

В. Ж. АРЕНС, А. М. ГАЙДИН

**ГЕОЛОГО-  
ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ  
ОСНОВЫ**

**ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
МЕТОДОВ ДОБЫЧИ  
ПОЛЕЗНЫХ  
ИСКОПАЕМЫХ**

В. Ж. АРЕНС, А. М. ГАЙДИН

550.8.

ГЕОЛОГО-  
ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ  
ОСНОВЫ  
ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
МЕТОДОВ ДОБЫЧИ  
ПОЛЕЗНЫХ  
ИСКОПАЕМЫХ

2634



МОСКВА „НЕДРА“ 1978



В. Ж. Арнс, А. М. Гайдин. Геолого-гидрогеологические основы геотехнологических методов добычи полезных ископаемых. М., «Недра», 1978, 215 с.

Геотехнологические методы добычи полезных ископаемых находят все большее применение в горнодобывающей промышленности. Возможность и условия применения этих методов зависят от ряда факторов, которые при разведке месторождений традиционными методами не изучаются в достаточном объеме. Поэтому применение геотехнологических методов требует особого подхода к изучению месторождений на всех стадиях их разведки и освоения.

В предлагаемой книге охарактеризованы основные условия, определяющие возможность применения геотехнологических методов, показаны перспективы их использования на месторождениях различных типов. Освещены специфические особенности разведки месторождений. Особое внимание уделено гидрогеологическим исследованиям, задачи и методы которых существенно отличаются от обычных. Рассмотрены задачи, решаемые геологической службой при эксплуатации месторождений: сбор и обработка геотехнологической информации, учет движения запасов, исследования с целью охраны недр и гидросферы.

Книга рассчитана на широкий круг геологов и горняков и может быть полезна студентам вузов горных и геологических специальностей.

Табл. 17, ил. 77, список лит. — 112 назв.

Характерной чертой развития современной экономики является повышение народнохозяйственной ценности сырьевых и природных ресурсов. Все большее значение они приобретают в связи с необходимостью надежного обеспечения промышленности сырьем.

Исходя из решений XXV съезда КПСС, одним из важнейших направлений научно-технического прогресса в десятой пятилетке является внедрение прогрессивных технологических процессов добычи полезных ископаемых, позволяющих значительно снизить материальные и трудовые затраты в производстве, улучшить конечные народнохозяйственные результаты.

В ближайшие годы дефицит многих полезных ископаемых встанет на повестку дня, поэтому все большее значение для будущего человечества приобретает сейчас изучение и освоение земных недр.

Всего за полвека горное дело шагнуло от кайла и лопаты до мощных механизированных комплексов. Однако происшедший скачок в горном деле носит более количественный, чем качественный характер (рис. 1).

В XX в. горное производство вступает в противоречие с природой, ибо с каждым годом для того, чтобы добраться до полезного ископаемого, приходится уничтожать все больше нив, лесов и лугов.

Эксперты утверждают, что в недалеком будущем открытые горные работы можно будет развивать до глубин 700—800 м, а ковш экскаватора будет поднимать 500 т породы. Но рост удельного веса открытых разработок не безграничен, и уже сейчас в ряде стран наблюдается стабилизация и даже уменьшение его доли, что в основном связано с «обезображиванием лика Земли».

При подземной разработке полезных ископаемых возникают не менее серьезные трудности. Например, освоение глубоких горизонтов шахт сопровождается повышением температуры, явлениями внезапных выбросов, ухудшением условий и без того тяжелого подземного труда горняков. К этому перечню нужно добавить, что вокруг обрабатываемых глубоких месторождений образуются депрессионные воронки, которые лишают подземных вод сельскохозяйственные угодья, расположенные на десятки километров от шахт и карьеров, нарушая экологическое равновесие целых районов.

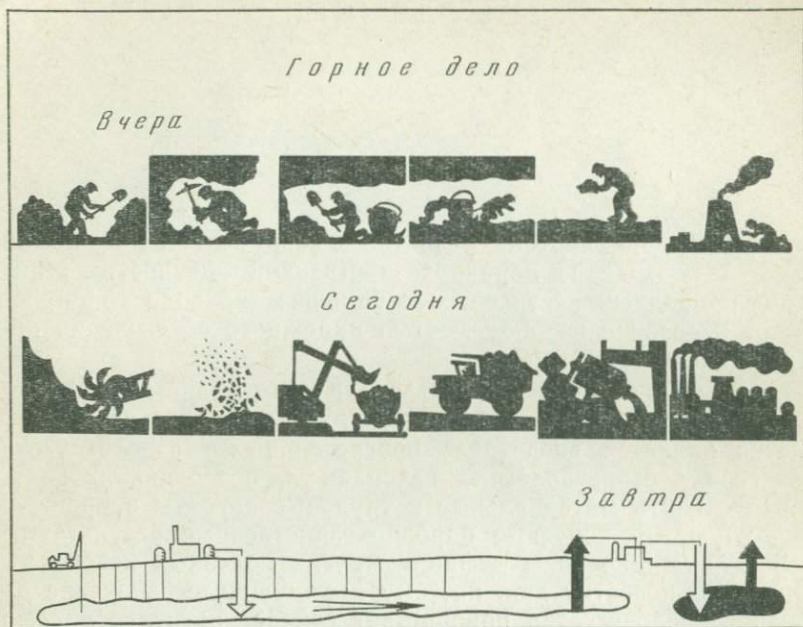


Рис. 1. Геотехнология — будущее горного дела

Традиционные (открытые и подземные) способы разработки месторождений, основанные на механическом отделении полезного ископаемого от массива, погрузке, доставке и транспорте горной массы, требуют присутствия людей на месте добычи. Видимо, даже в будущем все операции подземной разработки полностью автоматизировать не удастся. Таким образом, эти методы не освобождают людей от тяжелого труда, требуют извлечения и перемещения миллионов тонн пустых пород и переработки всей горной массы.

В настоящее время практически все принципиальные возможности совершенствования технологии открытой и подземной разработки исчерпаны. В то же время с каждым годом потребность в природном минеральном сырье возрастает и, чтобы удовлетворить ее, в разработку вовлекаются все более бедные месторождения, залегающие на больших глубинах и в сложных горно-геологических условиях.

Так, например, за годы IX пятилетки в связи с ухудшением горно-геологических условий (глубина разработки увеличилась вдвое) по некоторым предприятиям горной химии среднегодовые темпы роста себестоимости продукции составили 5—15% и это при общем резком (более 200%) увеличении капитальных вложений. Эти факты не исключение. То же

наблюдается в США, где за последние годы производительность труда на угольных предприятиях уменьшилась на 38%. Данные закономерности связаны с характерными особенностями добывающей промышленности, на которую природа оказывает существенное влияние.

На современном этапе в горнодобывающей промышленности выявляется необходимость коренного преобразования технологии добычи полезных ископаемых, замены старых технических средств горного производства новыми, основанными на совершенно иных принципах. А это, как известно, означает необходимость научно-технической революции в сфере горного производства, которая во многом связана с развитием нового в горной науке научного направления — геотехнологии и использованием ее возможностей для разработки новых геотехнологических методов добычи.

Геотехнология как наука прежде всего связана с исследованиями физико-геологической обстановки месторождений, разработкой способов и средств добычи, которые находятся в зависимости от физико-геологических условий и их изменений в процессе эксплуатации месторождения. Таким образом, геолого-гидрогеологический аспект геотехнологии является ее основой.

Формулирование физико-геологических основ представляет собой попытку изложить, под определенным углом зрения, ту часть системы взглядов, которая положена в основу геотехнологии и с одной стороны базируется на геологическом цикле наук, а с другой — на изучении зависимости технологических процессов, протекающих непосредственно в недрах, от физико-геологической обстановки.

Цель книги — изложить физико-геологические основы геотехнологии как единого комплекса знаний, необходимого геологам и горнякам для оценки условий разработки месторождений геотехнологическими методами добычи, их разведки и эксплуатации.

Авторы настоящей книги поставили перед собой следующие задачи:

1. Изложить теоретические основы постановки исследований физико-геологических условий различных месторождений полезных ископаемых и дать методические советы по проведению исследований.
2. Определить требования различных геотехнологических методов к геолого-гидрогеологическим условиям месторождений.
3. Дать методику оценки влияния природных факторов на условия добычи полезных ископаемых и классифицировать месторождения по условиям разработки.
4. Обосновать требования к изученности месторождений и методику геолого-гидрогеологических исследований под конк-

ретные геотехнологические методы на различных стадиях разведки.

5. Дать методику геолого-гидрогеологических исследований на действующих предприятиях с целью правильной интерпретации получаемых результатов и совершенствования управления процессами добычи.

Геотехнология находится на стыке большого числа научных дисциплин и может служить одним из самых ярких примеров интеграции наук. Не будет преувеличением сказать, что трудно назвать научную дисциплину, не имеющую хотя бы косвенного отношения к геотехнологии.

Оформление геотехнологии в самостоятельную научную дисциплину произошло только в семидесятые годы. Наиболее значительные работы посвящены отдельным геотехнологическим методам. Широко известны работы П. А. Кулле (Подземное растворение солей), П. Ф. Скафы (Подземная газификация угля), В. Г. Бахурова, И. К. Луценко и И. К. Рудневой (Выщелачивание урана), Г. И. Каравайко (Микробиологическое выщелачивание), В. Ж. Аренса (Подземная выплавка серы). Детальный обзор систем выщелачивания металлов дается Л. И. Луневым и И. Е. Рудаковым.

Из обобщающих работ можно назвать работы И. П. Кириченко, А. И. Калабина, В. Ж. Аренса. Геолого-гидрологические аспекты геотехнологии освещены в этих работах в небольшом объеме.

Начало геологических исследований в области геотехнологии положили работы Н. Н. Веригина, Н. В. Ефремочкина, П. П. Климентова, Д. К. Семененко, М. В. Сыроватко, С. В. Троянского и других геологов и гидрогеологов, работавших в области подземной газификации угля, растворения солей и выщелачивания металлов.

Предлагаемая работа является первой попыткой систематического изложения геолого-гидрогеологических основ геотехнологии.

Авторы на основе анализа известного материала, собранного по литературным источникам, и новых результатов исследований, проведенных в полевых и лабораторных условиях, благодаря сходу объектов и методов их исследований приняли попытку дать общий подход к изучению физико-геологической обстановки месторождений полезных ископаемых.

Главы I, II, III написаны авторами совместно, главы IV, V, VI, а также § 3 главы I, § 3, 4 главы VII, написаны А. М. Гайдиным. Общие направления и компоновка монографии осуществлены проф. В. Ж. Аренсом.

Авторы благодарят Л. И. Луневу, Г. Х. Хчяна за критические замечания, Т. Ф. Новикову, Л. И. Makeеву, Л. Н. Беляеву и Т. А. Сизову за помощь в оформлении рукописи. Особенно признательны В. Д. Бабушкину за ценные советы.

# Глава I

## ГЕОЛОГИЯ И ГЕОТЕХНОЛОГИЯ

### § 1. Основные понятия и определения

Для того чтобы читателям было понятно толкование различных вопросов, связанных с рассмотрением физико-геологических аспектов геотехнологии, авторы стремились придерживаться общепринятой, установившейся терминологии.

Оказалось, однако, что это не всегда возможно по двум причинам. Во-первых, геотехнология находится на стыке целого ряда научных дисциплин, в каждой из которых существуют свои определения для одних и тех же терминов. Во-вторых, новизна геотехнологических методов обусловила появление целого ряда новых понятий, не всегда имеющих четкие определения. Поэтому необходимо договориться о терминологии, отражающей смысл конкретных понятий и определений, используемых в книге.

*Геотехнологические методы — методы добычи и переработки полезных ископаемых, основанные на переводе их в подвижное состояние посредством осуществления на месте его залегания в недрах тепловых, массообменных, химических, гидродинамических процессов, что позволяет производить процесс добычи и выдачу полезного ископаемого из недр, как правило, через скважины.*

Геотехнология — наука о геотехнологических методах добычи полезных ископаемых и средствах их осуществления. Эта дисциплина наряду с горной средой, геотехнологическими процессами добычи и средствами их осуществления изучает химию и физику протекающих при этом в недрах земли явлений.

Горный массив характеризуется совокупностью целого ряда параметров, отражающих геологическое строение, гидрогеологические условия, физические и химические свойства горных пород и насыщающих их флюидов, давление и температуру и т. д. Всю эту совокупность условий и определяющих их параметров целесообразно характеризовать термином *физико-геологическая обстановка*.

Сфера проблем, охватываемых геотехнологией, значительно шире рассмотрения горной породы или полезного ископаемого как сугубо геологической категории. Особенности геотехнологии требуют переосмысливания традиционных понятий о горном массиве.

Часть месторождения в зоне целенаправленного изменения состояния полезного ископаемого, представленная горной поро-

дой и насыщающими ее флюидами, характеризующимися определенными термодинамическими условиями, правомерно характеризовать понятием *горная среда*, которая представляет собой одну или несколько гетерогенных систем с различными компонентами, присутствующими в твердой, жидкой или газообразной фазах.

Совокупность горной среды, физических или химических процессов добычи и средств их реализации следует трактовать как *геотехнологическую систему*. Это понятие в полной мере отвечает представлению о системах вообще, состоящих из взаимосвязанных частей и представляющих собой замкнутое целое.

Как основной элемент в геотехнологической системе следует выделить часть горной среды, охваченную воздействием рабочих агентов, которую можно назвать *рабочей зоной*.

Свойства полезных ископаемых, определяющие их способность переходить в подвижное состояние с помощью растворения, выщелачивания, горения, плавления, размыва, возгонки и т. д., мы называем *геотехнологическими свойствами*.

Инструментом воздействия на горную среду при геотехнологических методах добычи служат *рабочие агенты*, под которыми понимается энергия или ее носители, вводимые в рабочую зону. Примерами рабочих агентов могут служить химические растворы, электрический ток, вода-теплоноситель и т. п. Под влиянием рабочих агентов полезное ископаемое образует *продуктивные флюиды* (раствор, расплав, газ, гидросмесь и др.), обладающие свойством подвижности и содержащие в своем составе полезные ископаемые.

Основываясь на всех этих понятиях, основной принцип геотехнологии можно сформулировать как исследование изменений горной среды под влиянием рабочих агентов с целью перевода полезного ископаемого в подвижное состояние и извлечения его на поверхность, причем одно из возможных превращений для данной геотехнологической системы является доминирующим и определяет ее изменение.

Исходя из названного принципа, следует выделить три основных направления в изучении геотехнологических методов добычи: 1) изучение собственно превращений химического и физического характера (установление природы процесса и последовательности протекания отдельных стадий); 2) изучение влияния физико-геологической обстановки и горной среды на процесс перевода полезного ископаемого в подвижное состояние; 3) изыскание средств осуществления процессов добычи. Из сказанного ясно, что физико-геологические основы геотехнологии являются базой развития новых методов добычи, ибо только изучение физико-технических характеристик месторождения дает возможность рекомендовать выбор оптимальных

технологических схем, процессов и средств добычи полезных ископаемых.

В настоящее время наибольшее применение нашли следующие геотехнологические методы:

подземное выщелачивание — метод добычи полезных ископаемых избирательным растворением его химическими реагентами на месте залегания с извлечением на поверхность продукционных растворов;

бактериальное выщелачивание — метод интенсификации выщелачивания с помощью микроорганизмов;

подземное растворение — метод добычи полезных ископаемых через скважины растворением его на месте залегания;

подземная выплавка — метод добычи легкоплавких минералов посредством подачи теплоносителя по скважинам в залежь и извлечения полезного ископаемого на поверхность в виде расплава;

подземная газификация — метод добычи полезных ископаемых путем перевода их в газообразное состояние (например, подземный термохимический процесс перевода угля в газ, пригодный для энергетических и химико-технологических целей);

скважинная гидродобыча — метод добычи, основанный на приведении полезного ископаемого в подвижное состояние путем гидромеханического воздействия и выдачи в виде гидросмеси на поверхность.

## § 2. Геотехнологические методы добычи полезных ископаемых

Классификация. Так как перевод полезного ископаемого в подвижное состояние представляет собой самую суть геотехнологических методов, то их прежде всего и следует различать по видам подвижных состояний. Другим важнейшим признаком является способ перевода полезного ископаемого в подвижное состояние.

Приведенная в табл. 1 классификация является достаточно общей, так как охватывает все принципиально возможные геотехнологические методы добычи. Помимо разделения методов по двум основным классификационным признакам, можно различать их дополнительно по способам вскрытия залежей, подготовки руд, интенсификации процессов и так далее. Однако все эти признаки являются второстепенными.

Подземное растворение (ПР). Добыча рассолов каменной соли через скважины известна с 12—14 вв. Технология ПР солей была предложена Е. Н. Тремпом (США) в 1933 г. и усовершенствована П. А. Кулле и П. С. Бобко (СССР). ПР калийных солей в промышленном масштабе освоено в Саскачеване (Канада) только в 1964 г.

При ПР соляная залежь вскрывается скважиной, которая оборудуется концентрично расположенными свободновисящими

Таблица 1

Подвижное состояние полезного ископаемого	Способы перевода полезного ископаемого в подвижное состояние			
	Физические	Химические	Физико-химические	Микробиологические
Газ	Воздействие температуры, давления (сублимация, перегонка)	Окисление, разложение (частичное или полное сжигание, обжиг)	Химические реакции с участием физических полей	Бактериальное воздействие
Жидкость	Плавнение, перегонка (воздействие температуры, давления)	Выщелачивание и растворение с образованием молекулярных растворов	Гидрогенизация, растворение и выщелачивание с участием физических полей	Бактериальное выщелачивание
Подвижные механические смеси	Гидропневмо-разрушение	Растворение связующего вещества	Диспергирование поверхностно-активными веществами, химическими реагентами и физическими полями	Бактериальное растворение цемента (бактериальное воздействие)

рабочими колоннами: водоподающей и рассолозаборной (рис. 2). Растворитель (вода) поступает в соляную залежь по кольцевому зазору между рассолозаборной и водоподающей колоннами.

Для получения рассолов промышленной концентрации (305—310 г/л) отработка продуктивной толщи ведется в камерах ступенями снизу вверх. К кровле камеры подается нерастворитель (нефть, керосин или воздух), которые предохраняют потолочину от растворения. Растворитель, нагнетаемый в камеру, легче заполняющего рассола. Поэтому он всплывает к верхней части камеры и, соприкасаясь с массивом соли, постепенно насыщается и опускается до башмака рассолозаборной колонны. Рассол под остаточным давлением извлекается по рассолоподъемной колонне на поверхность. От скважины по трубопроводам рассол направляется через контрольно-распределительный пункт в резервуар кондиционного рассола, откуда транспортируется к потребителям. Растворы, получаемые методом ПР, являются исходным сырьем для получения хлора, соды, пищевой соли и других продуктов.

Развитие ПР связано с интенсификацией процесса конгруэнтного растворения и внедрением способов избирательного растворения (применением добавок тяжелых металлов, созданием магнитного поля, использованием нагретого растворителя и др.).

ПР используется также для создания в соляных отложениях емкостей — хранилищ нефтепродуктов и сжиженных газов.

Подземное выщелачивание (ПВ) полезных ископаемых применяется при добыче цветных и редких металлов. Имеются предпосылки использования его для разработки фосфатов, боратов и др.

Подземное выщелачивание цветных металлов известно с 16 в. (Испания), первое крупное промышленное освоение метода связано с добычей меди на руднике Кананеа (Мексика) в 1924 г. и с организацией ПВ на медноколчеданных месторождениях Урала (1939—1942 гг.) путем подачи растворителя в залежь с поверхности через скважины. Урановые руды разрабатываются этим методом с 1957 г. ПВ применяется в ряде стран (США, СССР, Франция, Япония, ГДР и др.); в 1974 г. этим способом было получено 20% мировой добычи меди.

Выбор растворителя при ПВ зависит от состава руды и характера химического соединения, образуемого полезным компонентом. ПВ относится к фильтрационным процессам и основано на химических реакциях «твердое тело — жидкость».

