водяной бане; остаток снова выпаривают с соляной кислотой, фильтруют и фильтрат переводят в градуированный цилиндр, который дополняется водой до определенного объема. Подробности дальнейшего аналитического разделения здесь не могут быть приведены; приходится ограничиться лишь кратким описанием принципа определения главных питающих растения веществ (извести, магнезии, фосфорной кислоты, калия).

После отделения кремнезема из определенной (аликвотной) части указанного „основного“ раствора отделяют аммиаком железо,

<sup>1</sup> J. K ö n i g. Die Untersuchung landw. wichtiger Stoffe. Berlin, 1923.

алюминий, фосфорную кислоту и марганец (в случае необходимости они сначала отделяются друг от друга, и каждый компонент определяется самостоятельно) и из оставшегося фильтрата при помощи щавелевокислого аммония осаждают при кипении кальций в виде щавелевокислой соли его. Прокаливанием щавелевокислый кальций переводят в окись кальция и взвешивают. В фильтрате от осажженного щавелевокислого кальция фосфорнокислым аммонием выделяют магний в виде двойной фосфорнокислой магниевой-аммониевой соли, которую прокаливанием переводят в пиррофосфорнокислый магний и в этой форме соединения взвешивают.

Для определения фосфорной кислоты в определенной (аликвотной) части „основного“ раствора сначала отделяют кремнезем, а затем в оставшемся фильтрате, после отгона соляной кислоты, при помощи азотной кислоты осаждают в азотнокислом растворе фосфорную кислоту молибденовокислым аммонием. Полученный желтый осадок двойной фосфорнокислой молибдено-аммониевой соли растворяют в аммиаке и наконец магниевой смесью осаждают фосфорную кислоту в форме двойной фосфорнокислой магниевой-аммониевой соли, которую прокаливанием переводят в пиррофосфорнокислый магний.

Для определения калия из следующей определенной (аликвотной), части „основного“ раствора калий после различных аналитических операций, которые в отдельности не могут быть здесь описаны, переводится при помощи хлорной кислоты в спиртовом растворе в хлорнокислый калий и в этом виде взвешивается.

Определение общего содержания азота производится непосредственно в воздушно-сухой пробе мелко измельченной почвы по способу Кнелльдаля: она разлагается серной кислотой в присутствии ртути в качестве катализатора, и затем аммиак, освобожденный из раствора избытком едкого натра, перегоняется в титрованный раствор соляной кислоты, избыток которой титруется обратно щелочью.

Точно также и определение механически адсорбированной воды и гумуса производится в воздушно-сухой пробе мелко измельченной почвы. Гигроскопическая вода определяется путем высушивания пробы при 100° до постоянного веса, гумусовые вещества—элементарным анализом или путем окисления хромовой кислотой. Эти гумусовые тела отличаются слабо кислой реакцией и обладают способностью адсорбировать минеральные соли. Кислым (не насыщенным адсорбцией) гумус называют тогда, когда количество солей недостаточно для его насыщения. Наоборот, под нейтральным гумусом (насыщенным адсорбцией) разумеют такой, кислотность которого содержанием солей или оснований соответственно понижена.

Вышеприводимые способы производства химических анализов касаются в первую очередь минеральных почв. При торфяных почвах необходимо частичное применение особых методов исследования.

Только что описанное аналитическое определение общего содержания питающих веществ путем применения соляной кислоты в качестве извлекающего средства не дает нам представления

о тех питающих веществах, которые усваиваются растениями. Между тем эти данные как раз и имеют наибольшее практическое значение в целях возможности установления сельским хозяином потребности его почв в том или ином удобрении; поэтому изыскание методов определения легко усвояемых питательных веществ является давнишней проблемой почвоведения и агрокультурной химии.