При ПВ проницаемых рудных тел месторождение вскрывается системой скважин, располагаемых (в плане) рядами, многоугольниками, кольцами. В скважины подают растворитель, который, фильтруясь по пласту, выщелачивает полезные компоненты. Продукционный раствор откачивается через другие скважины. В случае монолитных непроницаемых рудных тел залежь вскрывают подземными горными выработками, отдельные рудные блоки дробят с помощью буровзрывных работ. Затем на верхнем горизонте массив орошают растворителем, который,

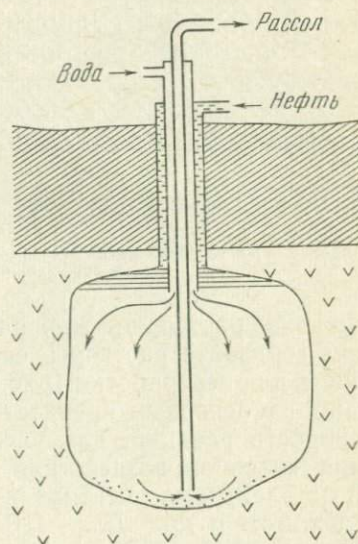


Рис. 2. Принципиальная схема подземного растворения солей

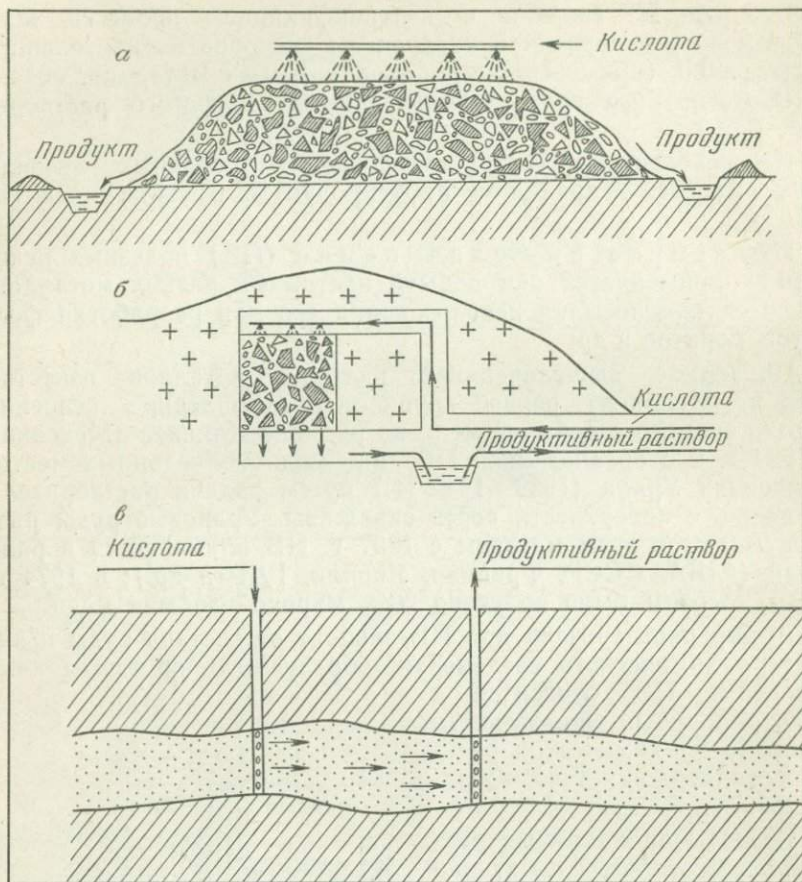


Рис. 3. Принципиальные технологические схемы подземного выщелачивания металлов:

*а* — кучное; *б* — из взорванных и магазинированных блоков; *в* — из проницаемых руд в естественном залегании

стекая вниз, растворяет минералы полезного ископаемого. На нижнем горизонте растворы собирают и перекачивают на поверхность для переработки (рис. 3).

Одно из основных препятствий для применения ПВ — низкая скорость реакций, для увеличения которой ведутся исследования способов воздействия на рудный массив электрическими и электромагнитными полями, предварительным нагревом, обжигом и др. Для ПВ применяются также ядерные взрывы и микробиологические способы.

Подземная выплавка серы (ПВС) основана на низкой (112—119° С) температуре плавления элементарной

серы, ее почти вдвое большей, чем у воды, плотности ( $1800 \text{ кг/м}^3$ ), сравнительно низкой вязкости в жидкой фазе  $(7 \div 10) \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$  в рабочем интервале температур  $120\text{—}150^\circ \text{С}$ . ПВС предложена Г. Фрашем (США) в 1891 г. применительно к серным месторождениям побережья Мексиканского залива, разработка которых подземным способом оказалась невозможной. С 1912 г. ПВС заняла доминирующее положение в мировой серной промышленности (в 1975 г. этим способом в мире добыто свыше 13 млн. т серы).

Основные условия для применения ПВС: 1) глубина залегания и физические свойства покрывающих пород исключают прорыв теплоносителя (горячей воды) на поверхность; 2) рудное тело имеет проницаемую для воды и серы структуру; 3) покрывающие и подстилающие залежь породы водонепроницаемы; 4) наличие источников воды; 5) возможность решения проблемы очистки и сброса высокоминерализованных вод. Для осуществления ПВС до пласта серы бурят скважины диаметром  $200\text{—}300 \text{ мм}$ . В скважине размещают три трубопровода для подачи воды с температурой  $165\text{—}170^\circ \text{С}$ , воздуха и транспортировки расплавленной серы на поверхность. Управление процессом осуществляется с поверхности. Нагнетаемый между водной и серной колоннами теплоноситель через верхнюю перфорацию подается в залежь, где распространяясь по кавернам и порам рудного тела, расплавляет серу, которая под действием силы тяжести течет вниз и собирается вокруг забоя скважины. Через нижние отверстия в трубу поступает сера; через верхние, отделенные от нижних пакером, нагнетается вода. Сера откачивается на поверхность эрлифтом. Расплавленная сера через отстойные резервуары (сепараторы) направляется в фильтры для очистки и далее на склад готовой продукции (рис. 4). Конечный продукт — жидкая сера — содержит до  $99,9\%$  полезного компонента.

Транспортировка потребителям осуществляется в твердом или жидком виде. Все трубопроводы и емкости, в которых циркулирует жидкая сера, обогреваются.

На производство 1 т серы затрачивается от  $6\text{—}8$  до  $30\text{—}40 \text{ м}^3$  горячей воды. Поддержание и регулирование пластового давления и направление отработки осуществляют посредством водоотливных скважин. Холодная вода, отбираемая

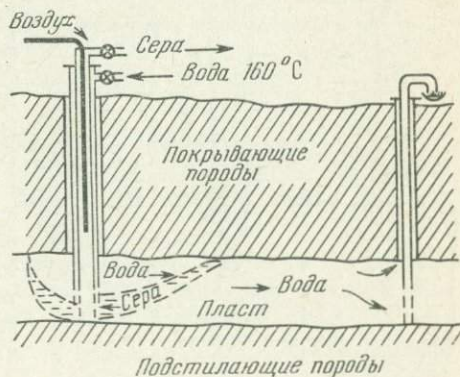


Рис. 4. Схема подземной выплавки серы

через эти скважины, после очистки и разбавления сбрасывается в водоемы. Для заполнения пустот, образующихся после выплавки, а также предотвращения утечек теплоносителя через скважины осуществляется кольтматация глинистыми материалами.

Наряду с высокой производительностью труда, низкой себестоимостью, небольшими капитальными вложениями, возможностью вовлечь в разработку недоступные для других способов добычи залежи, ПВС характеризуется двумя основными недостатками: небольшим извлечением серы (40—70% запасов) и значительными расходами пресной воды. Ведутся работы по увеличению извлечения серы посредством добавления поверхностно-активных веществ, использования в качестве теплоносителя сильноминерализованных пластовых вод, а также применения для разогрева залежи электроэнергии [77].

Скважинная гидродобыча (СГД) применяется преимущественно для добычи рыхлых и слабосцементированных руд (рис. 5).

При СГД месторождение вскрывается скважинами диаметром 100—300 мм. Массив руд разрушается благодаря гидравлическому градиенту (весьма рыхлые, сильно обводненные руды) или струей воды. В первом случае вода в пласт нагнетается в одну группу скважин и пульпа откачивается из соседних; во втором — вода под давлением подается к насадкам гидромонитора и откачивается эрлифтом через ту же скважину.

Интенсификация разрушения возможна путем вибрационного воздействия, предварительного ослабления рудного массива химическими или микробиологическими способами. На

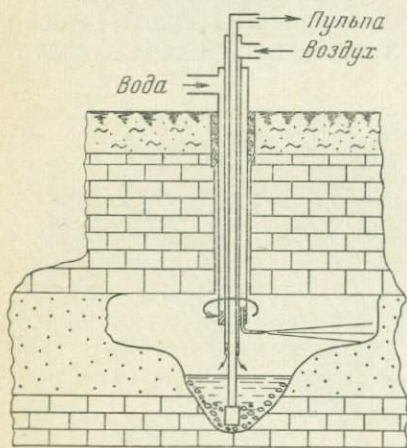


Рис. 5. Схема скважинной гидродобычи полезных ископаемых

поверхность гидросмесь подается гидроэлеватором, эрлифтом, эрлифтом в сочетании с гидроэлеватором, либо благодаря созданию избыточного давления в пласте. СГД позволяет разрабатывать месторождения, залегающие под водоемами; обеспечивает поточность технологии и автоматизацию.

Подземная газификация (ПГ) применяется для получения из угля газа для энергетических или химико-технологических целей, а также получения сернистого газа из серы.

Существенную роль при осуществлении ПГ играет проницаемость залежи. В плотных

залежах необходимо искусственно создавать сбойку между скважинами (огневая сбойка, электросбойка, гидроразрыв, торпедирование) или вести процесс по односкважинной схеме, в которой окислитель и продукты газификации движутся по колоннам труб, смонтированных в одной скважине. По схеме подачи окислителя можно выделить прямоточный и противоточный способы ПГ, в зависимости от того, совпадает или нет направление движения окислителя с движением высокотемпературной зоны. Возможны и комбинированные схемы с периодическим реверсом дутья. Для всех методов ПГ необходимо надежно изолировать добычный участок от земной поверхности и подземных выработок. Известными методами ПГ являются подземная газификация каустобиолитов (угля, нефти, сланцев), основные продукты которых — горючие газы (энергетические, технологические и бытовые). Дополнительными продуктами являются жидкие фракции (смолы, маловязкая нефть). В качестве дутья при ПГ каустобиолитов используется воздух, кислород, паро- и водовоздушные смеси. В настоящее время разрабатывается метод подземного сжигания серы, основным продуктом которого является сернистый газ, используемый для производства серной кислоты.

Степень освоения различных геотехнологических методов добычи полезных ископаемых характеризуется табл. 2.

Общая схема геотехнологических методов. Процесс эксплуатации включает следующие этапы: вскрытие, подготовку, добычу и рекультивацию.

Вскрытыми считаются запасы на площади рудной залежи, разбуренной добычными и вспомогательными выработками и опробованные в объеме, необходимом для решения вопросов технологии их эксплуатации. Подготовленными к отработке являются запасы руд, подвергнутые предварительным воздействиям для улучшения условий эксплуатации и отнесенные к полностью оборудованным для добычи выработкам. К эксплуатируемым относятся участки, в пределах которых происходит извлечение полезного ископаемого, движение рабочих и продуктивных флюидов.

Рудник по добыче полезного ископаемого геотехнологическим методом состоит из трех основных элементов: узла приготовления рабочих агентов; добычного поля и узла переработки продуктивных флюидов.

Рабочие агенты — химические (вода, растворы кислот, щелочей и др. веществ, органические растворители), термические (вода — теплоноситель, горячий газ), термохимические (воздух, кислород), механические (сжатый воздух, высоконапорная вода), электрические (токи различной частоты). Используемый в процессе добычи рабочий агент определяет устройство узла для его приготовления.

Освоение технологии	Геотехнологические			
	Подземное растворение	Подземное выщелачивание	Подземная выплавка	Подземная газификация и возгонка
Промышленное	Месторождения каменной, калийных солей	Зоны окисления сульфидных месторождений меди и никеля. Уран инфильтрационных и осадочно-инфильтрационных месторождений, а также забалансовые участки эндогенных месторождений	Месторождения самородной серы, тяжелой нефти	Месторождения каменного и бурого угля
Полупромышленное	Месторождения бишофита, соды, глауберовой соли	Месторождения марганца, сульфидные месторождения меди и никеля, цинка и свинца. Погребенные россыпи золота	Сера в непроливаемых рудах. Месторождения битума, озокерита	Осушенные месторождения серы

Узел переработки продуктивных флюидов служит для выделения полезного ископаемого из флюида в виде концентрата или в чистом виде. В некоторых случаях, например, при добыче каменной соли, необходимость переработки получаемого раствора отпадает, потребителям подается рассол в том виде, в каком он добывается из скважин. В других случаях, в частности при подземном выщелачивании урана, узел переработки растворов представляет собой сложное сооружение, включающее цепочки сорбционных колонн, сгустители, регенерационные устройства, смесители, пресс-фильтры и т. п.

Основным составляющим элементом рудника является добычное поле (участок, блок), под которым понимается часть рудного тела, где протекает геотехнологический процесс. Для подачи рабочих агентов в пласт и отвода образующихся продуктивных флюидов, как правило, используют специально оборудованные скважины.

Выбор способа вскрытия зависит от конкретных геолого-гидрогеологических условий и технологии добычи. Чаще всего вскрывающими выработками являются буровые скважины. По

методы			
Скважинная гидродобыча	Добыча полезных ископаемых из подземных вод	Извлечение и использование тепла Земли	Подземная переработка полезных ископаемых
Прибалтийские месторождения фосфоритов	Месторождения иодо-бромистых подземных вод. Месторождения подземных вод, содержащих бор, литий, уран	Природные парогидротермы	—
Осадочные месторождения урана, строительного песка и гравия	Воды шахт, рудников и нефтепромыслов	Тепло сухих горных пород	Месторождения сланцев, битумов, железа

своему назначению скважины подразделяют на эксплуатационные, вспомогательные и наблюдательные. Отличительной особенностью эксплуатационных скважин является большой диаметр и особые требования к их проходке, обсадке и цементации. Как правило, забойная часть скважины должна быть надежно изолирована от вышележащих пород и поверхности земли.

Подготовка месторождений при геотехнологических методах отработки включает искусственное улучшение горно-геологических условий эксплуатации и оборудование эксплуатационных и вспомогательных выработок. Специальная подготовка преследует цели улучшения основных технологических свойств полезных ископаемых (руд), повышения или снижения проницаемости руд и изоляции рудных тел в плане и разрезе. Для повышения диспергируемости могут применяться: растворение цемента химическим, микробиологическим способами, нарушение естественной структуры взрывом или вибрацией и т. д.

Улучшение растворимости полезных ископаемых может быть достигнуто предварительным изменением минерального

состава. Например, окисление сульфидов меди кислородом или сернистым железом, окисление урана раствором перманганата калия, окисление железа и марганца сернистым газом, предварительный нагрев, обжиг или частичное сжигание руды и т. п.

Низкая естественная проницаемость руд является наиболее частым препятствием для применения геотехнологических методов. Для ее увеличения в практике широко применяется дробление руд взрывом. В некоторых случаях проницаемость может быть повышена путем растворения отдельных компонентов руды или самого полезного ископаемого, но для этого руды должны обладать хотя бы незначительной первоначальной проницаемостью. Примером может служить практикуемая солянокислотная обработка карбонатных серных руд. Улучшение доступности полезных ископаемых для растворителя может осуществляться также нагревом руды в электрическом поле или другими способами.

Гораздо реже требуется искусственное снижение проницаемости. Чаще всего это необходимо при резко неоднородном строении рудного тела, когда наличие карстовых полостей или тектонических нарушений затрудняет управление движением флюидов. Изоляция рудных тел в плане и в разрезе необходима, если рудные тела залегают среди проницаемых пород, т. е. возможность применения геотехнологических методов добычи зависит от соотношения мощностей и проницаемостей рудных и вмещающих пород. Если мощность проницаемых безрудных пород значительна, возникает необходимость искусственного снижения их проницаемости. Наиболее сложны для отработки залежи, где требуется повышение проницаемости руд одновременно со снижением проницаемости вмещающих пород.

Как известно, для отработки благоприятных месторождения, ограниченные в плане непроницаемыми породами, т. е. гидрогеологически закрытые. Наличие гидравлической связи с поверхностью или с другими водоносными горизонтами может служить препятствием для процессов, протекающих при высоких температурах и давлениях. В таких случаях требуется изоляция рудной залежи в плане.

Интенсификация процессов может быть направлена на ускорение реакции, лежащей в основе способа добычи, а также на увеличение подвижности и проницающей способности рабочих и продуктивных флюидов.

Ускорение реакций может осуществляться путем добавления в рабочий агент вещества — катализатора или повышением температуры и давления. Эффективным средством ускорения реакций является вибрация звуковой и ультразвуковой частот, а также воздействие высокочастотных электромагнитных полей. Широкое применение в практике находят микробиологический способ выщелачивания, резко увеличивающий скорость процесса.

Наряду с методами, направленными на ускорение реакций, интенсификация может достигаться путем повышения подвижности рабочих и продуктивных флюидов. Так, подогрев растворов снижает вязкость воды. При температурах, близких к критической, вся связанная вода в породах переходит в подвижное состояние, приобретая способность к перемещению в ультратонких порах. Кроме того, в такой среде во много раз увеличивается скорость диффузии. Для увеличения проникающей и смачивающей способности воды применяются также их магнитная обработка и поверхностно-активные вещества. Выбор способа интенсифицирующих воздействий на руды зависит от конкретных физико-геологических условий месторождения.

Помимо охарактеризованных выше в достаточной степени изученных геотехнологических методов, заслуживают изучения такие перспективные методы, как гидрогенизация угля и битумов на месте их залегания, скважинная добыча углей воздействием на них углеводородов, использование земных недр как реакторов для осуществления технологических процессов, протекающих при высоких температурах и давлениях.

Нам представляется, что такое полезное ископаемое, как тепло Земли, следует включить в сферу геотехнологии.

### § 3. Месторождения полезных ископаемых как природная система

Системный подход является общим методологическим принципом научного исследования материального мира. В последние годы он нашел широкое применение как методологическая основа решения задач механики грунтов, инженерной геологии, горного и геологоразведочного дела [33, 17, 45]. Одним из плодотворных результатов системного подхода является универсализация научного языка, т. е. создание той основы, которая обеспечивает широкое применение математических методов к изучению столь сложного объекта, как недра Земли.

Применительно к задачам геолого-гидрологического исследования для целей геотехнологии целесообразно различать системы следующих уровней.

*Горно-геологический массив* — участок земной коры в сфере воздействия горных работ, характеризующийся специфическими особенностями геологического разреза, физико-геологического состояния и свойств горных пород.

*Геологическое тело* — некоторая часть горного массива, внутри которой непрерывны параметры, на основе которых выделена граница этой части горного массива [47].

*Геотехнологический элемент* — часть геологического тела, характеризующаяся определенными и однородными в соответ-

ствии с принятыми критериями характеристиками заданного набора параметров.

*Блок (отдельность)* — наибольшая часть геотехнологического элемента, свойства которой можно охарактеризовать по испытаниям образцов в лабораторных условиях. В пределах блока параметры непрерывны и, как правило, распределяются по нормальному закону.

*Система макропустот* — трещины и карстовые образования.

*Горная порода, минеральный агрегат* — твердая фаза блока.

*Система мезо- и микропустот* — поровое пространство горных пород.

*Кристалл* — часть минерального агрегата, однородная во всех точках по химическому составу и физическим свойствам и отделенная от других частей системы поверхностями раздела.

Свойства системы любого уровня можно вывести из изучения ее состава и структуры. Такой подход называют структурным, или структурно-динамическим. Другой подход — феноменологический, заключается в эмпирическом установлении связи между тем или иным воздействием и его результатом. При этом действительная структура системы нередко заменяется некоторой моделью, поведение которой эквивалентно поведению реальной системы. Оба эти подхода взаимно дополняют друг друга.

Месторождения могут рассматриваться как природная система, находящаяся в квазистатическом равновесии, так как время его эксплуатации во много раз меньше, чем время протекания геологических процессов. В основе эксплуатации месторождений геотехнологическими методами лежит смещение равновесия системы в нужную для нас сторону.

Неравновесность системы может быть вызвана только изменением потенциалов системы. К числу таких потенциалов относятся давление, температура, химический потенциал и др. В связи с этим необходимо рассмотреть распределение полей узаканных потенциалов в естественных условиях.