Достижение этой цели составляет прежде всего задачу чисто химических методов, пытающихся изыскать способы извлечения питательных веществ более слабыми растворителями, по своей кислотности близко подходящими к кислотности соков корней. Так, Биеле-Шателан<sup>1</sup> и Митчерлих<sup>2</sup> применяют воду, содержащую углекислоту, другие исследователи — уксусную, щавелевую, азотную, лимонную кислоты, лимонно-аммиачную соль, хлористый аммоний, известковую воду, хлористый кальций, и т. д. Кениг пытался извлечь растворимые составные части почв путем находящегося под высоким давлением паров и окислением почвы перекисью водорода или обработкой ее постоянным током<sup>3</sup>.

Кениг и Газенбеймер<sup>4</sup> для определения потребности в удобрении выработали способ, при котором в качестве растворителя берется 1% раствор лимонной кислоты (или для определения азота 1% раствор  $K_2SO_4$ ). Запас в почве усвояемых питательных веществ, необходимый для достижения хорошего среднего урожая, может считаться достаточным, если на 1 кг находящегося на глубине 20 см почвенного слоя приходится растворимых в 1% лимонной кислоте питательных веществ: от 140 до 150 мг N, от 240 до 250 мг  $P_2O_5$  и от 160 до 170 мг  $K_2O$ . Для вычисления в почве количеств трех главных питательных компонентов необходимо кроме количества растворимых в 1% лимонной кислоте питательных веществ определить еще: 1) количества питательных веществ, извлеченных из почвы при полном урожае различными культурными растениями, 2) степень процентного использования легко растворимых питательных веществ различных почв различными растениями и 3) степень использования питательных веществ навоза или минерального удобрения. Из этих величин, необходимых для вычисления потребности почвы в удобрении, содержание в данной почве растворимых в 1% лимонной кислоте (или в растворе сернокислого калия) питательных веществ подлежит в каждом отдельном случае предварительному определению, остальные же необходимые величины могут быть взяты из таблиц.

Леммерман<sup>5</sup> пользуется понятием относительной растворимости, подразумевая под этим отношение количества растворимой в 1% лимонной кислоте фосфорной кислоты к общему содержанию

<sup>1</sup> Biéler-Chatelan. Compt. rend., 150, 616, 1910.

<sup>2</sup> E. A. Mitscherlich. Landw. Jahrb., 36, 309, 1907.

<sup>3</sup> J. König, J. Hasenbäumer und H. Grossmann. Loc. cit — J. J. Hasenbäumer und C. Hassler Landw. Versuchsst., 74, 377, 1911; Zeitsch. f. angew. Chem., 34, 2341, 1911.

<sup>4</sup> J. König. Ermittlung des Düngerbedarfes des Bodens. Deutsch. landw. Presse, 54, 727, 1927.

<sup>5</sup> Lemmermann, Einecke und Fresenius. Landw. Versuchsst., 89, 81, 1916.

последней. Почвы, в которых это отношение менее 25, Леммерман считает нуждающимся в фосфорной кислоте. Раманн, Мэрц и Бауер<sup>1</sup> определяют питающие растения вещества в выжатых из почвы соках (Bodenpreszäfte). В отношении определения потребности почвы в фосфорной кислоте большого внимания заслуживает также способ Врангеля<sup>2</sup>, равным образом работающего с выжатым из почвы соком.

Для определения потребности почвы в калии и фосфорной кислоте Нейбауер<sup>3</sup> прибегает к такому способу: он предоставляет большому числу молодых ростков незначительное количество почвы, вследствие чего питательные вещества почвы с жадностью поглощаются корнями истощенных ростков. Таким образом Нейбауер в качестве разлагающего средства для питательных веществ пользуется самими же растениями. 100 г подлежащей исследованию почвы смешиваются с 300 г толченого стекла и на ней сеются 100 ржаных зерен. Через восемнадцать дней растения собирают, сжигают, и зола исследуется на содержание в ней калия и фосфорной кислоты. Из этого количества калия и фосфорной кислоты вычитаются те количества их, которые получены путем „слепого“ испытания (та же постановка опыта, но без подлежащей исследованию почвы). Если 100 ржаных ростков заимствуют из почвы 24 мг  $\text{K}_2\text{O}$  и 8 мг  $\text{P}_2\text{O}_5$ , то Нейбауер считает такую почву достаточно обеспеченной калием и фосфорной кислотой. Этому методу за последние годы посвящена обширная литература, в особенности в части, касающейся установления предельных цифр.

В центре внимания оживленнейших научных дебатов стоит также способ определения потребности почв в удобрительных веществах, предложенный Митчерлихом<sup>4</sup>. Этот исследователь применяет в качестве опытного растения овес и определяет потребность почвы в азоте, фосфорной кислоте и калии, помещая ее в горшки и систематически вводя в нее те удобрения, недостаток которых выяснился соответствующими исследованиями. Если путем введения одного из этих питательных веществ урожай повышается, то это значит, что в почве имеется недостаток в соответствующем веществе.

Степень повышения урожайности, достигается введением в почву определенного питательного вещества, тем больше, чем больше вообще способна повышаться урожайность данной почвы, т. е. чем больше не хватает данных для достижения урожая своего максимума. На основании этого устанавливаемого им закона физиологических соотношений или иначе закона влияния факторов роста растений Митчерлих<sup>5</sup> считает возможным принять, что действие отдельных факторов роста (вода, свет, питательные вещества) не

<sup>1</sup> E. Ramann, S. März und H. Bauer. Landw. Versuchsst., 88, 380, 1916; Intern. Mittlg. f. Bodenkunde, 6, 1, 1916.

<sup>2</sup> M. Wrangell. Landw. Jahrb., 63, 627, 1926; 63, 707, 1926; 63, 739, 1926.

<sup>3</sup> Neubauer und Schneider. Ztschr. f. Pflanzenernährung und Düngung, 2(A), 329, 1923.

<sup>4</sup> E. A. Mitscherlich. Die Bestimmung des Düngebedürfnisses der Boden. Berlin, 1924.

<sup>5</sup> E. A. Mitscherlich Landw. Jahrb., 56, 71, 1921.

только для одного и того же вида растения, но и для всех растений вообще при самых разнообразных условиях представляет собой величину постоянную. Основываясь на этой предпосылке, Митчерлих пользуется достигнутыми им при вышеописанных испытаниях в горшках процентными урожайностями для вычисления подходящегося на единицу поверхности почвы запаса азота, фосфорной кислоты и калия. Главные возражения против этого метода сводятся к сомнению в том, представляет ли действительно раз установленная степень влияния известного питательного вещества при всех условиях величину постоянную. Во всяком случае согласно последним исследованиям в этой области, указанное положение представляется весьма проблематичным<sup>1</sup>.

Г. Кристенсен<sup>2</sup> и в дополнение к нему Никлас в целях определения потребности почвы в извести основывались на росте и форме развития *Azotobakter chroococcum Beijerinck*, так как этот микроорганизм при значении рН ниже 6,0 уже более хорошо не развивается. Никлас<sup>3</sup> выработал позднее также и способ для определения при помощи *Azotobakter* потребности почв в фосфорной кислоте.

Много исследователей работают над тем, чтобы создать способ для определения усвояемых почвою питательных веществ, исходя из содержания калия и фосфорной кислоты<sup>4</sup>. Особенно много сделано попыток к определению потребности в питательных веществах луговых почв, исходя из предельных цифр, полученных для содержания калия и фосфорной кислоты в золе тощих кормов<sup>5</sup>. Однако эти установленные предельные цифры сильно колеблются, и кроме того следует помнить, что количества воспринимаемых растениями питательных веществ непропорциональны образующейся растительной массе.

В последнее время для определения растворимых питательных веществ<sup>6</sup> все чаще стали применять водные вытяжки из почвы. Недавно Никлас<sup>7</sup> установил метод для определения потребности почвы в азоте и содержания в ней аммиака азотнокислых солей.