**Давление.** Напряженное состояние горных пород определяется гравитационными силами (определяемыми массой вышележащей толщи пород) и тектоническими напряжениями; фазовым составом и строением пород; конструктивными параметрами выработок.

Для геотехнологических методов добычи полезных ископаемых большое значение приобретает учет влияния насыщающих породы жидкостей. При обычных методах добычи оно обычно не учитывалось, так как работы велись с полным осушением.

Вопросу оценки влияния насыщающих породы жидкостей на распределение в них напряжений посвящено большое число работ, из которых особо следует отметить книги В. А. Мироненко и В. М. Шестакова [66], Ю. П. Желтова [41].

Еще в 1925 г. К. Терцаги [97] предложил фазовую модель грунта и ввел понятия об *истинных* (действительно действующих на каждое из зерен породы) и *эффективных* (осредненных) напряжениях.

Необходимость этих понятий обусловлена тем, что деформация образца грунта в целом зависит от среднего напряжения, получаемого делением прилагаемой нагрузки на всю площадь образца, включая и площадь пор.

Понятие об истинных и эффективных напряжениях в скрытом виде учитывает уровень систем, являющихся предметом исследования.

В зависимости от характера решаемой задачи нас может интересовать деформация отдельных зерен, образца породы, слоя, горного массива или земной коры в целом. Каждой такой системе соответствуют свои масштабы «истинных» и «эффективных» напряжений. Экстраполируя эти понятия на системы более высокого, чем образец, уровня, мы приходим к выводу, что эффективное напряжение характеризует системы в целом, а истинные относятся к их составным частям.

Рассматривая двухфазную модель зернистого грунта, сжимаемого поршнем (рис. 6, а), Ю. П. Желтов показал, что для среды с развитой пористостью соотношение между эффективным напряжением  $\sigma_z$ , давлением поршня  $S_z$  и давлением поровой воды  $P$  выражается уравнением

$$S_z = \sigma_z + P, \quad (1.1)$$

из которого следует, что уменьшение внутрипорового давления приводит при прочих равных условиях к возрастанию истинного напряжения на ту же величину. Кроме того,  $\sigma_z = S_z - P$ , т. е. эффективное напряжение с увеличением давления воды уменьшается и при  $S_z < P$  становится отрицательным. Приводятся ссылки на результаты экспериментов, подтверждающих справедливость данного соотношения.

Все это относится к средам с сильно развитым поровым объемом. Для сред с незначительной пористостью на примере модели грунта с порами в виде вертикальных трубочек показано, что давление воды вызывает лишь сжатие породы в незначительной по размерам области вблизи трубочки (рис. 6, б).

Остаются неясными два вопроса: 1) что подразумевать под «поршнем» и «образцом»

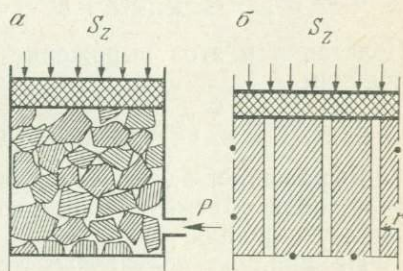


Рис. 6. Модели среды с развитой пористостью (а) и с порами в виде вертикальных трубочек (б)

при переходе к реальным природным условиям; 2) где та грань, которая разделяет среды с развитой и неразвитой пористостью.

Первый вопрос частично рассматривается В. А. Мироненко. Показано, что объемная масса породы с учетом взвешивающего влияния  $\gamma_b$  определяется выражением

$$\gamma_b = (\delta_n - \delta_{ж}) (1 - n), \quad (1.2)$$

где  $\delta_n$  — плотность материала скелета породы;  $\delta_{ж}$  — плотность жидкости;  $n$  — пористость.

Следовательно, для того чтобы определить эффективное напряжение в водонасыщенном грунте на определенной глубине, необходимо глубину залегания грунта умножить на объемную массу, определяемую по формуле (1.2).

Если водонасыщенный слой залегает под водоупором (принимаем его абсолютным), то последний будет играть роль поршня в модели, рассмотренной Ю. П. Желтовым.

Из формулы (1.1) видно, что часть напряжения в грунте, обусловленная массой вышележащих пород, будет равна

$$\sigma_{z=z_0} = S_{z=z_0} - P. \quad (1.3)$$

Полная вертикальная составляющая напряжения представляется в виде суммы масс вышележащих пород и собственной массы водонасыщенного слоя

$$\sigma_z = S_z - P + \gamma_b h, \quad (1.4)$$

где  $h$  — глубина от кровли водонасыщенного слоя до точки, в которой определяется напряжение.

Роль дна сосуда, на которое передается давление воды в модели, в природных условиях выполняет подстилающий водонасыщенный пласт водоупор. Таким образом, давление на кровлю водоупора будет складываться из массы всей вышележащей толщи, в том числе и давления воды, т. е.

$$\sigma_z = (S_z - P + \gamma_b h) + (P + \delta_{ж} h). \quad (1.5)$$

Подставив в это выражение значение  $\gamma_b$  из формулы (1.2), получим

$$\sigma_z = S_z + [\delta_n (1 - n) + \delta_{ж} n] h. \quad (1.6)$$

Выражение, заключенное в квадратные скобки, представляет собой объемную массу водонасыщенного грунта без учета сил взвешивания  $\gamma$ .

Из анализа полученных уравнений видно, что на границе пористой и монолитной сред происходит скачкообразное изменение вертикальной составляющей эффективного напряжения (рис. 7).

У кровли водоносного слоя величина скачка равна давлению воды  $P$ , а у почвы

$$\Delta\sigma_z = P + \delta_{\text{ж}}h. \quad (1.7)$$

Теперь перейдем к рассмотрению вопроса о переходе от среды с развитой пористостью к среде с неразвитой пористостью.

При выводе формулы (1.2) принималось, что каждое зерно полностью взвешено в воде. Это допущение справедливо только в том случае, если вода оказывает давление на всю поверхность зерна. В этом случае интеграл сил по площади равен, в соответствии с законом Архимеда, массе вытесненной жидкости. На самом деле между зернами имеются контактирующие поверхности, где давление воды отсутствует. В качестве примера рассмотрим модель, в которой порода пронизана системой параллельных горизонтальных трубочек радиусом  $r$ ; расстояние между центрами трубочек равно  $L$  (рис. 8).

Выделим элементарный объем породы, длину трубочек примем равной единице, чтобы для простоты рассматривать задачу не в объеме, а в плоскости.

Если напор воды над плоскостью  $z=L/2$  равен  $H$ , то сила давления на зерно сверху составит:

$$F_1 = 2\delta_{\text{ж}} = Hr + 2\delta_{\text{ж}} \int_{L/2-r}^{L/2} (L/2 - z) dx, \quad (1.8)$$

снизу

$$F_2 = 2\delta_{\text{ж}}(H+L)r + 2\delta_{\text{ж}} \int_{L/2-r}^{L/2} \left(-\frac{L}{2} + z\right) dx, \quad (1.9)$$

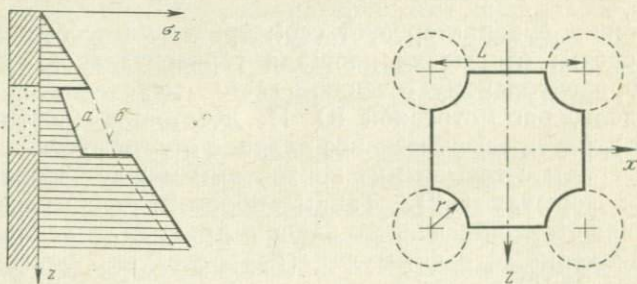


Рис. 7. Распределение вертикальной составляющей напряжения в слое раздельнозернистых пород, залегающих между двумя водоупорами:

$a$  — породы обводнены;  $b$  — породы осушены

Рис. 8. Модель среды с порами в виде горизонтальных трубочек

а разность сил, т. е. взвешивающая сила

$$\Delta F = \delta_{\text{ж}} \left[ 2Lr - 4 \int_{L/2-r}^{L/2} \left( \frac{L}{2} - z \right) dx \right]. \quad (I.10)$$

Величина  $2r$  есть ширина поры, а  $4 \int_{L/2-r}^{L/2} \left( \frac{L}{2} - z \right) dx$  равно площади пор. Обозначив первое через  $a$ , а второе — через  $S$ , получим

$$\Delta F = \delta_{\text{ж}} (aL - S). \quad (I.11)$$

Для рассматриваемой модели  $a=2r$ , а  $S=\pi r^2$ , тогда

$$\Delta F = \delta_{\text{ж}} (2L^2r - \pi r^2) = \delta_{\text{ж}} r (2L - \pi r). \quad (I.12)$$

Масса зерна с учетом взвешивающего действия воды составит

$$\delta_{\text{п}} (L^2 - \pi r^2) - \delta_{\text{ж}} r (2L - \pi r), \quad (I.13)$$

разделив это выражение на  $L^2$ , получим объемную массу с учетом взвешивающего действия:

$$\gamma_{\text{в}} = \delta_{\text{п}} \left( 1 - \frac{\pi r^2}{L^2} \right) - \delta_{\text{ж}} \left( \frac{2r}{L} - \frac{\pi r^2}{L^2} \right), \quad (I.14)$$

или, поскольку  $\pi r^2/L^2 = n$ :

$$\gamma_{\text{в}} = \delta_{\text{п}} (1 - n) - \delta_{\text{ж}} \left( \frac{2r}{L} - n \right). \quad (I.15)$$

В частном случае, при  $r=L/2$  получаем формулу (I.2), характеризующую среду с развитой пористостью.

Нетрудно показать, что выражение справедливо и для других моделей и в общем случае выражение (I.15) имеет вид

$$\gamma_{\text{в}} = \delta_{\text{п}} (1 - n) - \delta_{\text{ж}} (b - n), \quad (I.16)$$

где величина  $b$  характеризует геометрические особенности пористой среды: отношение площади горизонтальной проекции пор к горизонтальному сечению всего выделенного объема. Для модели, рассмотренной Ю. П. Желтовым (вертикальные трубочки),  $b=n$ , взвешивающее влияние отсутствует.

Для среды с точечными контактами между зернами  $b=1$  получаем формулу (I.2). Таким образом, формулы (I.4) и (I.16) являются обобщением закона Архимеда на пористую среду. Значение  $\gamma_{\text{в}}$  в формуле (I.4) следует определять по уравнению (I.16).

До сих пор речь шла об эффективных напряжениях. Истинные напряжения, действующие на каждое из зерен, мы не рассматривали. Такой подход вполне оправдан в том случае, если размер массивов пород, в которых изучается распределение

напряжений, намного больше размеров зерен и нас интересуют лишь осредненные показатели. Однако нередко монолитные блоки пород, разделенные трещинами, имеют крупные размеры, могут разрушаться и изменять характер трещиноватости под влиянием воды.

В качестве примера рассмотрим модель, в которой слой пород, разбитый раскрытыми вертикальными трещинами на блоки прямоугольной формы, залегает между двумя водоупорными слоями. Трещины насыщены водой, имеющей давление  $P$  (рис. 9).

Вертикальная составляющая нормальных напряжений в блоке будет равна массе вышележащих пород  $S_z$ , а горизонтальные — давлению воды  $P$ .

Максимальные касательные напряжения в блоке, в соответствии в законами механики сплошной среды, составят:

$$\tau_{\max} = \frac{S_z - P}{2}. \quad (I.17)$$

Из этой формулы видно, что чем меньше давление воды в трещинах, тем большие касательные напряжения возникают в блоке. Если они превысят предел прочности породы, блок разрушится, в нем образуются наклонные трещины скола, а вертикальные трещины сомкнутся. Эта закономерность объясняет известный факт уменьшения обводненности трещиноватых пород с глубиной. Раскрытые трещины в породах могут сохраняться только при условии, если временное сопротивление пород одноосному сжатию превышает давление массы вышележащих пород за вычетом давления воды. Это положение не распространяется на кавернозные породы, в которых распределение напряжений имеет более сложный характер, хотя в принципе можно было бы вывести аналогичные зависимости для любых сред с заданными геометрическими характеристиками пористой среды.

Таким образом, распределение эффективных напряжений за счет собственной массы пород существенно зависит от гидрогеологических условий. Напряжения скачкообразно уменьшаются при переходе через контакт от водоупорных к водонасыщенным породам. Взвешивающее влияние воды следует учитывать при определении напряжений в пористой среде. Напряжения внутри водоупорных пород определяются с учетом полной массы вышележащих пород, включая и массу воды. Степень взвешивающего влияния зависит от плотности насыщающей породы жидкости, величины пористости и геометрических

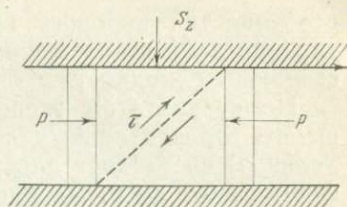


Рис. 9. Схема межтрещинного блока

особенностей порового пространства. Раскрытость трещин на глубине зависит от прочностных свойств пород и давления насыщающей жидкости.

По результатам экспериментальных измерений [74] отношение горизонтальных составляющих напряжений к вертикальным составляет для упругих пород осадочного чехла платформ от 0,2 до 0,5, а для малопрочных, текучих горных пород может достигать единицы.

В складчатых областях распределение напряжений неоднородно, горизонтальные составляющие нередко превышают вертикальную. Однако в любом случае вертикальная составляющая может быть оценена по глубине залегания и плотности вышележащих пород.

Из практики гидроразрыва известно, что при давлениях воды, близких к величине геостатического давления, в породах происходит раскрытие трещин. Поэтому можно принять давление гидроразрыва в качестве верхней границы давления, которое можно искусственно создать в пласте.

В раскрытых системах, где подземные воды имеют непосредственную связь с поверхностью, максимальное давление определяется массой столба жидкости от поверхности до рудовмещающего геологического тела. В полураскрытых системах максимальное давление занимает промежуточное положение между геостатическим и гидростатическим и определяется режимом нагнетания и откачки, гидродинамическими параметрами рудовмещающего водоносного горизонта и условиями его связи с поверхностью.

Для процессов, идущих с участием газовой фазы (например, газификация угля, сжигание серы, возгонка ртути), максимальное давление определяется в закрытых пластах давлением гидроразрыва, а открытых — напором воды. Если условием технологии является исключение возможности притока в рабочую зону подземных вод, то минимальное давление рабочих и продуктивных флюидов должно быть не менее давления пластовых вод.

Таблица 3

H, км	Геостатическое давление, МПа	Давление воды, МПа	Температура, °С	
			коллекторов	вмещающих пород
1	2,5	1,0	40	30
2	5,0	2,0	70	60
3	7,5	3,0	150	100
5	12,5	5,0	240	150
10	25,0	10,0	—	300
15	37,5	15,0	—	400

Температура. Ориентировочные соотношения между глубиной залегания, геостатическим давлением, поровым давлением жидкостей и температурой приводятся ниже (табл. 3) [74].

Возможность и пределы искусственного повышения температуры в недрах зависят от  $PVT$  — соотношения многокомпонентной системы — горной породы и насыщающих ее жидкостей и газов.

Из приведенных выше данных о максимальных давлениях, создаваемых в недрах, можно сделать вывод о возможной температуре нагрева воды на различных глубинах

Глубина, м . . . . .	100	300	600	1000	2000	3000	10000
Давление, МПа . . . . .	0,25	0,75	1,5	2,5	5,0	7,5	25,0
Температура вскипания воды, °С . . . . .	223	292	333	до 374	—	—	—

При температурах от критической до 600—650°С вода постепенно переходит в газ при любых давлениях. Дальнейшее повышение температуры приводит к диссоциации молекул воды.

Ионное произведение воды с температурой увеличивается и составляет: при 22°С —  $1 \cdot 10^{-14}$ , при 50°С —  $5,6 \cdot 10^{-14}$ , при 100°С —  $7,4 \cdot 10^{-13}$ , при 160°С —  $2,5 \cdot 10^{-12}$ , при 200°С —  $4 \cdot 10^{-12}$ , т. е. в 400 раз больше, чем при нормальной температуре.

При температуре 800—900°С уже преобладают диссоциированные формы, а при 1200°С вода полностью диссоциирует. Вода в критическом и надкритическом состояниях резко меняет свойства и растворяющую способность. Так, при температуре 500°С и давлении 100 МПа растворимость на 100 г воды составляет: кварца 2600 г, окиси железа 9 г, барита 4 г, англита 11 г, кальцита 12, сфалерита 20,4 г на 100 г воды.

Геохимическая обстановка. Пустоты и поры руд и вмещающих пород насыщены подземными водами различного состава, характеризующимися разной окислительно-восстановительной обстановкой и кислотно-щелочным равновесием. А. И. Перельман [76] выделяет следующие главнейшие типы обстановок, характеризующихся определенным составом подземных вод.

1. Сильнокислая ( $pH < 4$ ). Характерна для зон окисления. В подземных водах присутствуют  $H^+$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Al^{3+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$  и др.

2. Кислая ( $pH < 6,5$ ). Характерна для бескарбонатных пород в условиях влажного климата.

3. Нейтральная и слабощелочная, гидрокарбонатно-кальциевая ( $pH = 6,5—8,5$ ). Создается в породах, содержащих карбонаты.

4. Нейтральная и слабощелочная, хлоридно-сульфатная ( $pH = 7—8$ ). Подземные воды обогащены  $Na^+$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ . Формируется в соленосных породах.

5. Нейтральная и слабощелочная гипсовая характерна для перехода от зоны интенсивного водообмена к глубинным водам. Подземные воды обогащены  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{SO}_4^{2-}$ .

6. Содовая, щелочная ( $\text{pH} > 8,5$ ). Подземные воды обогащены  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Na}^+$ . Характерна для изверженных и обломочных пород: гранитов, нефелиновых сиенитов, а также кор их выветривания, полимиктовых песчаников и песков.

При осуществлении геотехнологических процессов геохимическая обстановка изменяется. Однако руды и вмещающие породы оказывают тормозящее действие, так как в контакте с ними растворы стремятся к равновесному со средой составу. Степень тормозящего действия определяется химической активностью горных пород. Так, по отношению к кислоте (0,001 н. раствор  $\text{H}_2\text{SO}_4$  в 2%-ном растворе  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) минералы можно расположить в следующий ряд [40]: кальцит, доломит, мусковит, апатит, гипс, родонит, англезит, магнезит, волластонит, смитсонит, хромит, барит, церуссит, нефелин, актинолит, эгирин-авгит, лабрадор, альбит-анортит, роговая обманка, ортоклаз, оливин, гематит, сфалерит, серпентин, диопсид, флюорит, сидерит, ярозит, альбит, магнетит, аурипигмент, буланжерит, антимонит, родохрозит, диаспор, пирит, пирротин, марказит.

По отношению к ионам водорода горные породы делятся на пять типов: 1) антиактивные — изверженные, метаморфические и осадочные горные породы с сульфидами железа; 2) нейтральные — те же породы без сульфидов; 3) весьма слабоактивные — породы с наличием щелочноземельных элементов; 4) повышено активные — породы с трещинами, залеженными кальцитом; 5) сильноактивные — карбонатно-кальциевые породы.

Способность пород к окислению характеризуется их восстановительной емкостью, которая определяется разностью между  $E_h$  в естественном состоянии и при полном окислении всех элементов с переменной валентностью.

#### § 4. Неоднородность и изменчивость горной среды

Невозможность усреднения свойств руд до их переработки — одна из отличительных особенностей геотехнологических процессов. Эти процессы осуществляются непосредственно в недрах, на поверхности контакта или в поровом пространстве горных пород, изменчивых и неоднородных по составу и структуре.

Поэтому большинство зависимостей, известных в химической технологии, гидромеханике и механике, становятся неоднозначными в применении к горной среде.

Под изменчивостью горной среды понимается режим изменения ее состояния, состава и свойств в пространстве и во времени. [17]. Изменчивость может быть закономерной (напри-

мер, фаціальное изменение гранулометрического состава песков) и хаотической.

Неоднородность — это зависимость какого-либо параметра системы от координат в пределах этой системы.