В последние годы все больше и больше убеждаются в том, насколько важно для нас создание правильного представления

<sup>1</sup> O. Lemmermann, P. Hasse u. W. Iessen. Die Beziehungen zwischen Pflanzenernährung u. Pflanzenwachstum in die Methode Mitscherlich's zur Bestimmung des Düngebedürfnisses des Bodens. Ztschr. f. Pflanzenernährung, Düngung u. Bodenkunde (B) 7, 49, 1928.

<sup>2</sup> H. R. Christensen. Untersuchungen über das Kalkbedürfnis des Bodens. Ztschr. f. Pflanzenernährung und Düngung, 1 (A), 265, 1922.

<sup>3</sup> H. Niklas und W. Hirschberger. Zeitschr. f. angew. Chem., 37, 955, 1924.—H. Niklas. Ztschr. f. Pflanzenernährung und Düngung (A), 4, 1925.

<sup>4</sup> Ср. в этом отношении обстоятельное сопоставление, приводимое в соч. J. König. Untersuchung landw. wichtiger Stoffe, S. 129, Berlin, 1923.

<sup>5</sup> P. Wagner Arbeiten der D. L. G., H. 162, S. 102, 1909—P. Liechi und E. Ritter. Landw. Jahrb. d. Schweiz 31, 533, 1917. A. Grete. Landw. Jahrbuch der Schweiz, 25, 381, 1911. Цитировано по G. Wiegner. Anleitung zum quantitativen agrilkulturchemischen Praktikum. Berlin, 1926.

<sup>6</sup> A. Nemeec. Kolorimetrische Kalibestimmung in wässerigen Bodenauszügen als Indikator der Düngungsbedürftigkeit. Biochem. Ztschr., 189, 50, 1927.

<sup>7</sup> H. Niklas und F. Grandel. Ueber die Beziehungen zwischen Pflanzen- und Bodennitrat und deren zweckmässigste qualitative und quantitative Bestimmung nach zumeist eigenen Methoden. Heft 12 der Sammlung Naturwissenschaft und Landwirtschaft. Freising—München, 1927.

о реакциях почв, так как рост растений в значительной степени зависит от содержания в почве водородных ионов („концентрация водородных ионов“), и оптимальное созревание наших культурных растений сопряжено с совершенно определенной реакцией почвы<sup>1</sup>. Особенно вредными для произрастания растений проявили себя сильно кислые и сильно щелочные почвы. Поэтому делом первоочередной важности является предоставление в распоряжение сельского хозяина по возможности простых методов исследования для того, чтобы он имел возможность самостоятельно на самом поле ориентироваться в вопросе о том, какая примерно реакция свойственна его почве. Для этой цели служат опробования почвы лакмусом, соляной кислотой, солями родановой и салициловой кислот. Опробование соляной кислотой состоит в том, что почва обрабатывается слабым раствором ее, и по вскипанию почвы судят о содержании в ней углекислого кальция; если угольная кислота не выделяется, то почва считается не содержащей извести. При пробе лакмусом почва смачивается 7,5% раствором KCl, и непосредственно к поверхности ее прижимают полоски синей и красной лакмусовой бумаги: по изменению окраски выводят приблизительное заключение о реакции почвы. Метод опробования роданистой солью, установленный Комбер-Гиссингом<sup>2</sup>, основан на том факте, что бесцветный спиртовой раствор роданистого калия приобретает в кислых почвах красное окрашивание вследствие образования роданистого железа, вызываемого обменной реакцией раствора с содержащимся в таких почвах железом.

С другой стороны, щелочные растворы почвы обесцвечивают красный раствор роданистого железа, так как оно постоянно только в кислом растворе, и щелочная реакция его разрушает. К сожалению, применение этого метода возможно только в отношении воздушно-сухих, но не сырых почв. Этот недостаток отсутствует в опробовании салициловой кислотой, основанном на свойстве этой кислоты давать с железом красное окрашивание<sup>3</sup>. Но как роданистый, так и салициловый способ неприменимы в тех случаях, когда кислые почвы вообще не содержат железа, что особенно часто имеет место в слабоокрашенных почвах.

Эти качественные опробования, направленные к приближенному суждению о свойственной почве реакции, имеют однако значение лишь предварительных испытаний. В случае желания получить практически применимые данные, необходимо всегда прибегать к дополнительному точному количественному определению степени кислотности почвы путем производства анализа опытным персоналом в химической лаборатории. В первую очередь необходимо выяснить степень действительной концентрации водородных ионов, так называемой „активной кислотности почвы“<sup>4</sup>. Наиболее точным методом определения концентрации водородных ионов является электрометрическое (потенциометрическое) измерение, производимое посредством водородного или хингидронного электрода. Наряду

<sup>1</sup> W. Mevius. Reaktion des Bodens und Pflanzenwachstum. Heft 11 der Sammlung Naturwissenschaft und Landwirtschaft. Freising—München, 1927.

<sup>2</sup> The Journal of Agricultural Science, 10, 420, 1920.

<sup>3</sup> H. Niklas und A. Hoek. Illustr. Landw. Ztg., № 45, 1932.

<sup>4</sup> L. Michaelis. Die Wasserstoffionenkonzentration. Berlin, 1923.

с этими применяются также и калориметрические методы<sup>1</sup>. Если желательно вычислить количества извести, необходимые для нейтрализации почвенной кислотности, то нужно определить или „потенциальную“ кислотность, которую, по Дайкухара<sup>2</sup>, обычно определяют путем обработки почвы КС1 и титрованием полученной вытяжки нормальной щелочью. Для торфяных грунтов Такке и Зюхтинг<sup>3</sup> выработали способ определения свободных гумусовых кислот, основанный на измерении количества углекислоты, выделяемой гумусовой кислотой из карбоната кальция.

Кроме определения „активной“ и „потенциальной“ кислотности почвы в деле оценки ее имеет значение еще и так называемое „Pufferung“ Под ним разумеют сопротивление, которое почва оказывает изменению своей реакции. Приблизительным биологическим выражением этого рода испытания почвы (Bodenpufferung) является уже описанный выше азотно-бактериальный метод Кристиансен-Никласа. С полной точностью эта величина получается посредством электрометрического титрования, которое состоит в том, что после определения числа рН почвы<sup>4</sup> систематически добавляют п/50 или п/100 растворы щелочи или кислоты и каждый раз измеряют число рН. Если на оси абсцисс откладывать числа кубических сантиметров добавленной щелочи или кислоты, а на оси ординат соответствующие значения рН и соединить полученные точки кривой, то последняя будет характеризовать Pufferung почвы и даст, кроме того, возможность вывести заключение относительно природы имеющейся кислоты или солей.

В связи с большим влиянием, оказываемым на плодородность почвы грунтовыми коллоидами, последние в настоящее время стали главным предметом исследования в области почвоведения. Описанные выше физический и механический анализы почв привели уже к важным результатам относительно содержания коллоидов в почве. Коллоиды или цеолиты с коллоидальными свойствами являются носителями процесса обмена питательных веществ, так как они хотя и абсорбируют (или адсорбируют) различные вещества из почвенных растворов, но могут их в то же время снова и обменивать на другие вещества. Наряду с методами Шлезинга, Гильгарда и Беммелена важными являются также способы определения коллоидов посредством электролиза (Kathaphorese) и адсорб-

<sup>1</sup> E. Mislowitzer. Die Bestimmung der Wasserstoffionenkonzentration von Flüssigkeiten. Berlin, 1928.

<sup>2</sup> G. Daikuhara. Jahresbericht für Agrikulturchemie, 55, 1914.

<sup>3</sup> H. Süchting. Landw. Versuchsst., 70, 13, 1909. — В. Такке. Chem. Ztg. 21 174, 1897.