Сплошной называется такая среда, свойства которой не зависят от объема. Горная среда не является сплошной средой, но для решения ряда задач ее можно заменить каким-то идеализированным телом, поведение которого эквивалентно реальной среде. С этой точки зрения любое определение средних свойств какой-либо системы есть не что иное, как нахождение свойств той модели, которая будет использоваться для расчета.

Средние свойства меняются при переходе от системы одного уровня к системе другого уровня. Такое изменение свойств называют масштабным эффектом. Целесообразно различать два его вида: 1) зависимость свойств от линейных размеров внутри системы и 2) эффект при переходе границы системы.

Масштабный эффект первого вида рассматривался рядом исследователей. При этом предполагалось, что распределение некоторого признака в системе носит случайный характер. Из опыта известно, что для таких условий увеличение размера образцов приводит к смещению кривых распределения признака по оси абсцисс и к уменьшению разброса значений.

Свойства образца тем больше отличаются от свойств массива, чем меньше размер образца и чем больше изменчивость свойств массива [33].

Такой подход справедлив только в том случае, если характер закона распределения признака в образце соответствует закону распределения свойств в массиве, т. е. и образец, и массив относятся к системе одного уровня.

Иллюстрацией масштабного эффекта при переходе границы может служить пример определения средней проницаемости для слоистых систем [47] при фильтрации вкрест напластования и вдоль него. В этом случае влияние масштабного эффекта зависит от ориентировки границ неоднородности относительно вектора скорости процесса.

Особенно наглядно это проявляется в системе из блоков, разделенных границами с резко отличающимися свойствами, когда судить о проницаемости по образцу, взятому в пределах слоя, вообще не представляется возможным.

## § 5. Геотехнологические свойства полезных ископаемых и руд

Характер протекания геотехнологических процессов зависит от многих свойств полезных ископаемых, руд и вмещающих пород. Однако наиболее важными являются те свойства, на использовании которых строится сама технология. Такие

свойства, как говорилось выше, называются геотехнологическими.

Условно геотехнологический процесс добычи можно подразделить на три операции: подвод рабочего агента к рудному массиву, взаимодействие, обуславливающее переход ископаемого в подвижное состояние, отвод продуктивных флюидов. Параметры каждой из этих операций определяются соответствующими свойствами.

Доставка рабочего агента может осуществляться:

а) к поверхности обнажения — при подземном растворении солей, гидродобыче с разрывом струей, газификации с предварительной сбойкой;

б) в поровое пространство — при выщелачивании, выплавке теплоносителем, газификации и возгонке без предварительной сбойки. Условия доставки зависят от начальных фильтрационных свойств руд и от их изменений под воздействием геотехнологических процессов;

в) непосредственно в твердую фазу — при выплавке, перегонке и возгонке в электромагнитном поле. В этом случае на условия доставки энергии влияют электрические свойства минералов, руд и массива в целом.

Переход из твердого состояния в подвижное может осуществляться в результате использования следующих свойств: растворимости в воде и в различных химических растворах, плавкости, возгоняемости, разрыхляемости, размываемости, горючести, способности разлагаться с образованием жидких и газообразных составляющих при повышении температуры и т. д.

Отвод продуктов реакции возможен двумя способами — созданием потока в свободной среде и фильтрацией в пористой среде. Этот процесс определяется фильтрационными свойствами и их изменениями под влиянием геотехнологического процесса.

Свойствами, определяющими доставку рабочих агентов и отвод продуктов реакции, являются пустотность, проницаемость, гидропроводность, коэффициент диффузии, электромагнитные и тепловые свойства.

Свойства, определяющие переход из твердого состояния в подвижное. Основные процессы, в результате которых твердые вещества переходят в жидкое или газообразное состояние, следующие: плавление, возгонка, физическое растворение, химическое растворение, горение, разрыв. В принципе могут быть использованы и другие процессы или их комбинации.

В открытых системах самопроизвольно могут протекать только такие процессы, которые ведут к уменьшению внутренней энергии системы. Эти процессы идут до тех пор, пока внутренняя энергия не уменьшится до минимального в данных условиях значения.

Для кристаллических веществ характеристикой внутренней энергии может служить энергия кристаллической решетки.

Критерием возможности протекания тех или иных реакций служит *свободная энергия Гиббса* (или потенциал Гиббса). Она представляет собой долю энергии системы, за счет которой может совершаться полезная работа.

При конкретном рассмотрении в качестве свойств используются параметры уравнений, описывающих конкретный процесс. Рассмотрим эти свойства в соответствии с наиболее распространенными процессами перехода твердого в жидкое.

*Плавление* осуществляется путем нагрева вещества. При этом тепло сначала расходуется на повышение температуры, затем на разрушение кристаллической решетки; после этого происходит нагрев уже жидкой фазы. Расход тепла на нагревание единицы массы вещества на  $1^\circ$  характеризуется удельной теплоемкостью. Количество тепла, необходимое для плавления единицы массы вещества, называется удельной теплотой плавления.

Если вещество при нагревании переходит в пар, минуя жидкое состояние (возгоняется), то затраты тепла на испарение единицы массы характеризуется скрытой теплотой парообразования. Одним из свойств, характеризующих способность вещества к испарению в данных условиях, является давление насыщенного пара, которое увеличивается с ростом температуры. Скорость растворения зависит от концентрации раствора, насыщенного по отношению к данному веществу, и от поверхности соприкосновения фаз. Поэтому для характеристики степени растворимости веществ используются такие свойства, как концентрация насыщенного раствора (которую часто называют просто растворимостью) и величина удельной поверхности. Последняя является одной из характеристик структуры пород. При растворении в пористой среде растворитель соприкасается не со всей поверхностью растворимого компонента, а только с той ее частью, которая образует стенки пор и трещин. Эта величина может быть охарактеризована *коэффициентом доступности* — отношением открытой поверхности к общей поверхности частиц растворимого компонента, а также удельной свободной поверхностью растворимого компонента. Еще одной из важных характеристик растворяемого вещества служит коэффициент диффузии данного вещества в растворителе.

Механизм растворения в химических реагентах более сложен, однако основные закономерности при этом процессе остаются теми же, что и при физическом растворении.

Основными понятиями, характеризующими способность веществ к тем или иным реакциям, являются стандартная свободная энергия (потенциал Гиббса), константа равновесия и окислительно-восстановительный потенциал [27].

*Константа равновесия* представляет собой отношение произ-

ведения активности продуктов реакции к произведению активности реагирующих веществ, причем каждая из активностей возведена в степень, равную числу молей соответствующего вещества. Например, для реакции

$$bB + cC = dD + eE; \quad k = \frac{a^d_D + a^e_E}{a^b_B + a^c_C}. \quad (I.18)$$

Термодинамическая константа равновесия отражает способность минералов реагировать с определенными растворами и показывает, при каких концентрациях наступает равновесие между растворителем и минералом. Заметим, что активность твердых веществ в стандартном состоянии равна единице.

Между стандартной свободной энергией  $\Delta F^0$  и константой равновесия  $k$  существует зависимость, выражаемая уравнением

$$\Delta F_{\text{реак.}} = -RT \ln k, \quad (I.19)$$

где  $R$  — газовая постоянная;  $T$  — абсолютная температура.

Для реакций окисления-восстановления в качестве характеристики свободной энергии используется *окислительно-восстановительный потенциал* — э. д. с. элемента, состоящего из водородного полуэлемента и полуэлемента, состоящего из растворимого вещества и растворителя.

Для оценки условий протекания реакций горения необходимо знать такие свойства, как температура воспламенения, теплотворная способность (тепловой эффект реакции).

Для подземной газификации угля важнейшую роль играют такие его свойства, как содержание летучих веществ, пористость, влажность, содержание золы.

Основными свойствами руд, определяющими условия их размыва, служат их прочностные характеристики, выражаемые сопротивлением пород сжатию и сдвигу, а также гранулометрический состав, который определяет размер частиц, образующихся в результате размыва, и, следовательно, устойчивость гидросмесей. При внутреннем размыве, когда переход в подвижное состояние происходит в результате фильтрации воды в порах, большое значение приобретают пористость и проницаемость породы.

Свойства, определяющие отвод продуктов реакции. Отвод продукционных флюидов может осуществляться в основном двумя способами: потоком в свободной среде (растворение солей, СГД) и фильтрацией в пористой среде. Свойства, определяющие условия фильтрации, были охарактеризованы выше.

Для характеристики условий движения гидросмесей большое значение приобретают такие свойства, как гранулометрический состав, форма зерен и плотность минералов, из которых состоит размываемая порода.

## ФИЗИКО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ И ОЦЕНКА ИХ ВЛИЯНИЯ НА УСЛОВИЯ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

### § 1. Понятие о факторах и методах их оценки

Под физико-геологическими факторами понимают движущие силы какого-либо процесса или же условия, в которых этот процесс протекает.

Для каждого месторождения, обрабатываемого геотехнологическим способом, существует свой перечень факторов, в различной степени влияющих на технико-экономические показатели добычи.

По характеру воздействия целесообразно различать факторы, влияющие на условия подготовки, основной технологический процесс, условия интенсификации, сопутствующие процессы. По степени влияния различают факторы решающие, главные и второстепенные.

Решающие факторы определяют саму принципиальную возможность применения метода добычи. От главных факторов зависят экономические показатели эксплуатации месторождений. Второстепенные факторы не влияют непосредственно на экономику, но только в том случае, если они правильно учтены при выборе системы разработки, технологического режима и технических решений. Чтобы определить рациональный объем и методику изучения месторождений для оценки условий их эксплуатации геотехнологическими методами, необходимо прежде всего знать, какие факторы будут играть определяющую роль.

Целесообразно по степени полноты получаемых представлений о роли тех или иных факторов выделять следующие стадии их изучения: 1) определение перечня факторов и качественного направления влияния каждого из них; 2) разделение факторов на решающие, главные и второстепенные и нахождение крайних значений, при которых геотехнологический процесс осуществим; 3) вскрытие зависимостей между природными факторами и технико-экономическими показателями процесса.

В соответствии с указанными стадиями могут применяться различные способы моделирования процесса: логическое (моделями служат расчетные схемы), лабораторное, натурное (опытные и опытно-промышленные установки), аналоговое (моделями служат предприятия на других месторождениях).

Логическое и лабораторное моделирование. Вопросы моделирования геотехнологических процессов в

последнее время привлекают все большее внимание и освещены в ряде работ [8, 87]. Предприняты попытки дать полное математическое описание некоторых процессов с получением количественных зависимостей. Однако в большинстве случаев использовать аналитические решения возможно только для качественной оценки роли отдельных факторов. Для этого необходимо определить, из каких составляющих складывается технологический процесс, выписать уравнения, описывающие отдельные стороны процесса и их частные решения, найти связь между входящими в зависимости параметрами и характеристиками природной среды, поддающимися определению.

Логическое моделирование дополняют и проверяют путем физического моделирования. При этом должны соблюдаться следующие условия и правила моделирования: натуральный объект и модель должны отвечать условиям геометрического подобия; уравнения, описывающие процессы в натурном объекте и модели, являются общими для всего интервала изменения параметров и переменных; краевые начальные условия в натурном объекте и модели, выраженные в безразмерной форме, должны быть одинаковыми, одноименные безразмерные параметры должны быть равными.

Надо сказать, что добиться точного подобия натуры и модели практически очень трудно. Так, при моделировании процесса подземной выплавки серы [8] этого добиться невозможно. Поэтому в задачу экспериментальных исследований входит изучение и проверка правильности математического описания не процесса в целом, а отдельных его сторон.

Наиболее достоверные данные о параметрах технологического процесса и факторах, их определяющих, дает натурное моделирование.

**Натурное моделирование.** Перед исследователями, намечающими проведение натуральных опытов, возникают вопросы: 1) на какой части рудной залежи следует проводить опыты; 2) каким по величине должен быть опытный участок; 3) каким образом расположить сважины на опытном участке.

Ответ на эти вопросы дает теория геологического подобия и моделирования. Геологическим подобием называется приближенное сходство обобщенных, существенных качеств (однородного в целом) при несхожести частных (неоднородного в точке) [87]. На природные аналоги (натурные модели) распространяются все основные положения общей теории подобия.

С точки зрения теории подобия опытный участок следует рассматривать как модель системы отработки всей залежи (объекта). Опытный участок должен удовлетворять всем требованиям, предъявляемым к модели, т. е. должно соблюдаться равенство критериев подобия и условий однозначности модели и объекта.

Для интерпретации полученных на модели результатов необходимо определить критерии подобия, что является весьма трудной задачей. При натурном моделировании эта задача значительно облегчается тем, что критерии, в которые входят показатели природных факторов, будут совпадать, остается только обеспечить равенство критериев, характеризующих искусственные факторы. Очевидно, если характеристики природных факторов модели будут соответствовать средним характеристикам для всего участка, то масштабные коэффициенты для перехода от модели к объекту будут равны единице. Чтобы обеспечить это условие, участок для проведения опыта должен быть типичным по геологическому строению и гидрогеологическим условиям, а относительная неоднородность его близка к неоднородности объекта.

Этими требованиями и определяются место проведения опыта и величина участка. Другими словами, участок должен включать все основные разновидности руд в соотношениях, характерных для всей залежи, а гидрогеологические параметры водоносного горизонта должны соответствовать средним значениям.

Методика определения критериев подобия опытного участка «натуре» подробно изложена в работе [87]. Вывод критериев включает составление структурной схемы процесса, нахождение величин, определяющих инварианты и коварианты первого порядка, составление в общем виде уравнения связи прогнозируемой величины с остальными и вывод критериев с помощью анализа размерностей.

Натурные эксперименты позволяют получить наиболее надежную информацию о влиянии природных факторов на результаты геотехнологического процесса, однако им свойственны и некоторые недостатки: 1) опытный участок не может характеризовать месторождение в целом, особенно при значительной изменчивости главнейших показателей; 2) для проведения опытов необходимо значительное время; 3) исключается возможность непосредственного наблюдения за процессом; 4) невозможно задавать различные значения факторов и, следовательно, установить влияние каждого из них.

Поэтому для уточнения роли природных факторов широко применяется также метод, основанный на обработке опытных данных при эксплуатации аналогичных месторождений и залежей. При этом существует два различных подхода к решению задачи. Один из них, развитый в работе [87], заключается в установлении аналогии между участками или месторождениями путем сравнения критериев геологического подобия. Результаты эксплуатации по отдельным участкам обрабатываются в виде, удобном для сравнения. В картотеке аналогов находят участок с наиболее близкими показателями и по результатам его обработки осуществляют прогнозирование.

Другой подход [103] основан на установлении связей между входными величинами и результатами эксплуатации путем статистической обработки данных. Использование этого метода позволяет, не вскрывая внутренних закономерностей происходящих в недрах процессов, получить количественные оценки степени влияния природных факторов на результаты процесса.

Для этого прежде всего необходимо из общих представлений, опыта и интуиции выбрать перечень факторов, которые оказывают наиболее существенное влияние на процесс. Затем проводят сбор первичной информации, характеризующей отдельные участки или блоки обрабатываемого месторождения и полученные при их эксплуатации результаты.

Полученная информация обрабатывается на ЭВМ методом множественной корреляции, причем несущественные факторы могут автоматически отсеиваться до тех пор, пока не будет достигнут максимум коэффициента множественной регрессии.

Недостатком статистических моделей является невозможность переноса полученных результатов в геологические условия, существенно отличающиеся от модели. Так, например, при подземной выплавке серы в условиях Язовского месторождения одним из решающих факторов является приемистость серодобычных скважин. В то же время на Гаурдакском месторождении она практически неограничена и является второстепенным фактором.

## § 2. Скважинная гидродобыча

Для СГД наиболее благоприятны месторождения с рудами невысокой механической прочности, перекрытыми относительно прочными или пластично деформирующимися породами.

Наиболее важным фактором являются физико-механические свойства руды, определяющие энергетические затраты на образование гидросмеси. Целесообразно различать рыхлые, связные, полускальные и скальные руды. К рыхлым (раздельнозернистым) относятся пески различного гранулометрического и минерального состава.

Важнейшей характеристикой песчаных пород является их гранулометрический состав. К пескам относятся частицы размером от 0,05 до 2 мм. Частицы от 0,05 до 0,001 мм относятся к пылеватой фракции, а более мелкие — к глинистой. В зависимости от соотношения содержаний частиц различных размеров пески подразделяются на моно- и полидисперсные. К монодисперсным относятся пески, в которых та или иная фракция содержится в количестве не менее 80%. Пески могут содержать до 3% глинистых частиц; тогда их называют глинистыми. Породы, в которых содержится от 3 до 10% глинистой фракции, называют супесями, последние уже относятся к связным породам. Основное значение гранулометрического состава заключа-

ется в том, что он определяет скорость, при которой частицы переходят в подвижное состояние и транспортируются потоками жидкости.

Минеральный состав руд определяет плотность частиц, а также влияет на их прочностные свойства. Очень важное значение имеет содержание, даже в незначительных количествах, глинистых минералов и органики, которые определяют устойчивость пульпы, а также примеси карбонатного вещества, чаще всего служащего цементом.

Существенную роль играет соотношение плотностей рудных и породообразующих минералов. Различия в плотности приводят к их гравитационному разделению. Это может вызвать потери полезного ископаемого или, наоборот, обогащение гидросмеси. Таким образом, характерным свойством раздельнозернистых пород является их легкая разрушаемость.

Особенностью связных руд является зависимость их свойств от степени увлажнения. Как правило, будучи насыщены водой, такие породы переходят в текучее состояние. Одним из характерных свойств водонасыщенных связных пород является тиксотропия.

Характерной чертой глинистых пород является зависимость их пористости и влажности, а следовательно, и деформационных свойств от глубины залегания, солевого состава поровых вод, состава обменных катионов, минерального состава глинистых частиц. В зависимости от влажности связные породы могут находиться в твердой, пластичной и текучей консистенциях.

Будучи в пластичной консистенции, связные породы могут выдавливаться горным давлением и течь в горные выработки. На этом их свойстве основан предложенный и теоретически разработанный в Институте гидродинамики СО АН СССР метод безвскрышной добычи погребенных россыпей [56].

Для связных пород характерны более высокие энергетические затраты на образование гидросмеси и ее устойчивость, позволяющая легко транспортировать последнюю. Усложняются условия отделения воды от твердого на поверхности.

Наиболее распространенными полускальными породами являются песчаники, плотные глины и глинистые сланцы, бурые угли, мергель, мел. Свойства сцементированных песчаников определяются характером и минеральным составом цемента. Наиболее распространен глинистый, карбонатный и кремнеземистый цементы.

Песчаники с контаковым и поровым типами цемента обычно водопроницаемы, что позволяет осуществить предварительную обработку их с целью снижения прочности (например, растворение цемента, введение ПАВ или питательной среды для бактерий и т. п.).

Устойчивость гидросмесей после разрушения определяется гранулометрическим и минеральным составом зерен породы.

Условия разработки	Механические свойства руды	Свойства покрывающих пород	Форма рудных тел
Хорошие	Рыхлые	Прочные монолитные	Мощные, крутопадающие
Средние	Связные, полускальные	Прочные трещиноватые, пластичные	Горизонтальные или наклонные, средней мощности
Требующие конкретного анализа	Скальные	Рыхлые	Тонкие горизонтально залегающие

По характеру свойств покрывающих пород целесообразно различать прочные монолитные (породы — мосты), трещиноватые пластичные и рыхлые породы. Наиболее благоприятны для СГД залежи, перекрытые монолитными и пластичными породами.

Большое влияние на условия СГД оказывают форма и элементы залегания рудных тел. Благоприятны для отработки крутопадающие рудные тела, в которых размыв может осуществляться снизу вверх, а гидросмесь откачиваться из нижней части камеры размыва. Такая же технология может применяться в пластах большой мощности.

Наконец, последним и очень важным фактором является обводненность месторождения. В условиях малой обводненности может быть осуществлено осушение или отжатие воды из камеры, что обеспечивает размыв в незатопленной среде. В зависимости от степени обводненности выбирается схема снабжения энергетической водой.

Зависимость условий применения СГД от различных факторов наглядно представлена в табл. 4.

### § 3. Подземное выщелачивание

*Минеральный состав* полезного ископаемого определяет саму возможность применения выщелачивания. К минералам, растворимым в воде, относятся хлориды, сульфаты и карбонаты щелочных металлов. В кислотах растворяется большинство окислов, гидроокислов, карбонатов и сульфидов.

Влияние минерального состава можно проиллюстрировать на примерах урана и меди.