<sup>4</sup> Под концентрацией водородных ионов или водородном числом ( $[H^+]$  или  $h$ ) разумеют количество водородных ионов ( $H^+$ ) в литре. Эти водородные ионы по теории диссоциации обуславливают сущность кислоты; чем больше, концентрация водородных ионов, иначе, чем более кислота электролитически расщеплена, тем она „сильнее“. Химически чистая вода также расщеплена на ионы по формуле:  $H_2O \rightleftharpoons H^+ + OH^-$ . По измерениям в такой химически чистой воде, следовательно, при нейтральной реакции находятся  $10^{-7}$  gh в литре. При кислотной реакции  $h > 10^{-7}$ , при щелочной  $< 10^{-7}$ . По предложению Зеренсена, вводят выражение  $pH = \text{водородному экспоненту} = -\log h$ . Тогда нейтральная реакция определяется как число  $pH \leq 7$ , кислая реакция как число  $pH < 7$  и щелочная реакция как число  $pH > 7$ .

ции красящих веществ<sup>1</sup>. Процесс образования поверхности коллоидов лучше всего воспроизводится вышеописанным установленным Митчерлих и Родевальдом способом определения гигроскопичности.

Способность почвы удерживать отдельные вещества из вводимых в нее растворов называется абсорбцией; это свойство ее обуславливается более химическими чем физическими процессами (отчего и называется не адсорбцией, но абсорбцией). Так как абсорбция имеет отношение к плодородности почв, то определение ее не лишено интереса. В принципе это определение заключается в том, что данную почву в течении определенного времени подвергают действию растворов хлористого аммония, азотнокислого калия, азотнокислого кальция, сернокислого магния и кислой фосфорнокальциевой соли и затем определяют количество усвоенных почвою питательных веществ.

Некоторые исследователи полагали возможным установить меру степени плодородности почвы, исходя из свойства ее разлагать перекись водорода с выделением кислорода („сила катализации“). Но последние исследования не подтвердили вполне этих ожиданий<sup>2</sup>.

Наилучшим методом установления потребности почвы в удобрении в известном отношении все еще является точный опыт посредством выращивания растений. При этом необходимо различать научные испытания выращивания растений в горшках и испытания, производимые в поле. Полевые испытания происходят при наличии тех же предпосылок, которые имеют место и в условиях практического сельского хозяйства, между тем определенные научные вопросы из области питания растений могут разрешаться только путем опытов, производимых в горшках, при которых влияние отдельных факторов роста растений, главным образом образом воды, поддается точному учету<sup>3</sup>.

е) Биологическое исследование почвы. Почва не представляет собой мертвой массы, но исполнена проявлений самой деятельной жизни. Лишь в последние годы начинают постепенно придавать биологии почвы то значение, которое она действительно заслуживает. Наряду с определением вообще всех присущих почве разновидностей микроорганизмов, особого интереса заслуживает исследование тех микробов, которые принимают участие в превращениях углерода, азота, серы и фосфора. Недостаток имеющегося в нашем распоряжении места не допускает возможности вдаваться в подробности настоящего вопроса, почему приходится в данном случае ограничиться лишь указаниями на соответствующую специальную литературу<sup>4</sup>.

г) Минералого-петрографическое исследование почвы. Этот

<sup>1</sup> W. Stöllenwerk. Kolloidchemie. Stuttgart, 1927. — G. Hager. Die Methoden zur Untersuchung der Bodenkolloide und ihrer Eigenschaften. Handbuch der biologischen Arbeitsmethoden herausgegeben von E. Abderhalden. Abt. XI. T. 3, H. 2. Berlin u. Wien, Urban und Schwarzenberg.

<sup>2</sup> K. Scharrer. Beiträge zur Kenntnis der Wasserstoffperoxyd. Zersetzenden Eigenschaft. des Bodens. Landw. Versucht., 107, 143, 1928.

<sup>3</sup> Th. Pfeiffer. Der Vegetationsversuch. Berlin, 1922.

<sup>4</sup> F. Löhnis. Handbuch der Landwirtschaftlichen Bakteriologie. Berlin, 1910. — F. Löhnis. Die Biologie des Bodens. Handbuch der Landwirtschaft. Berlin, 1928. — Maassen und Behn: Mittig. d. Biol. Reichsanstalt, 4, 38, 1907.

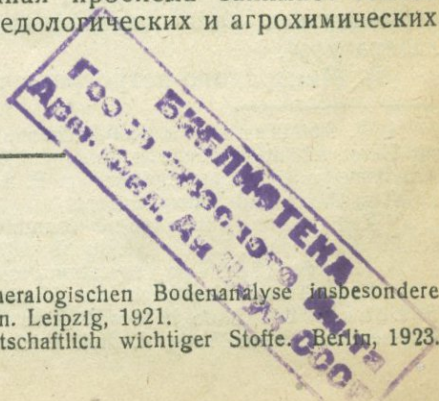
анализ освещает вопрос не только о происхождении почвы, но также и о сущности ее, так называемого „eisernen Bestand“. Под этим разумеют те резервы питательных веществ, ту „восстанавливающую силу“, при помощи которой почва приобретает способность удерживать в течении известного времени свою плодородность и без добавления к ней искусственных питательных веществ. В минералогическом анализе ценные услуги оказывают микроскопические исследования, основанные на данных минералооптики<sup>1</sup>.

г) Оценка результатов исследования. Результаты нижеприводимых исследований почв могут наноситься также и на почвенно-оценочные (агрогеологические) карты. Наряду с установлением профиля почвы, мощности почвенного слоя и глубины уровня грунтовых вод, на них должны быть отмечены: водосодержание или влагоемкость и водопроницаемость, объем пустот, химический анализ почв и содержание органических веществ, углекислой извести, азота, фосфорной кислоты и калия, показатель реакции и потребность в извести.

По И. Кенигу<sup>2</sup> сводка результатов исследований должна содержать следующие данные:

- 1) О геологическом происхождении почвы.
- 2) О глубине пахотного слоя и состоянии подпочвы и более глубоко залегающих слоев.
- 3) О климатических условиях и высоте положения над уровнем моря.
- 4) О видах культур и плодосмене за предшествующие годы.
- 5) О роде и количестве применявшегося удобрения.
- 6) О фактически полученных за прежние годы урожаях (по возможности средние урожаи по важнейшим культурным растениям).
- 7) Практическая оценка почвы, т. е. способы и приемы, применявшиеся опытными местными сельскими хозяевами в деле общей оценки почвы с точки зрения ее доброкачественности и плодородия. В особенности желательны указания о наличии своеобразных особенностей почвы, если таковые имеются.
- 8) Об уровне грунтовых вод.
- 9) Об уклоне почвы.

Так как безупречное систематическое удобрение и связанное с ним научно-обоснованное питание растений возможно лишь в случае нашей полной осведомленности относительно потребности почвы в удобрении, то не должен вызывать удивления и тот факт, что эта важная сельскохозяйственная проблема занимает сейчас центральное место в области агропедологических и агрохимических исследований.



<sup>1</sup> F. Steinriede. Anleitung zur mineralogischen Bodenanalyse insbesondere zur Bestimmung der feineren Bodenmineralien. Leipzig, 1921.

<sup>2</sup> J. König. Die Untersuchung landwirtschaftlich wichtiger Stoffe. Berlin, 1923.



# ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ГЕОЛОГО-РАЗВЕДОЧНОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

АРХАНГЕЛЬСКИЙ А. Д. — Геологическое строение СССР. 1932. Стр. 425.  
Ц. 13 р., пер. 2 р.

ГЛАЗКОВСКИЙ В. А. — Техническое опробование месторождений полезных ископаемых. 1932. Стр. 96. Ц. 2 р. 50 к.