В зависимости от валентности урана различают три группы урановых минералов [40]: 1) минералы, образованные четырех-

валентным ураном (браннерит, давидит, тантало-ниобат и др.); 2) минералы, в которых принимают участие четырех- и шестивалентный уран (простые окислы, относящиеся к группам уранита и настурана, гидросиликаты и др.); 3) минералы, образованные шестивалентным ураном (гидроокислы, сульфаты, карбонаты, фосфаты, арсениты, ванадаты и др.).

Первая группа минералов характерна для магматических и пегматитовых, вторая — для гидротермальных и отчасти осадочных, третья — для экзогенных месторождений.

При переработке руд шестивалентного урана извлечение в раствор составляет 90—98%. Выщелачивание четырехвалентного урана затруднено; в этом случае необходимо предварительное окисление урана до шестивалентного. Окисление может проводиться различными способами. Чаще всего в растворы добавляют окислители: азотную кислоту, пиролюзит, кислородсодержащий газ и т. п. Шестивалентные минералы урана хорошо растворяются также в карбонатных растворах (сода, карбонат аммония) тогда как четырехвалентный растворяется в них только в присутствии окислителей. Таким образом, несмотря на большое разнообразие урановых минералов, большинство из них легко растворяются в слабых кислотах и щелочах.

Минералы меди весьма многочисленны (более 150). Самым распространенным из них является халькопирит. Он растворяется в азотной кислоте с выделением серы, в других кислотах практически нерастворим. В присутствии кислорода халькопирит окисляется, переходя в сульфаты железа и меди, а затем в карбонаты, окислы и гидроокислы. При взаимодействии с сульфатом трехвалентного железа халькопирит переходит в легко растворимую сульфатную форму. Аналогичные халькопириту свойства имеют борнит и другие минералы — сульфиды меди. Окисленные минералы (малахит, азурит, хризоколла; куприт и др.) легко растворимы в кислотах.

Минералы золота в отличие от урана и меди весьма немногочисленны. Чаще всего встречается самородное золото, в котором в качестве изоморфных примесей присутствуют палладий, родий, иридий, платина, серебро, висмут. Самородное золото взаимодействует с образованием растворимых продуктов реакции с галогенами, царской водкой, кислотами в присутствии окислителей, цианистыми солями, ртутью, гидросульфидами щелочных металлов.

*Состав породообразующих минералов* при выборе выщелачивающих агентов имеет не меньшее значение, чем минеральный состав полезного ископаемого.

По характеру взаимодействия с растворителем породообразующие минералы можно подразделить на следующие группы: а) инертные; б) взаимодействующие с рабочим агентом без образования вредных продуктов реакции; в) взаимодействующие с растворителем с образованием продуктов реакции, ухудшаю-

щих условия выщелачивания; г) минералы, способствующие выщелачиванию.

При подземном выщелачивании урана кислотами примерами инертных минералов являются кварц, полевые шпаты и другие силикаты, слабо взаимодействующие с кислотой. К минералам второй группы относятся глинистые минералы, взаимодействие которых с рабочим агентом сводится к ионному обмену и коагуляции коллоидов, а также, возможно, к частичному растворению.

К минералам, оказывающим вредное влияние, относятся прежде всего карбонаты. Широко распространенный в рудах кальцит, вступая в реакцию с серной кислотой, образует гипс и углекислый газ. Гипс, обладающий слабой растворимостью, выпадает в порах, коагулируя их и препятствуя дальнейшему движению растворов. Ту же роль играет и углекислота, которая заполняет наиболее крупные поры и тем самым снижает относительную проницаемость руд часто до нуля. Поэтому при содержании в рудах кальцита в количестве более 5% выщелачивание считается чрезвычайно затрудненным. К минералам, способствующим выщелачиванию, относятся сульфиды железа: пирит, мельниковит и др. В зоне окисления эти минералы разлагаются с образованием свободной серной кислоты, и в ряде случаев эта кислота сама служит выщелачивающим агентом.

Комплексной характеристикой вещественного состава руд может служить кислотоемкость, характеризующая количество рабочего агента, нейтрализуемого единицей массы руды и выражаемая обычно в процентах. Кислотоемкость в значительной степени определяет затраты рабочих агентов на единицу добытого полезного ископаемого и, соответственно, экономические показатели.

Важную роль играет минеральный состав руд при микробиологическом выщелачивании. Так, например, присутствие хлоридов и молибдена тормозит развитие использующихся для выщелачивания бактерий *Thiobacilles ferrooxidans*, в то же время наличие закисного железа и сульфидных минералов увеличивает их активность.

Для того чтобы извлечь полезное ископаемое из рудной залежи, необходимо обработать растворителем как саму рудную залежь, так и связанные с ней водоносные породы. В результате диффузии и капиллярных явлений растворами прорабатывается и часть водоупоров. При этом растворитель будет нейтрализован из-за реакции с вмещающими породами.

Чтобы определить целесообразность выщелачивания, следует сравнить количество (стоимость) растворителя, который будет нейтрализован, с извлекаемыми запасами (стоимостью) полезного ископаемого.

При диффузионном выщелачивании содержание полезного ископаемого в руде определяет также и возможность получе-

ния растворов промышленной концентрации. Величина концентрации продуктивного раствора не может быть выше, чем концентрация в поровом растворе внутри руды. Максимально возможное значение последней определяется отношением содержания полезного ископаемого в единице объема руды к объему порового пространства.

*Структура и текстура руд* определяют степень доступности минералов полезного ископаемого. Характеристикой доступности может служить площадь поверхности минералов в единице объема руды, образующая стенки сообщающихся пор. Как известно, скорость реакции прямо пропорциональна площади контакта реагента с веществом, поэтому чем больше доступность минералов полезного ископаемого, тем быстрее идет выщелачивание. В связи с этим наиболее благоприятными для выщелачивания являются руды, в которых минералы полезного ископаемого образуют пленки на стенках трещин и пор, или представлены в виде зерен среди песчаных пород. Первая структурно-текстурная разновидность особенно характерна для зон окисления и вторичного обогащения коренных месторождений; вторая — для эпигенетических месторождений.

*Пористость* руд является одним из основных факторов, определяющих ход выщелачивания. При отсутствии (или весьма низких значениях) пористости рудные минералы оказываются недоступными для растворов. Обычно руды экзогенного происхождения обладают достаточно высокой пористостью, но характер ее может быть различным. Выщелачивание руд, обладающих активной пористостью, происходит фильтрационным путем. Процесс выщелачивания идет тем быстрее, чем больше активная пористость. Для руд, не обладающих активной пористостью, возможно только диффузионное выщелачивание, при всех условиях протекающее намного медленнее, чем фильтрационное.

*Проницаемость* руд определяет скорость фильтрации раствора при заданном градиенте давлений. Как правило, чем выше проницаемость, тем быстрее идет выщелачивание при благоприятной структуре руды. Однако на условия выщелачивания влияют не только фильтрационные свойства самой руды, но и соотношение их со свойствами вмещающих пород.

По этому признаку рудные залежи можно подразделить на:

1. Проницаемые водонасыщенные руды, залегающие среди водоупорных вмещающих пород. Они наиболее благоприятны для выщелачивания, так как фильтрация происходит только по руде. Концентрация продуктивных растворов может достигать высоких значений. Потери вещества-растворителя складываются из расхода на отработку руды и практически ничтожных потерь на диффузию в кровлю и почву пласта.

2. Проницаемые руды залегают среди проницаемых вмещающих пород, являясь частью водоносного горизонта. В этих условиях фильтрация рабочих растворов происходит как по рудам,

так и по вмещающим породам. Продуктивный раствор в результате поперечной диффузии распространяется и в безрудные породы. При больших мощностях безрудных пород и небольшом расстоянии между нагнетательными и дренажными рядами по некоторой части пласта поступает рабочий раствор, не содержащий полезный компонент. В результате происходит снижение концентрации откачиваемых растворов, степень которого зависит от соотношения мощностей и коэффициентов фильтрации руд и вмещающих пород, числа поверхностей раздела рудных и безрудных слоев, скорости и длины пути фильтрации растворов. Кроме того, установлено, что рабочие растворы, будучи высокоминерализованными, наиболее быстро вытесняют воды из нижней части пласта. Поэтому нахождение руд в этой части пласта создает более благоприятные условия для выщелачивания. Расход выщелачивающего агента для залежей второго типа определяется кислотоемкостью пород, слагающих весь водоносный горизонт.

3. Слабопроницаемые маломощные руды залегают среди проницаемых пород. Выщелачивание залежей этого типа может происходить лишь вследствие диффузии, возможно только при малой мощности прослоев (до 10—15 см) и при частом их чередовании с проницаемыми породами.

4. Сложные условия залегания: часть руд является проницаемой, а часть — водупорной. Основной особенностью выщелачивания в таких условиях является то, что извлечение металла из слабопроницаемых руд начинается только после полного выщелачивания проницаемых. Причиной этого являются высокие концентрации продуктивных растворов в проницаемых рудах, что может привести даже к диффузии полезного компонента в поровое пространство слабопроницаемых руд.

5. Слабопроницаемые руды большой мощности среди проницаемых пород.

6. Слабопроницаемые руды среди слабопроницаемых пород.

Разработка руд последних двух типов без предварительной подготовки невозможна, так как нельзя обеспечить фильтрацию рабочих растворов в поровом пространстве руд без их предварительного рыхления. Что же касается диффузии, то замедленность этого процесса может быть проиллюстрирована следующим примером [71]. Чтобы выщелочить гипс, содержащийся в количестве 0,1% по массе в слое глины мощностью 1 м, понадобится 50 лет. Тот же процесс в слое мощностью 0,4 м будет продолжаться 12 лет, а в слое 0,25 м — 3 года. Можно предположить, что и другие элементы будут извлекаться приблизительно с такой же скоростью.

Перечисленные свойства руд играют ту же роль и при микробиологическом выщелачивании металлов.

Очевидно, что наиболее благоприятными являются такие условия, когда рудное тело является одновременно и водоносным

горизонтом. В этих условиях происходит конвективное выщелачивание, при котором концентрация полезного компонента в растворе достигает высоких значений.

Если проницаемое рудное тело составляет лишь часть водоносного горизонта, то по безрудной части фильтруются пустые растворы, которые, смешиваясь в дренажных скважинах с продуктивными растворами, разбавляют последние.

Процессы диффузии приводят к уменьшению степени разбавления, причем диффузия сказывается тем заметнее, чем больше скорость фильтрации и чем меньше мощность безрудных слоев.

Наличие безрудных проницаемых прослоев приводит к снижению максимальной концентрации, а начало и конец выходной кривой становятся более пологими.

Выщелачивание из руд, обладающих только диффузионной проницаемостью, возможно при их предварительном разрыхлении, а также в том случае, когда руды чередуются с проницаемыми породами в виде тонких прослоев.

Полное извлечение полезного ископаемого из руды в результате диффузии практически невозможно (если при этом не меняется проницаемость руд).

*Граничные гидрогеологические условия.* Наиболее благоприятны для выщелачивания такие условия, когда водоносный горизонт полностью или частично ограничен в плане водоупорными породами. Разбавления или утечки раствора весьма трудно избежать в том случае, если водоносный горизонт имеет гидравлическую связь с поверхностными водами. Аналогичное влияние на условия выщелачивания оказывает граница с водоносным горизонтом гораздо большей водообильности, чем тот, к которому приурочены руды.

Условия работы установки подземного выщелачивания во многом определяются также климатическими факторами. Типизация условий подземного выщелачивания, по В. П. Новик-Качану [69], приводится в табл. 5.

Факторы, определяющие условия предварительного разрыхления, прежде всего включают такие характеристики, как глубина залегания, мощность и форма рудных тел, механические свойства руд и вмещающих пород [14].

Имеется ряд предложений [14, 78] дробление залежей большой мощности осуществлять ядерными взрывами, при которых затраты на 1—2 порядка ниже, чем при использовании обычных ВВ. Глубина залегания определяет форму зоны разрушения: при взрыве на небольшой глубине образуется воронка, а при камуфлетном взрыве на больших глубинах — столб обрушения.

При небольших размерах рудных тел для разрыхления применяют обычные ВВ, причем для эффективного дробления приходится проходить специальные подземные выработки, компонен-

Группа месторождений по степени связности горнорудной массы	Основные природные факторы выщелачивания	Типы месторождений по совокупности природных факторов выщелачивания			
		I тип — весьма благоприятные	II тип — благоприятные	III тип — неблагоприятные	IV тип — весьма неблагоприятные
Сыпучие	Среднее содержание полезного компонента, %	Более чем в 5 раз выше минимального промышленного	В 2—5 раз выше минимального промышленного	Минимальное промышленное	Ниже минимального промышленного
	Состав рудной минерализации	Самостоятельные окисленные минералы	Самостоятельные минералы; полезный компонент на 50% в закисной форме; имеются сульфиды	Большая часть полезного компонента в виде изоморфных примесей; самостоятельные минералы гипогенные	Полезный компонент связан с битумами или фосфатами
	Коэффициент фильтрации, м/сут	2,0—8,0	1,0—2,0; 8,0—10,0	0,1—1,0	До 0,1; >10,0
	Коэффициент фильтрационной неоднородности, доли единицы	1,0	1,0—0,75	0,75—0,50	0,50—0,25
	Глубина залегания от поверхности, м	до 150	150—800	300—500	500
Характер водоупоров и их мощность, м	Региональный, 5	Региональный, 5	Локальный, 5	Отсутствует	
	Соотношение мощностей в продуктивном пласте	1:1	1:1—1:5	1:5—1:10	1:10
	Режим подземных вод	Напорный; самоизлив на поверхность	Напорный; пьезометрический уровень на глубине до 50 м	Напорно-безнапорный; уровень выше кровли продуктивного пласта	Безнапорный; статический уровень — на отметке кровли рудных тел
Пластичные	Карбонатность, %	0,0	0,0—1,0	1,0—2,0	2,0
Скальные	Среднее содержание полезного компонента, %	Более чем в 5 раз выше минимального промышленного	В 2—5 раз выше минимального промышленного	Минимальное промышленное	Ниже минимального промышленного
	Состав рудной минерализации	Самостоятельные окисленные минералы	Самостоятельные минералы; полезный компонент на 50% в закисной форме; имеются сульфиды	Большая часть полезного компонента в виде изоморфных примесей; самостоятельные минералы гипогенные	Полезный компонент связан с битумами или фосфатами
	Характер рудной минерализации	Налеты и корочки на стенках открытых трещин и пор	Мелкопрожилковая, цементирующая трещина горной породы	Массивная, жильная по крупным трещинам	Вкрапленная, рассеянная по всей массе горной породы
	Глубина залегания, м	100—150	150—300	300—500	До 50—100; в зоне региональной трещиноватости более 500
	Угол падения рудных тел, градус	60	60—80	До 30	0
Гидрогеологические условия	Подземные воды отсутствуют	Поступление подземных вод в виде капеза	Приток подземных вод по локальному разлому; возможен дренаж	Поступление подземных вод из зоны региональной трещиноватости и локальных разломов	
Карбонатность, %	0,0	0,0—0,1	1,0	>1,0%	

сирующие увеличение объема взорванной массы. При такой технологии подготовительных работ на условия добычи оказывают влияние все те факторы, которые оказываются при обычных горных разработках.

#### § 4. Подземная выплавка

Факторы, определяющие процесс подземной выплавки, во многом сходны с факторами, влияющими на условия выщелачивания, поскольку процессы в том и другом случае осуществляются в пористой среде. Однако подземной выплавке свойственны и существенные отличия. Теплоноситель и добываемое полезное ископаемое образуют две несмешивающиеся жидкости (вода—сера, вода—битум), отличающиеся по плотности, вязкости и поверхностным свойствам. Это обуславливает целый ряд отличий в закономерностях фильтрации: гравитационное разделение, снижение относительной проницаемости, капиллярные эффекты и т. д. Типизация условия разработки серных месторождений приводится в табл. 6.

Влияние структуры и текстуры руды. Исследованию влияния структурно-текстурных особенностей руд и вмещающих пород посвящен целый ряд работ. Установлено, что для подземной выплавки пригодны только карбонатные разности руд. Степень извлечения серы из руды увеличивается по мере перехода текстуры от рассеянной до гнездовой и полосчатой от 15—20 до 60—70% [108].

Зависимость между серосодержанием  $S$  и выплавляемостью  $\eta$  выражается уравнением

$$\eta = aS + b; \quad S > S_{\text{ост.}}, \quad (\text{II.1})$$

где  $a$  и  $b$  — коэффициенты, зависящие от текстуры руды;  $S_{\text{ост.}}$  — остаточное серосодержание.

Поскольку содержание серы в пределах одного месторождения изменяется незначительно, то можно считать, что выплавляемость зависит только от структурно-текстурных особенностей руд.

Влияние содержания серы, текстуры и структуры руды не ограничивается выплавляемостью. Эти показатели определяют также устойчивость рудного скелета после выплавки. По этому признаку различают руды устойчивые и разрушающиеся, причем по характеру образующегося материала последние делят на крупнообломочные и дисперсные. В условиях Гаурдакского месторождения дисперсный остаток образуют метасоматические гипс-кальцитовые руды. Обрушение скелета приводит здесь к перекрытию перфорации серной колонны, в результате чего скважины нередко выходят из строя.

Влияние мощности серной залежи. Мощность серной залежи представляет собой один из наиболее важных

факторов, влияние которого проявляется многосторонне и противоречиво. С точки зрения теплотеря влияние мощности заключается в их уменьшении с ростом мощности [5]. Так, при сроке отработки два года потери при мощности 10 м составляют 35% от общих затрат тепла, а при мощности 20 м — 17%.

Мощность рудной залежи определяет также профиль вытеснения пластовых вод теплоносителем. Чем больше мощность пласта, тем с большим расходом нужно подавать теплоноситель, чтобы добиться вытеснения пластовых вод по всему сечению.

Влияние элементов залегания пласта. При углах наклона, больших предельного угла фильтрации серы, коэффициент охвата пласта резко увеличивается и извлечение в принципе может приблизиться к величине выплавляемости.

Большое значение имеет изменчивость рельефа подошвы пласта. При отработке пластов со сложным рельефом необходимо, чтобы добычные скважины с заданной степенью вероятности попадали в понижения рельефа, т. е. следует уплотнять сеть эксплуатационных или эксплуатационно-разведочных скважин на залежах со сложным рельефом.

Элементы залегания пласта учитываются при выборе направления отработки. В ряде случаев на границе зоны плавления движения теплоносителя по руде затруднено и он движется преимущественно по верхней части пласта, а также по покрывающим безрудным известнякам. По направлению падения поверхности непроницаемой кровли и границы зоны плавления пересекаются, из-за этого может происходить полное перекрытие путей движения теплоносителя расплавленной серой и его движение в этом направлении часто прекращается (рис. 10). Поэтому месторождения пластового типа наиболее целесообразно обрабатывать по направлению простирания пласта. Аналогичная картина наблюдается при наличии сбросов.

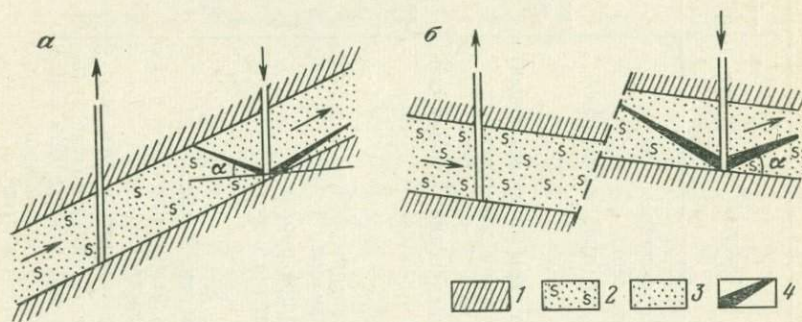


Рис. 10. Влияние наклона пласта (а) и тектонических нарушений (б) на условия фильтрации серы.

1 — водоупор; 2 — серная руда; 3 — выплавленная зона; 4 — жидкая сера. Стрелками показано направление движения теплоносителя и воды

Таблица 6

Показатели	Условия разработки		
	хорошие	удовлетворительные	требующие конкретного анализа
Среднее содержание серы, %	>20	20—10	< 10
Извлечение серы, %	>70	70—40	< 40
Текстура руд (преобладающая)	Полосчатая, прожилковая, прожилковато-гнездовая	Гнездово-вкрапленная, прожилковато-вкрапленная	Дисперсная
Структура серы (преобладающая)	Явнокристаллическая	Скрытокристаллическая	—
Литологический состав пласта	Кавернозный известняк	Слабокавернозный известняк	Плотный некавернозный известняк
Гидрогеологические условия серной залежи	Гидрогеологически закрытая залежь	Разгрузка вод затруднена и находится на значительном удалении от залежи	Гидрогеологически раскрытая залежь
Водопоглощение, м <sup>3</sup> /ч на 1 м мощности при давлении 1 МПа	0,5—1	(0,1—0,5); (1—3)	>3; <0,1
Покрывающие породы	Водонепроницаемые	Слабоводонепроницаемые	Водонепроницаемые
Подстилающие породы	Водонепроницаемые или с незначительной фильтрацией	Водонепроницаемые ниже, чем у пород сероносного пласта	Водонепроницаемые выше, чем у пород сероносного пласта
Мощность серной залежи, м	>10	10—3	<3
Мощность безрудных слоев в сероносном пласте, м	—	1—3	>5
Глубина до серной залежи, м	120—500	80—120; 500—1000	<30; >100
Запасы серы на мощность предприятия 100 тыс. т в год (при изменении мощности запасы пропорционально изменяются), млн. т	3	3—1	<1

Влияние глубины залегания пласта. Минимальная глубина залежей составляет 70—80 м, поскольку избыточное давление теплоносителя с температурой 160°C составляет 0,53 МПа. На меньших глубинах может произойти вскипание теплоносителя и гидроразрыв пласта. Во избежание последнего максимальное устьевое давление теплоносителя должно быть меньше 70% от полного горного давления.

Влияние мощности и проницаемости надрудных известняков. Наличие надрудных неосерненных известняков характерно для многих серных месторождений. При подаче теплоносителя в пласт его фильтрация, независимо от конструкции скважины, осуществляется по всей мощности рудовмещающего водоносного горизонта, включая неосерненные известняки. Поэтому на их прогрев расходуется определенная доля тепла, которая должна учитываться при расчете удельного расхода теплоносителя. Наряду с этой отрицательной ролью, известняки выполняют роль проводника для теплоносителя, а это в условиях плотных руд является даже благоприятным для ведения процесса.

При подземной выплавке с нагревом руд токами высокой частоты влияние природных факторов на условия протекания процесса существенно отличается. На первый план выступают электрические свойства горных пород, руд и полезного ископаемого: удельное электрическое сопротивление и диэлектрическая постоянная. Эти факторы, в свою очередь, зависят от минерального состава, структурно-текстурных характеристик руды, пористости, состава поровых растворов. Замечательным свойством технологии высокочастотной выплавки является возможность нагрева руд, непроницаемых для обычного теплоносителя. Таким образом, если при обычной технологии ПВС начальная проницаемость руд является главным фактором, то при высокочастотной выплавке ее роль становится второстепенной. Более того, при высокой проницаемости циркуляция подземных вод обуславливает охлаждение зоны нагрева и потери тепла за счет отработки.

## § 5. Подземная газификация

Наиболее изучен процесс *подземной газификации угля* (ПГУ). Условия его применения и влияние природных факторов на этот процесс охарактеризованы в работах [7, 96, 98].

Одна из основных особенностей процесса ПГУ заключается в том, что он протекает одновременно по обнаженной поверхности канала газификации и в пористой среде прилегающего к каналу ненарушенного массива. Поэтому он занимает промежуточное положение между чисто фильтрационными процессами и процессами, происходящими на поверхности обнажения, и является одним из наиболее многофакторных процессов.

Основным геотехнологическим свойством угля является его *состав* (содержание летучих веществ, кокса, влаги, золы и т. д.).

С увеличением *зольности* угля снижается теплота сгорания газа. Так, с повышением зольности от 40 до 50% теплота сгорания уменьшается на 20%. Уменьшается также выход газа с единицы массы газифицируемого массива. Влажность угля играет как положительную, так и отрицательную роль. Влияние ее на выход газа аналогично влиянию золы. Однако наличие влаги способствует повышению теплотворной способности получаемого газа. Добавка пара к воздуху вызывает повышение концентрации водорода в газе от 10 до 15—20%.

Большое влияние на условия газификации оказывают такие свойства углей, как *выход летучих веществ*, кокса и т. п. Однако в принципе для газификации пригодны практически любые угли, в том числе окисленные, непригодные для использования в других технологических процессах.

Среди факторов, определяющих условия ПГУ, следует особо выделить те, от которых зависит способ создания каналов в угольном пласте. Возможность фильтрационной сбойки определяется *гидропроводностью* угольного пласта и соотношением последней с гидропроводностью вмещающих пород. Если последние более проницаемы, чем угли, фильтрационная сбойка неосуществима. На скорость сбойки и удельный расход дутья влияют зольность угля, пористость, проницаемость и гидрогеологические условия.

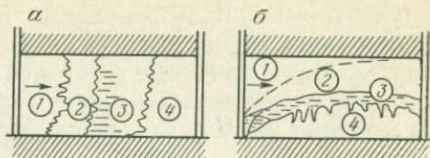
При низкой проницаемости угольного пласта применяют сбойку гидроразрывом с последующей огневой проработкой щелей гидроразрыва. В крутопадающих пластах сбойка осуществляется бурением наклонных и наклонно-горизонтальных скважин.

Одним из наиболее прогрессивных методов сбойки является электротепловой пробой угольного пласта. Характеристикой, отражающей условия электросбойки, служит критическое напряжение, при котором происходит пробой. Оно изменяется в широких пределах (1100—6000 В) в зависимости от типа угля, его зольности и влажности.

Выбор системы разработки (конструкции подземного генератора) определяется *формой и элементами залегания угольных пластов*, а также гидрогеологическими условиями. Мощность угольного пласта непосредственно влияет на теплоту сгорания получаемого газа. Наиболее существенно это влияние в интервале изменения мощности от 0 до 2 м; при дальнейшем ее увеличении качество газа повышается незначительно.

Влияние *гидрогеологических условий* рассматривается в ряде работ [96, 98]. При слабой обводненности вода в количестве до 0,5 м<sup>3</sup>/ч выпаривается в процессе газификации. При водопритоке до 1 м<sup>3</sup>/ч водоотлив ведется из выгуживаемого пространства через скважины. Высокие водопритоки резко усложняют про-

Рис. 11. Схема процесса ПГС:  
*а* — начальная стадия; *б* — основная стадия; 1 — выгоревшая зона; 2 — зона испарения и горения; 3 — зона плавления; 4 — неизменные руды



цесс газификации и нередко вызывают полное его расстройство [96], что требует сооружения специальных дренажных устройств. Способ осушения выбирается в зависимости от гидрогеологических характеристик над- и подугольных отложений.

Влияние свойств надугольных пород на процессы сдвижения пород над выгасованным пространством рассматривается в книге [96]. Отмечается, что практическое значение здесь приобретает характер сдвижения пород с точки зрения обеспечения герметичности системы. В отличие от сдвижения над обычными горными выработками, при ПГУ этот процесс протекает плавно, в течение длительного времени. В Подмосковном бассейне, где покрывающая толща представлена в основном песчано-глинистыми породами, сдвижение происходит без нарушения сплошности и сопровождается уплотнением зольного остатка. В Кузбассе, где покрывающие породы непластичны, происходили провалы с образованием воронок на поверхности. Для предотвращения утечек газа эти воронки приходилось заполнять глиной.

Много общего с процессом ПГУ имеет находящийся в стадии опытных работ процесс *газификации серы*. Проведенные на крупных моделях (длина 40 м, мощность слоя 1 м) опыты показали, что процесс достаточно легко управляем и позволяет получать промышленные концентрации сернистого газа.

В начальной стадии процесс ПГС является чисто фильтрационным. Очаг горения в направлении его продвижения состоит из следующих зон: 1) выгоревшей части пласта; 2) горения; 3) испарения серы в результате разогрева отходящими газами; 4) неизменных пород. В этой стадии ход процесса определяется величиной серосодержания, структурно-текстурными характеристиками руды, начальной пористостью и проницаемостью. В дальнейшем, под влиянием выделения тепла происходит интенсивный прогрев залежи газами, распространяющимися по поровому пространству, что сопровождается плавлением серы и стеканием ее вниз. В результате поровое пространство заполняется жидкой серой, а процесс горения осуществляется в узкой щели вдоль кровли пласта, постепенно распространяясь вниз (рис. 11). В этой стадии процесс ПГС приобретает сходство с подземной выплавкой. Большое значение приобретает *рельеф кровли* пласта. Участки, расположенные ниже зоны горения, заливаются жидкой серой и становятся непроницаемыми для

воздуха и газа. В то же время вышележащие части массива, освобождаясь от части серы вследствие выплавки, приобретают наиболее благоприятные для горения свойства: высокую проницаемость, наличие остаточной серы на стенках пор. Поэтому очаг горения распространяется в направлении восстания серной залежи.

Свойства выгоревшей зоны определяются содержанием серы в руде, составом рудного скелета, структурой и текстурой руды. Бедные руды с гнездовой и вкрапленной текстурами выгорают с сохранением целостного высокопроницаемого остатка, в то время как богатые гнездово-прожилковые и дисперсные руды полностью рассыпаются, образуя золу, покрывающую горящую жидкую пленку серы слабопроницаемым слоем, над которым образуется щель.

Увеличение мощности залежи при ПГС играет скорее отрицательную роль: снижается концентрация газа, так как большая часть воздуха проходит в верхней, выгоревшей части пласта, не участвуя в процессе горения. Увеличивается возможность обрушения рудного скелета и кровли пласта, создается опасность провалов и разгерметизации очага горения.

В настоящее время ПГС планируется для отработки остатков сухих запасов серных руд. Возможность отработки обводненных запасов зависит от условий предварительного осушения и определяется гидрогеологическими условиями месторождения.

## § 6. Подземное растворение

Основным технологическим свойством солей, обрабатываемых методом подземного растворения, является их *растворимость* в воде и *скорость растворения*, зависящие от минерального состава и температуры. С технической точки зрения добычу каменной и калийной солей, а также бишофита и некоторых других легкорастворимых минералов можно осуществить практически в любых условиях.

Таблица 7

Глубина, м	Содержание нерастворимых примесей, %					
	0-5	10	15	20	25	30
400	30	35	40	45	60	70
800	45	55	60	65	80	90
1600	105	120	125	140	155	165

На экономические показатели оказывают влияние такие факторы, как глубина, содержание нерастворимых компонентов, угол залегания, мощность соляной залежи и ее форма, наличие пропластков других горных пород, механические свойства покрывающей толщи и самой соляной залежи, наличие тектонических нарушений. При селективном растворении большое значение приобретают количественное соотношение минералов и изменение их технологических свойств с температурой.

В зависимости от перечисленных факторов выбирают систему отработки: одиночными или спаренными камерами или сплошную с обрушением кровли. Минимальная промышленная мощность пласта определяется экономическими расчетами, зависит от содержания нерастворимых примесей и глубины залегания. Ниже в качестве примера приведены данные, характеризующие эту зависимость (табл. 7).

При подземном растворении калийных солей наибольшее значение имеет форма залежей сильвинита и содержание  $KCl$ . По данным ВНИИГ [44], подземное растворение калийных солей экономически оправдано, если месторождение удовлетворяет следующим условиям.

Минеральный состав — сильвинит, хартзальц, карналлит (при содержании  $MgCl_2$  менее 5%). Содержание  $KCl$  в растворимой части руды должно быть большим 20%. Мощность калийной залежи при глубине разработки до 1000 м должна составлять не менее 5 м, а при большей глубине — не менее 10 м. Глубина залегания не ограничивается, она может превышать 2000 м. Минимальные запасы руды должны превышать 500 млн. т.

Необходимо заметить, что приведенные данные являются сугубо ориентировочными, они дают лишь порядок цифр и приводятся здесь для иллюстрации влияния различных факторов.

МИНЕРАЛЬНАЯ БАЗА  
РАЗВИТИЯ ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

## § 1. Связь свойств руд с их генезисом

Происхождение полезных ископаемых в значительной степени определяет характеристики месторождений, влияющие на выбор способа и условия эксплуатации. Условия концентрации тех или иных элементов в отдельных участках земной коры связаны с процессами перехода их из подвижного состояния в неподвижное. Эти условия определяются теми же параметрами (свойствами элементов и физико-геологической обстановкой), что и условия обратного их перевода в подвижное состояние. С этой точки зрения геотехнологические методы добычи полезных ископаемых нередко представляют собой *инверсию* физико-химических процессов, приведших к образованию месторождений. Так, инфильтрационные месторождения урана связаны со смелой окислительной обстановки восстановительной. Метод выщелачивания основан на обратном процессе: создании в недрах окислительной обстановки и кислой среды.

Генезис месторождений обуславливает их принадлежность к той или иной рудной формации. Каждая формация характеризуется определенной совокупностью рудных и сопутствующих им минералов — парагенетической ассоциацией [57]. Минералы парагенетической ассоциации обладают определенной общностью свойств, так как образуются в одинаковых условиях. Поскольку геотехнологические методы, как правило, основаны на избирательном извлечении полезных ископаемых из руд, необходимо при изучении месторождений исследовать парагенетические ассоциации и найти такое свойство полезного минерала, которое отличало бы его от свойств остальных минералов. И чем резче будет выражено это отличие, тем больше возможность нахождения рабочих агентов с высокой степенью избирательности.

Формирование свойств горных пород представляет собой сложный процесс, развивающийся в течение всей геологической истории месторождений.

Как было показано в главе II, наиболее значительным фактором является *проницаемость руд*. Проницаемость пород связана с их пустотностью, причем проводимость каналов в горной породе пропорциональна второй или третьей степени их раскры-

тости. Образование пустот происходит на всех стадиях петрогенеза.

Собственно магматические и пегматитовые месторождения в ненарушенном состоянии сложены монолитными породами с пористостью, едва достигающей десятых долей процента. Более высокой пустотностью характеризуются постмагматические месторождения.

При образовании последних движение рудообразующих растворов происходит по пустотам и трещинам в горных породах. При этом поры и трещины заполняются вторичными минералами, т. е. монолитизируются. Таким образом, руды эндогенных месторождений, как правило, имеют ничтожную проницаемость.

Проницаемость руд обломочных месторождений (элювиальные и делювиальные россыпи), образующихся преимущественно вследствие процессов физического выветривания, обычно высокая и весьма неоднородная; с глубиной она постепенно уменьшается.

Остаточные месторождения, образующиеся в результате химического выветривания, обычно характеризуются низкопроницаемыми рудами, так как преобладающими минералами в них являются каолин, гидрослюда и другие глинистые минералы. Однако в ряде случаев химическое выветривание приводит к растворению и выносу части минералов без образования глин. Примером могут служить коры выветривания карбонатитов, представляющие собой рыхлые водопроницаемые зернистые породы.

Инфильтрационные месторождения, формирующиеся в результате осаждения минералов из раствора в пористой среде, обычно сложены проницаемыми песчаными и песчано-глинистыми породами и рудами. В зависимости от гранулометрического состава проницаемость может изменяться от долей до десятков квадратных микрометров, а для урановых и урано-ванадиевых месторождений составляет обычно 0,5—10 мкм<sup>2</sup>. В то же время вмещающие породы обычно имеют проницаемость ниже на 1—2 порядка, что создает благоприятные условия для выщелачивания урана из руд в естественном залегании.

Механические осадки — россыпи золота, платины, алмазов, рутила, циркона и других минералов связаны с аллювиальными отложениями, обычно представленными кварцевыми и кварц-полевошпатовыми песками. Процесс накопления россыпей связан с выносом легких и мелких фракций продуктов выветривания, поэтому аллювиальные россыпи характеризуются проницаемостью в десятки и сотни квадратных микрометров.

Проницаемость химических осадков зависит от соотношения в руде терригенного и хемогенного материалов. Как известно [57], окислы алюминия, железа, марганца, а также фосфаты

выпадают в осадок одновременно с терригенным материалом, преимущественно песками. Поэтому руды перечисленных полезных ископаемых имеют определенную пустотность. В процессе накопления осадка и его диагенеза поры частично или полностью заполняются коллоидными частицами рудного вещества. Поэтому для осадочных месторождений железа и марганца проницаемость составляет обычно 0,1—1 мкм<sup>2</sup>. Карбонаты, сульфаты, галонидные соединения и все виды глин водоупорны.

Руды биохимического осадочного происхождения имеют различную проницаемость. Так, оболочные и желваковые фосфоритные руды представлены песками; в то же время осадочные руды урана, связанные с углистым веществом и костными остатками, сложены глинами и водоупорны.

Метаморфогенные месторождения представлены уплотненными в результате метаморфизма рудами и имеют ничтожную проницаемость.

Практически водоупорны и все биогенные залежи горючих полезных ископаемых: углей, сланцев, битумов.

Начальная проницаемость руд может существенно измениться под влиянием процессов эпигенеза, тектонических дислокаций, регионального метаморфизма, разгрузки и выветривания. При диагенезе в результате сложных физико-химических процессов происходит перестройка структуры и состава пород в соответствии с теми термодинамическими условиями, в которые попадает порода. Результатом глубинного эпигенеза является литификация пород — уплотнение, уменьшение пористости, дегидратация. В общем, в результате процессов эпигенеза проницаемость пород снижается. Те же процессы сопровождают региональный метаморфизм. В результате первично рыхлые и проницаемые отложения переходят в полускальные и скальные водоупорные породы.

Если в течение геологической истории горные породы снова попадают в приповерхностные условия, происходит приспособление пород к новой обстановке: развиваются процессы выветривания, дезинтеграция пород, интенсивно происходит выщелачивание отдельных минералов, раскрытие трещин из-за упругого расширения. При этом большую роль играют микроорганизмы. В частности, редуцирующие бактерии в результате своей жизнедеятельности восстанавливают сульфаты, выделяя при этом углекислоту и сероводород. Появление углекислоты в поровых растворах приводит к активному растворению карбонатов, часто играющих роль цемента песчаников, что снижает их прочность и повышает проницаемость.

Проницаемость руд и горных пород в значительной мере определяется развитием трещиноватости. Одной из главных причин образования трещин служат тектонические движения. Трещины разлома распространяются на большую глубину. Вокруг

основной трещины развиваются оперяющие и субпараллельные. Раскрытость трещин может быть различной в зависимости от их типа. Трещины отрыва и скола обычно раскрыты, в то время как трещины взброса и надвига имеют притертые стенки. Трещины складкообразования обычно развиваются в сводах антиклиналей, они более равномерны, чем трещины разлома. Образующиеся при формировании складок трещины, параллельные напластованию, обычно имеют незначительное раскрытие. Региональная тектоническая трещиноватость обычно образована тремя системами трещин: продольные и поперечные трещины отрыва и диагональные трещины скалывания. Эти трещины образуют равномерную редкую сеть, расстояние между ними обычно исчисляется метрами. Трещины кливажа обычно притерты, проводимость их незначительна.

Раскрытость трещин тесно связана с механическими свойствами пород и глубиной их залегания. В породах с сопротивлением сжатию, меньшим геостатического давления, происходит пластическая деформация или разрушение межтрещинных блоков, в результате чего трещины отрыва смыкаются и образуются менее проводящие трещины скалывания [26].

Проводимость трещин существенно изменяется под влиянием геохимических процессов. В одних случаях происходит их залечивание вторичными минералами, в других — расширение вследствие растворения (карст). Последний наиболее характерен для растворимых пород: карбонатов, сульфатов, галогидов. Однако растворение играет существенную роль и в породах, содержащих растворимые минералы только частично, например в песчаниках на карбонатном цементе. В результате растворения цемента вдоль трещин образуются участки рыхлых проницаемых песков. Неравномерное уплотнение выщелоченных участков ведет к образованию новых трещин, вследствие чего процесс декарбонатизации еще более ускоряется и захватывает все большие объемы.

Таким образом, изучение геологической истории формирования месторождений дает возможность установить важнейшие свойства слагающих их пород. Проведенный анализ позволяет выделить три типа руд по величине и характеру проницаемости: 1) пористые коллекторы; 2) трещинные и трещинно-карстовые коллекторы; 3) водоупоры.