ГОДЛЕВСКИЙ М. Н. — Краткий курс кристаллографии. Приложение: Атлас кристаллографических моделей. 1932. Стр. 60 + 64 нenum. Ц. 2 р. 50 к.

КРИШТОФОВИЧ А. Н. — Геологический обзор стран Дальнего Востока. 1932. Стр. 332. Ц. 10 руб.

НАЛИВКИН Д. В. — Курс исторической геологии. 1932. Стр. 180. Ц. 3 р. 40 к.

НИКОЛАЕВ Н. И. — Курс разведочного ударно-механического бурения. Ч. I. 1932. Стр. 184. Ц. 5 р.

ПЕТРОВСКИЙ А. А., НЕСТЕРОВ Л. Я. — Электроразведка постоянным током. Курс разведчиков — геофизиков. 1932. Стр. 166 + 4 вкл. Ц. 2 р. 50 к.

ПЕТРОГРАФИЧЕСКИЙ СЛОВАРЬ. Под редакцией акад. Ф. Ю. Левинсон-Лесинг. 1932. Стр. 480. Ц. 17 р.

РАБОЧАЯ КНИГА ПО МИНЕРАЛОГИИ. Ч. I. Под редакцией проф. А. К. Болдырева. 1932. Стр. 312. Ц. 5., пер. 60 к.

РАБОЧАЯ КНИГА ПО МИНЕРАЛОГИИ. Ч. II. Под редакцией проф. А. К. Болдырева. 1932. Стр. 248. Ц. 4 р. 50 к.

ВСЕ ИЗДАНИЯ ГЕОРАЗВЕДИЗДАТА ВЫСЫЛАЕТ НАЛОЖНЫМ ПЛАТЕЖОМ ОТДЕЛ КНИГА — ПОЧТОЙ КНИГОСБЫТА ОНТИ:

1. Москва, центр. Рыбный пер. 2, помещ. 28.

2. Ленинград. Внутри гостинного двора, помещ. 100.



# ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ГЕОЛОГО-РАЗВЕДОЧНОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТА. Европейской части СССР. 6 листов. 18 красок,  
3-ое исправл. изд. 1932. Ц. 30 р.

КАРТА ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ Европейской части СССР и  
сопредельных территорий. 6 листов. 15 красок. 1932. Ц. 25 р.

МАТЕРИАЛЫ К МЕТОДОЛОГИИ поисков и разведок полезных иско-  
паемых. Под общей редакцией В. М. Крейтера. 1932. Стр. 554  
Ц. 10 р. пер., 2 р.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ и ОПРОБОВАНИЯ жидких полезных иско-  
паемых. Под общей редакцией: П. И. Бутова, В. М. Крейтера,  
П. М. Татарина и Н. И. Трушкова. 1932. Стр. 450. Ц. 12 р.

ОПРОБОВАНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ твердых полезных ископаемых.  
Под общей редакцией: П. И. Бутова, В. М. Крейтера,  
П. М. Татарина и Н. И. Трушкова. 1932. Стр. 384 Ц. 10 р.

ПРАВИЛА ПАЛЕОЗООЛОГИЧЕСКОЙ НОМЕНКЛАТУРЫ. Под редакцией  
Б. К. Лихарева. 1932. Стр. 34. Ц. 50 к.

РАЗУМОВСКИЙ Н. К. Спутник геолога. Справочные указания и таблицы  
для расчетов при геологическом картировании. 1932. Стр. 84 Ц. 1 р.  
50 к., пер. 1 р. 50 к.

ВСЕ ИЗДАНИЯ ГЕОРАЗВЕДИЗДАТА ВЫСЫЛАЕТ НАЛОЖНЫМ  
ПЛАТЕЖОМ ОТДЕЛ КНИГА — ПОЧТОЙ КНИГОСБЫТА ОНТИ:

Москва, центр. Рыбный пер. 2, помещ. 23.

Ленинград. Внутри гостинного двора, помещ. 100.

Цена бр. 40 к.  
Переплет 1 р.  
Р—56-Б-2

7841