К I типу относятся руды обломочных и инфильтрационных (эпигенетических) месторождений, также аллювиальные и морские россыпи, реже остаточные, хемогенные и биохимические осадочные месторождения; ко II типу — многие эндогенные месторождения в зонах пострудной складчатости, а также часть осадочных, метаморфогенных и метаморфизованных месторождений; к III типу — подавляющее большинство руд эндогенного происхождения, хемогенные руды ряда сидерит—мирабилит, большая часть метаморфогенных месторождений.

## § 2. Месторождения, перспективные для скважинной гидродобычи (СГД)

Месторождения фосфоритов с рыхлыми рудами широко распространены в Прибалтике. Примером может служить Кингисеппское месторождение, на котором ведутся опытно-промышленные работы по СГД. Продуктивный пласт представлен кварцевыми песками с обломками фосфатных раковин оболид [29]. Мощность пласта колеблется от 0,8 до 5 м, содержание  $P_2O_5$  в среднем 6,1%. Покрывающие продуктивный пласт породы представлены глауконитовыми песчаниками, доломитами, доломитизированными известняками, четвертичными песчано-глинистыми образованиями, торфом (рис. 12).

Глауконитовые песчаники имеют мощность до 1 м. Выше идут доломиты и доломитизированные известняки мощностью до 20 м, на размытой поверхности которых залегают четвертичные отложения. До глубины 15—20 м фосфориты отрабатывают карьером, на более глубоко залегающей части работает опытно-промышленный участок скважинной гидродобычи. Кроме Кингисеппского, в Прибалтике разведаны и другие месторождения фосфоритов. Условия добычи их можно определить как средние. Основная трудность заключается в малой устойчивости покрывающих трещиноватых доломитов.

Определенный интерес с точки зрения отработки методом скважинной гидродобычи представляют месторождения фосфоритов желвакового типа, примером которых может служить Вятско-Камское (рис. 13). Фосфориты приурочены к отложениям валанжинского яруса нижнего мела, трансгрессивно залегающим на верхнеюрских глинах и перекрытых глинами готеривского яруса. Валанжинские отложения подразделяются на нижний и средний подъярусы. Нижний сложен зелеными кварц-глауконитовыми глинистыми песками с включением желваков фосфоритов. Средний подъярус сложен также кварц-глауконитовыми песками с прослоями темных глин и содержит фосфоритные желваки в нижней части. Мощность валанжинских отложений от 3,4 до 6 м.

Фосфоритоносная толща представлена желваками фосфоритов темно-коричневого цвета размером от нескольких миллиметров до 20 см. Мощность ее составляет 0,3—1,5 м. В безжелваковых глауконитовых песках содержание  $P_2O_5$  достигает 6%, а в желваках до 30%. Открытая добыча фосфоритов крайне неблагоприятна с точки зрения экономии.

Рыхлые и полускальные железные руды представлены в погребенных корах выветривания железистых кварцитов КМА и Криворожского бассейна. Эти руды являются наиболее богатыми. На Яковлевском месторождении КМА (рис. 14) на долю рыхлых и полускальных руд (сопротивление сжатию менее 10 МПа) приходится 53% запасов, в том числе 5—6% составля-

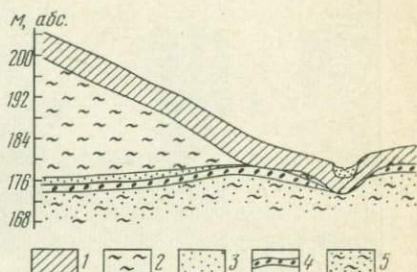
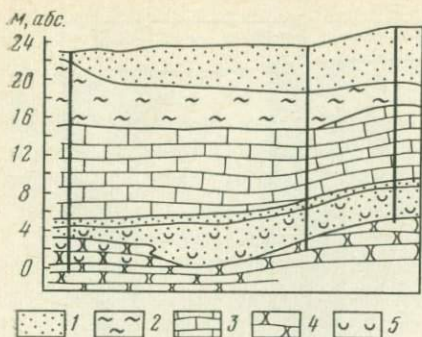


Рис. 12. Схематический разрез Кингисеппского месторождения фосфоритов.  
1 — пески; 2 — глины; 3 — доломиты; 4 — песчаники; 5 — фосфатные раковины

Рис. 13. Схематический разрез Вятско-Камского месторождения фосфоритов.  
1 — суглинки; 2 — глины; 3 — пески; 4 — фосфатные желваки; 5 — песчанистые глины

ют глиноподобные руды, превращающиеся при увлажнении в пльвуны [92]. Рудные тела залегают наклонно, среди кварцитов и сланцев, весьма устойчивых в выработках. Поэтому обработка их методом СГД весьма перспективна, особенно если учесть колоссальные трудности для традиционных способов обработки (низкая устойчивость вскрышных пород, высокая обводненность).

Методом СГД могут обрабатываться также оолитовые железные руды типа керченских. Руды представлены песчано-глинистым материалом с включением стяжений лимонита и перекрыты пластичными глинами. Мощность рудной залежи составляет 10 м и более.

Перспективны для освоения методом СГД также и месторождения марганца. В морских осадочных месторождениях марганец представлен в виде окисленных первичных пиролюзит-псиломелановых руд, обычно сменяющихся карбонатами марганца. Пиролюзит-псиломелановые руды имеют рыхлое сложение. Выделяют: а) конкреционные руды, сложенные стяжениями пиролюзита в рыхлой песчано-глинистой массе; б) ноздреватые пористые стяжения гидроокислов марганца с включением песка, состоящие из псиломелана и манганита и отличающиеся повышенной прочностью и в) сажистые руды — глинистые и песчано-глинистые породы, пропитанные гидроокислами марганца.

Полускальными и связными рудами представлены также некоторые месторождения урана, меди. Для скважинной гидродобычи могут исследоваться осадочные и инфильтрационные месторождения урана, а также ураноносные бурые угли. Наиболее перспективны осадочные месторождения. Они связаны с

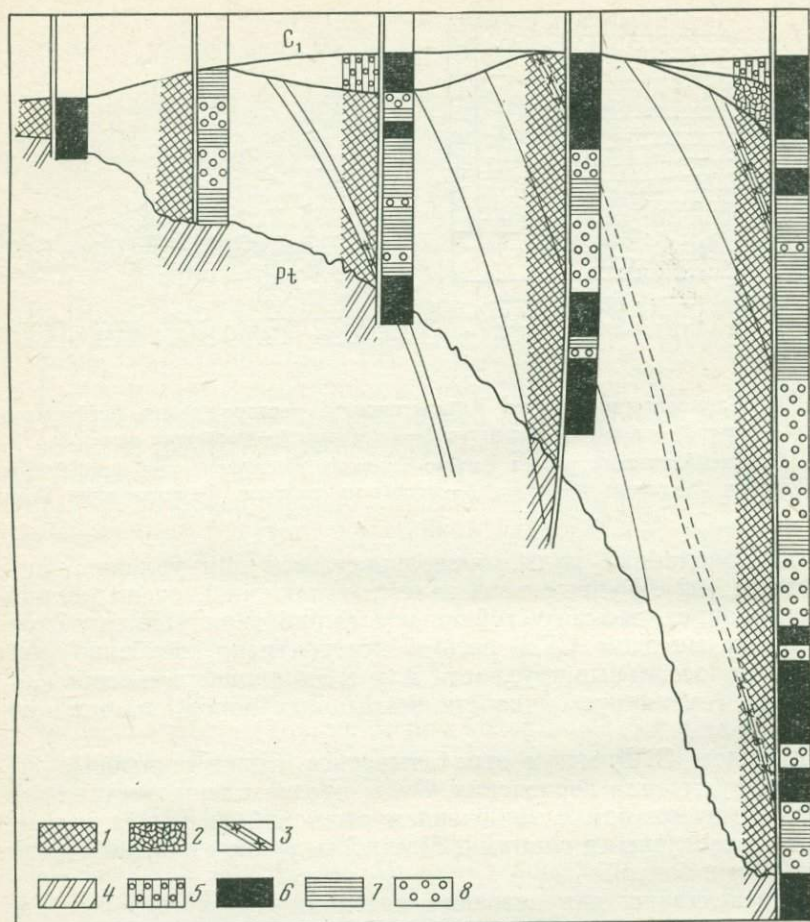


Рис. 14. Инженерно-геологический разрез рудной залежи Яковлевского месторождения (по Г. Г. Скворцову).

1 — руды остаточные; 2 — руды переотложенные; 3 — межрудные сланцы; 4 — кварциты; 5 — бокситовидные породы; 6–8 — тип руды по крепости (6 — крепкая, 7 — средней крепости, 8 — легкоразрыхляемая)

углисто-кремнистыми сланцами, фосфоритами, костными остатками рыб. Содержание урана низкое, но запасы месторождений очень велики. Известны также месторождения урана в торфах.

Перспективными для СГД могут оказаться также инфильтрационные месторождения медистых песчаников. Большинство минералов урана и меди хорошо растворимы в кислотах и щелочах. Это дает возможность использовать комбинированные методы добычи, включающие СГД с одновременным выщелачиванием.

Наиболее крупные запасы алюминия связаны с остаточными и осадочными месторождения. Осадочные месторождения представлены бокситами, среди которых различают каменистые, рыхлые, маркие (землистые), оолитовые, бобовые, яшмовидные, брекчиевидные. Методом скважинной гидродобычи могут разрабатываться рыхлые и землистые бокситы, составляющие существенную долю запасов (до 60%).

Применение СГД может оказаться выгодным для добычи некоторых сортов глин. Высокая устойчивость глинистых растворов позволяет легко транспортировать их по трубопроводам, что в некоторых условиях может оказаться приемлемым способом снабжения глинистым раствором крупных нефтепромыслов.

Перспективными для разработки гидродобычей через скважины являются также бурые угли, имеющие низкую прочность. Бурые угли могут отрабатываться методом подземной газификации, однако при этом одним из препятствий является высокая обводненность месторождений. Кроме того, в последние годы бурые угли приобретают все большее значение в качестве сырья для химической промышленности. Поэтому вполне возможно, что СГД может оказаться рациональным методом разработки некоторых месторождений.

С песчано-глинистыми отложениями невысокой прочности связаны месторождения янтаря, россыпи касситерита, ильменита, золота. СГД уже применяется для добычи строительного и стекольного песка, гравия.

### **§ 3. Месторождения, перспективные для обработки выщелачиванием и растворением**

**Железо.** Для обработки подземным выщелачиванием перспективны оолитовые бурожелезняковые руды, добыча которых традиционными способами нерентабельна из-за низкого содержания и неблагоприятных гидрогеологических условий [25].

В Аятском бассейне рудная залежь имеет вид пласта средней мощностью 1,8 м. Руды представляют собой кварц-глауколитовые пески с конкреционными и рыхлыми включениями гидроокислов. Покрывающими и подстилающими породами являются глины. Глубина залегания изменяется от 10 до 200 м. В рудах содержится до 0,4% фосфора и 0,2% ванадия.

Показана возможность создания крупных энерго-технологических комплексов, основанных на методе добычи железа выщелачиванием. Рекомендовано первоочередное освоение Аятского и Бакчарского месторождений.

**Марганец.** Растворимость марганцевых руд в сернистой кислоте обуславливает возможность его добычи подземным вы-

щелачиванием. Проведенный анализ геолого-гидрогеологических условий восточной части Никопольского марганцеворудного бассейна [61, 79] показал, что наиболее перспективным является Новоселовское месторождение. Рудный пласт мощностью 3,3—3,4 м залегает на глубине около 15 м и представлен пизолитовой, конкреционной, кусковой и землистой разностями окисных руд. Пласт перекрыт яблочно-зелеными глинами мощностью 2—5 м, над которыми залегают четвертичные суглинки, и подстилается слоем каолинов мощностью 2—12 м; в основании разреза залегают граниты (рис. 15). На месторождении проведены полупромышленные исследования.

Медь и никель. Медные руды, обрабатываемые подземным способом, должны содержать не менее 1% Cu, а при открытом способе — 0,5—0,7%. В то же время способом выщелачивания выгодна отработка руд с содержанием 0,3—0,4%. В настоящее время выщелачиванием получают 20% мировой добычи меди. Детальная характеристика месторождений меди с точки зрения их разработки геотехнологическими способами приводится в работе Г. Б. Поповой [80].

Г. Б. Попова подразделяет медные руды применительно к процессам выщелачивания на сульфидные, окисленные и смешанные. Сульфидные руды представлены труднорастворимыми минералами и требуют предварительного окисления или же различных интенсифицирующих воздействий. Однако к этому типу руд относятся наиболее крупные запасы, поэтому именно с ними связаны перспективы развития добычи меди.

Окисленные руды содержат наиболее растворимые минералы меди. Особенно перспективны хризоколловые руды, трудно поддающиеся обогащению при обычных способах добычи. Смешанные руды, содержащие как окисленные, так и сульфидные минералы, встречаются в месторождениях всех типов и легко выщелачиваются, но при этом извлечение зависит от соотношения окисленных и сульфидных минералов.

Важнейшей особенностью медных руд является содержание в них ряда других ценных компонентов: никеля, кобальта, молибдена, железа, титана, цинка, а также редких и рассеянных элементов.

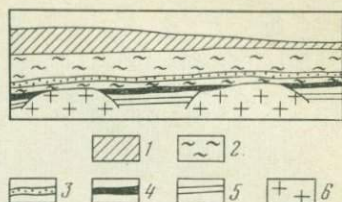
Никель в медно-никелевых месторождениях представлен в основном пентландитом, содержащим в виде изоморфных примесей также до 3% кобальта, металлы платиновой группы, золото, серебро, селен, теллур.

В медных и медно-молибденовых месторождениях встречаются рений, селен, теллур, золото, серебро, кадмий, висмут, германий. В колчеданных месторождениях спутниками меди являются цинк, золото, благородные и редкие металлы.

Запасы медных руд, перспективные для отработки выщелачиванием, целесообразно разделить на три группы:

Рис. 15. Схематический разрез Никопольского месторождения марганца.

1 — лёссы, пески; 2 — глины; 3 — пески; 4 — марганцевая руда; 5 — каолин; 6 — кристаллические породы



1. Крупные месторождения руд с низким содержанием меди, приуроченные к коренным породам. Крупные размеры рудных тел позволяют применить для дробления руд ядерные взрывы.

2. Инфильтрационные месторождения медистых песчаников, сложенные хорошо растворимыми минералами меди: водными карбонатами, халькозином, борнитом, хризоколлой. Залежи такого типа при условии проницаемости руд могут обрабатываться выщелачиванием через скважины.

3. Забалансовые участки, целики и отвалы отработанных обычными способами месторождений. Наличие готовых выработок создает благоприятные условия для выщелачивания руд с предварительным дроблением и микробиологической интенсификацией.

В работе [32] приведена оценка возможности микробиологического выщелачивания руд Ловозерского и Печенегского месторождений. Ловозерские руды представляют собой меланомезократовые нориты. Текстура вкрапленная, гнездовпрожилковая, брекчиевидная. Сульфиды представлены пиритом, пентландитом, халькопиритом, бравоитом, ковеллином. Содержание, %: никеля 0,49; меди 0,34; кобальта 0,02. Сульфидная медно-никелевая руда Печенегского месторождения представляет собой мелкозернистый серпентинит. Рудообразующие минералы представлены пирротинном, пентландитом, халькопиритом, магнетитом. Содержание %: никеля 0,56; меди 0,28; кобальта 0,024. Извлечение в лабораторных опытах в течение одного года достигнуто, %: меди 33, никеля 11,2; кобальта 19,4.

Полупромышленные испытания по выщелачиванию медно-никелевой руды показали, что за 530 сут извлекается до 74% никеля и 22% меди, причем интенсивность микробиологического выщелачивания в два раза выше обычного. Наибольшее промышленное значение имеют средне- и низкотемпературные, инфильтрационные и осадочные месторождения.

Уран. Крупные месторождения урана связаны с осадочными породами. Залежи инфильтрационного типа формируются в результате выщелачивания подземными водами урана из кислых пород и отложения последнего в восстановительной обстановке при переходе урана из шести- в четырехвалентную форму. Инфильтрационные месторождения могут быть связаны с

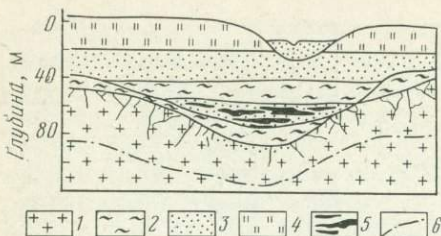


Рис. 16. Схематический разрез инфильтрационного месторождения.

1 — кристаллические породы; 2 — глины; 3 — пески; 4 — лёссы; 5 — руда; 6 — граница зоны выветривания

любими осадочными породами: известняками, песчано-глинистыми отложениями, конгломератами.

Собственно осадочные месторождения связаны с породами, содержащими органические вещества: углистыми сланцами, фосфоритами, остатками костей и т. п. Осадочные отложения обычно отличаются крупными размерами и низким содержанием урана.

Одно из первых месторождений, на котором в промышленных масштабах был освоен метод выщелачивания, приурочено к толще песчано-глинистых пород, перекрытых и подстилаемых глинами [13], (рис. 16).

Уран в рудах находится в основном в сорбированном состоянии на глинах и обугленных растительных остатках. Рудоносный слой одновременно является и водоносным горизонтом, мощность которого составляет 2—6 м.

Коэффициент фильтрации руды и вмещающих пород чрезвычайно изменчив в разрезе и по площади и составляют в среднем 0,2—0,4 м/сут.

В плане водоносный горизонт представляет собой полосу, ограниченную с боков водоупорными породами (погребенное русло).

С точки зрения возможности применения подземного выщелачивания месторождения урана можно разделить на следующие группы:

1. Зоны окисления коренных месторождений. Уран в этих зонах находится в легко растворимых минералах, руды разрушены и легко вскрываемы. Кислые рудничные воды могут использоваться в качестве выщелачивающего раствора. Запасы таких руд незначительны, поскольку они в большинстве своем отработаны обычными способами.

2. Забалансовые участки месторождений, отработанных шахтами. Наличие готовых подземных выработок обеспечивает высокую эффективность выщелачивания с предварительным дроблением руды взрывами, а также с применением микробиологической интенсификации окислительных процессов.

3. Месторождения в сильнообводненных и неустойчивых осадочных породах. Сюда относится большое число эпигенетических месторождений урана, сформировавшихся в зоне перехода от окислительной к восстановительной обстановке. Проницае-

мость руд обеспечивает высокое извлечение урана при высокой производительности; в то же время обычные способы разработки этих месторождений часто наталкиваются на непреодолимые трудности. Капитальные затраты на освоение и себестоимость продукта на таких месторождениях вдвое меньше, чем при отработке шахтой. Подземные воды из фактора, мешающего разработке, превращаются в способствующий фактор [37].

4. Крупные и глубокозалегающие месторождения с бедными рудами. К этой группе можно отнести осадочные месторождения, приуроченные к углистым сланцам, а также массивы кислых пород, содержащих повышенные концентрации урана. Осадочные месторождения малоперспективны для выщелачивания, так как до сих пор не найдены промышленные способы повышения проницаемости глинистых пород. Что касается месторождений в кислых интрузивных и метаморфических породах, то разработка их вполне реальна уже в недалеком будущем. Крупные размеры залежей позволяют применить для дробления ядерные взрывы.

В перспективе выщелачивание, по-видимому, полностью вытеснит обычные способы разработки эпигенетических, метаморфогенных, гидротермальных и частично осадочных месторождений урана.

Молибден. Часто является спутником урана и их добывают одновременно. Выщелачиванием могут обрабатываться и собственно молибденовые месторождения.

Золото. Будучи химически инертным, золото встречается чаще всего в самородном виде, а также в виде твердых растворов в серебре, меди, ртути и других металлах.

Подземным выщелачиванием намечается обрабатывать, в первую очередь, забалансовые запасы в районах действующих рудников. Проведенные опыты по цианированию золотоносного материала показали, что среднее извлечение из измельченных проб составляет 54% [65].

Минеральные соли. По условиям образования различают [25] ископаемые подземные залежи солей, залежи и рассолы современных бассейнов и соленые подземные воды. Мощность ископаемых соляных залежей изменяется от 1—10 до 500—1000 м. Запасы солей в некоторых районах (соленосных провинциях) практически неисчерпаемы. Крупнейшими в СССР месторождениями калийной соли являются Верхнекамское, Стебниковское, Калушское, Старобинское, Карлюкское. Последнее намечается к отработке подземным растворением. В работе [44] обоснована также перспективность добычи растворением калийных солей Белоруссии. Для разработки растворением в шахтном варианте рекомендовано Старобинское месторождение. На Петриковском месторождении растворением может быть отработан нижний сильвинитовый пласт четвертого горизонта.

Исключительно растворением могут обрабатываться залежи, выявленные на глубине более 1000 м.

Большие перспективы связаны с освоением методом подземного растворения калийных солей Гаурдак-Кугитангского района (рис. 17). Калиеносная зона вытянута на расстояние около 110 км. Здесь разведаны Гаурдак-Тюбетаганская, Кугитангская, Карлюкская и Окузбулакская зоны. Калийная соль залегают на глубине от 200 до 1200 м и представляет собой один или несколько пластов сильвинита мощностью от 1 до 16 м. Наличие в районе значительных запасов серы и известняков позволяет решить проблему комплексного использования минеральных богатств района с добычей серы подземной выплавкой, сернистого газа — методом подземной газификации серы, хлористого натрия и калия — подземным растворением. Камеры выщелачивания в солях могут быть использованы для осуществления химических реакций. Отход производства сульфата калия (соляная кислота) может использоваться для получения из известняков углекислоты, нужной для производства соды. Этот процесс можно осуществлять непосредственно в недрах.

Бишофит. Значительный интерес для добычи растворением представляют месторождения бишофита [30], залежи которого выявлены в Нижнем Поволжье среди соленосной толщи кунгурского яруса и образуют от одного до трех мономинеральных пластов. Они залегают на глубине 950—1800 м и протягиваются полосой вдоль р. Волги на сотни километров. Мощность

пласта в платформенной части составляет 35 м, реже 50—70 м. В зоне развития соляных куполов Прикаспийской впадины бишофит встречается на глубинах от 1000 до 4000 м и образует линзы мощностью до 120 м. Он залегают среди галита и изолирован от последнего прослойкой калийных солей мощностью 1—3 м. В 3—5 м выше бишофитового пласта прослеживается пласт ангидрита мощностью 7—15 м. Бишофит содержит также до 0,8% брома. Опытная добыча бишофита выщелачиванием ведется на Наримановской площади.

Сода. Месторождения природной соды приурочены к современным озерам и

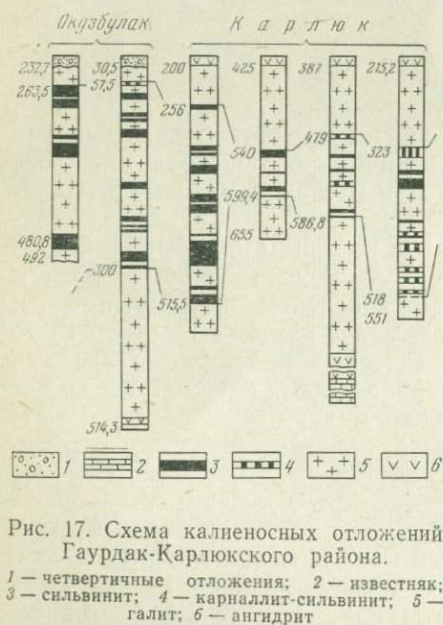


Рис. 17. Схема калиеносных отложений Гаурдак-Карлюкского района.

1 — четвертичные отложения; 2 — известняк; 3 — сильвинит; 4 — карналлит-сильвинит; 5 — галит; 6 — ангидрит

представляют собой донные отложения. Значительные запасы соды приурочены также к грунтовым водам.

В СССР методом выщелачивания разрабатывают Михайловское месторождение [111], представляющее собой несколько линз песка и ила, сцементированных солями. Подземные воды вокруг озер также гидрокарбонатно-натриевые с минерализацией до 150 г/л. Выщелачиванием отрабатывают руды с содержанием соды 3% и более. За 9 лет достигнуто извлечение 72% запасов, в то время как извлечение при горном способе не превышало 36%. Ожидается, что суммарное извлечение превысит балансовые запасы.

#### **§ 4. Месторождения, перспективные для отработки подземной выплавкой**

Месторождения самородной серы представлены двумя генетическими типами: вулканогенным и осадочным.

Вулканогенные месторождения СССР приурочены к зоне Камчатско-Курильского вулканического пояса, наиболее изученными из них являются Малетойваямское и Новое, образование которых связано с метаморфизмом вулканических пород при воздействии на них газов и горячих сероводородных растворов. Руды состоят из серы, кварца и опала. Сера слагает мелкие зерна, реже выполняет трещины. Вмещающими породами служат алуниты, туфы, лавовые потоки.

Вулканогенные месторождения пространственно и генетически связаны с месторождениями термальных вод, что в перспективе позволяет использовать последние в качестве теплоносителя [43].

Месторождения серы в осадочных породах приурочены к известнякам и гипсоангидритам. По характеру рудных тел различают залежи: пластовые (Язовское, Немировское, Загайпольское) и сложной формы (Гаурдакское).

Типичным примером пластового месторождения, разрабатываемого методом ПВС, является Язовское месторождение серы (рис. 18, 19).

В общем структурном плане оно приурочено к зоне сочленения платформы с Предкарпатским краевым прогибом. Вдоль внешней зоны прогиба прослеживается крупная антиклинальная структура, ось которой погружается в северо-западном направлении. К своду и крыльям этой структуры приурочены залежи серы. Глубина залегания серных руд на юго-востоке составляет 65 м; к северо-западу она увеличивается до 300 м и более.

Рудная залежь приурочена к известнякам ратынского горизонта (верхнетортонский ярус неогена) и пространственно совпадает с их развитием. Подстилающими породами являются гилсы, а в некоторых случаях — органигенные известняки литомниевского горизонта. Местами в подошве отмечаются линзы

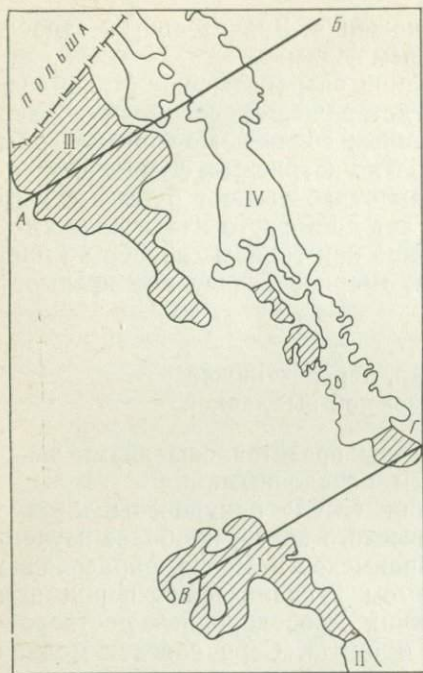
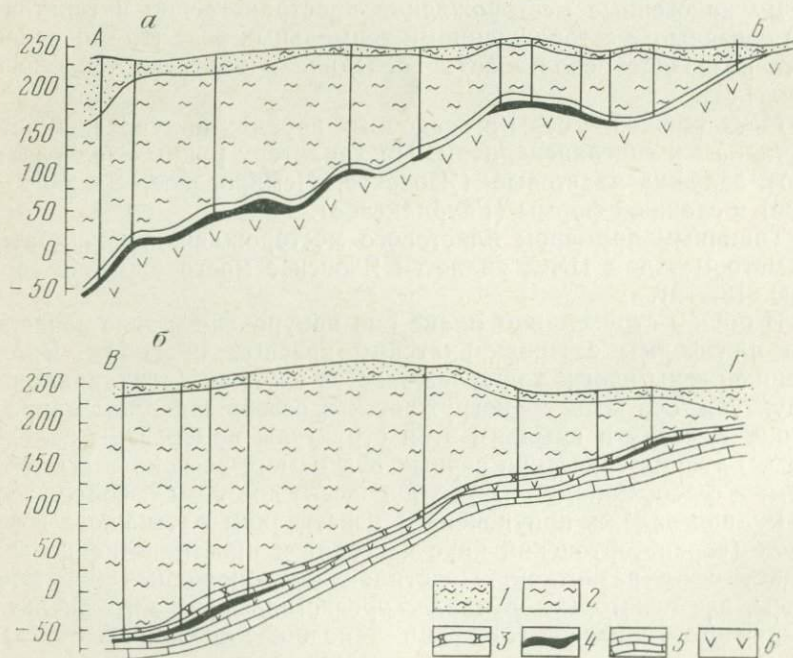


Рис. 18. Схематический план Язовского и Немировского месторождений серы. Заштрихованы площади, обрабатываемые методом ПВС.

I—III — залежи Язовского месторождения (I — Северная, II — Главная, III — Западная); IV — Восточная залежь Немировского месторождения

Рис. 19. Схематические разрезы Язовского (а) и Немировского (б) месторождений серы (см. рис. 18).

1 — пески, суглинки; 2 — глины, мергели; 3 — песчаники; 4 — известняки; 5 — серные руды; 6 — гипсоангидриты



глин и песчаников. Над серными рудами обычно прослеживается прослой неосерненных известняков мощностью 1—1,5 м, выше залегает мощная толща песчано-глинистых отложений козовской свиты. В нижней ее части прослеживается слой алевроитов и тонкозернистых песчаников на глинисто-карбонатном цементе мощностью от 1 до 10 м; выше идут однородные мергелистые глины.

Четвертичные отложения представлены делювиальными суглинками мощностью до 10 м, а в долинах рек — аллювием мощностью до 20 м.

В своде структуры рудоносные известняки залегают практически горизонтально, а в крыльях — наклонно; под углом 3—8° в юго-восточном и 10—18° в северо-западном крыльях.

Месторождение состоит из Северной, Главной и двух небольших южных залежей. Главная залежь, где глубина до руды составляет от 65 до 120 м, отрабатывается открытым способом, а Северная залежь — методом подземной выплавки. Руды здесь находятся на глубине от 140 до 425 м. Контуры залежи сложные, извилистые. Характерны пережимы рудной мощности до нуля; часто отмечаются линзы и крупные участки неосерненных известняков; в то же время встречаются раздувы рудного тела до 30 м.

Основными типами серных руд являются: по структуре — скрыто- и явнокристаллическая; по текстуре — рассеянная, вкрапленная и вкрапленно-прожилковая. Другие типы руд имеют подчиненное значение. В пределах Северной залежи приблизительно 20% руд относятся к легковыплавляемым, 40% — к средним, и 40% — к трудновыплавляемым [108].

С гидрогеологической точки зрения месторождение относится к Предкарпатскому артезианскому бассейну. Основными водоносными горизонтами являются литотамниевый, приуроченный к регионально распространенным трещиноватым известнякам, и ратынский, являющийся рудосодержащим. Они разделены гипсами, которые местами выклиниваются, образуя гидравлические окна, связывающие горизонты.

Известняки литотамниевых горизонтов на юге и востоке выходят на поверхность или под четвертичные отложения. Здесь находятся региональные области питания и разгрузки водоносного горизонта. Химический состав подземных вод месторождения изменяется от гидрокарбонатно-кальциевого в области выхода на поверхность до сульфатно-кальциевого в погруженных частях. Соответственно составу увеличивается общая минерализация от 200 мг/л до 4—5 г/л; с глубиной в подземных водах увеличивается содержание сероводорода, от следов до 150—200 мг/л.

Естественный режим подземных вод в настоящее время нарушен работой водопонижительной системы карьера и закачкой теплоносителя на участках ПВС. На сегодняшний день обла-

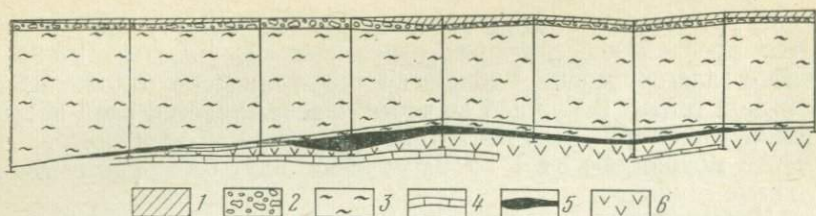


Рис. 20. Геологический разрез Загайпольского месторождения серы.  
1 — суглинки; 2 — галечники; 3 — глины; 4 — известняки; 5 — серные руды; 6 — гипсоангидриты

стями питания, кроме участков выхода известняков на поверхность, являются и участки ПВС; очагом разгрузки является карьер с его водопонижительными скважинами.

Гидродинамические параметры рудосодержащего водоносного горизонта изменяются в широких пределах. В Северной залежи водопроводимость изменяется от 0,4 до 140 м<sup>2</sup>/сут, проницаемость — от 3·10<sup>4</sup> до 10<sup>6</sup> м<sup>2</sup>/сут. Преобладают значения водопроводимости от 1 до 10 м<sup>2</sup>/сут. Обводненность пласта связана с наличием трещин, кавернозности и карстовых полостей. Чаще всего закарстованность отмечается вдоль кровли и почвы пласта; реже встречаются полости внутри осерненных известняков. Запасы, пригодные для выплавки, составляют около 25% от общих запасов месторождения.

Совершенно аналогичное геологическое строение и гидрогеологические условия имеет Немировское месторождение серы, расположенное в нескольких километрах к западу от Язовского.

Загайпольское месторождение расположено в юго-восточной части Предкарпатского сероносного бассейна. Наиболее древними отложениями, вскрытыми на территории месторождения, являются известняки туронского яруса верхнего мела. На их размытой поверхности залегают породы неогеновой системы: нижнетуртонский подъярус, представленный кварц-глауконитовыми песчаниками мощностью до 5 м и верхнетуртонский подъярус, подразделяемый на тирасскую и косовскую свиты (рис. 20).

Тирасскую свиту в нижней части слагают гипсы и ангидриты мощностью до 40 м, выше залегают сероносные известняки мощностью до 29,0 м — днестровский горизонт.

В кровле тирасской свиты залегают плотные известняки мощностью от 1—2 до 18—19 м — ратынский горизонт.

Косовская свита состоит из темно-серых аргиллитоподобных глин с прослоями алевролитов, песчаников, в нижней части туфов и туфопесчаников. Мощность отложений 200—250 м. Четвертичные отложения представлены суглинками, песками и галечниками. Мощность галечников достигает 15 м, общая мощность четвертичных отложений 30 м.

Отличительными особенностями Загайпольского месторождения является гидрогеологическая закрытость и низкая проницаемость руд. Последнее обстоятельство чрезвычайно затрудняет применение обычной технологии подземной выплавки серы. Аналогичны Загайпольскому разведываемые Гривненское и Шевченковское месторождения.

Существенно отличается от Язовского, а также от обрабатываемых методом ПВС зарубежных месторождений Гаурдакское месторождение серы (рис. 21).

Оно приурочено к крылу Гаурдакской брахиантиклинали, представляющей собой асимметричное поднятие с амплитудой порядка 2000 м. В ядре поднятия залегают известняки гиссарской свиты мощностью 800—1000 м. На неровной, разбитой тектоническими нарушениями на отдельные блоки поверхности гиссарской свиты залегают отложения гаурдакской свиты, представленные ангидритами, гипсоангидритами и известняками маркирующего горизонта. Последние представляют собой один-два пласта мощностью от 1 до 30 м. К гаурдакской свите приурочены залежи серных руд, пространственно и генетически связанные с положением кровли гиссарской свиты и известняков маркирующего горизонта. В разрезе выделяются обычно от одной до трех залежей серных руд, разделенных ангидритами. Нижняя залежь располагается непосредственно над кровлей гиссарских известняков, остальные связаны с маркирующим горизонтом. На отдельных участках, приуроченных к крупным разломам и их пересечениям, залежи сливаются в одну, приобретающую столбообразную и грибообразную формы. Гаурдакская свита перекрыта толщей четвертичных конгломератов и глин мощностью от нескольких метров до 200 м.

В плане месторождение подразделяется на пять участков. Внешние контуры залежей имеют сложную извилистую форму, внутри залежей встречаются безрудные участки. Залежь участка II, обрабатываемая в настоящее время методом ПВС, приурочена к системе крупных разломов. Она погружается по падению кровли гиссарских известняков под углом 18—20°. На большей площади залежь имеет двухслойное строение, мощность каждого слоя изменяется от 3—5 до 20 м. Вдоль разлома наблюдается объединение обеих залежей в единое рудное тело мощностью 40—100 м и более.

Руды месторождения представлены двумя основными типами: а) метасоматические руды нижнего горизонта, сформировавшиеся в результате замещения ангидрита серой и вторичным кальцитом и б) наложенное осернение известняков маркирующего горизонта, образовавшееся вследствие выполнения кальцитом, гипсом и серой каверн, трещин и карстовых полостей в известняках. Основными минеральными компонентами руд являются самородная сера, кальцит и гипс.

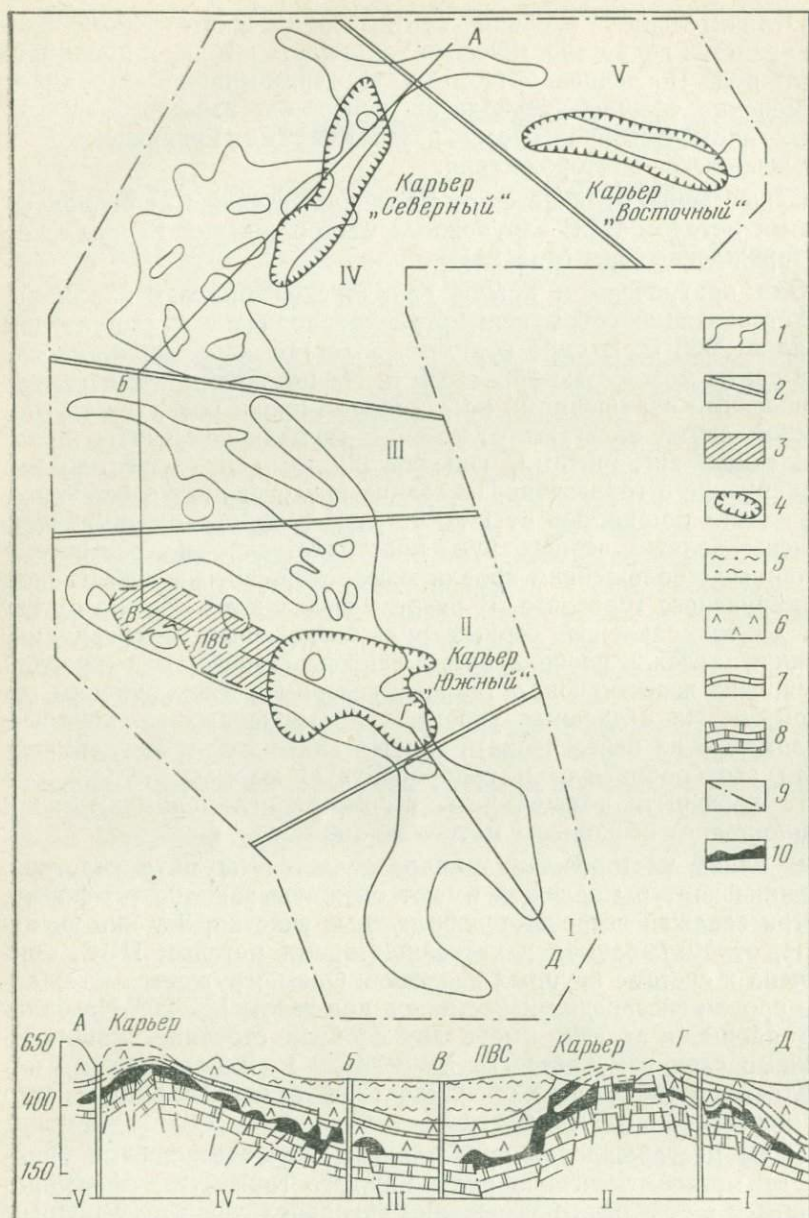


Рис. 21. Схематический план и разрез Гаурдакского месторождения (I—V — номера участков месторождения).

1 — контур рудной залежи; 2 — границы участков; 3 — участок подземной выплавки; 4 — контуры карьеров; 5 — четвертичные глины и конгломераты; 6 — гипс и ангидрит гаурдакской свиты; 7 — известняки гаурдакской свиты; 8 — известняки гиссарской свиты; 9 — тектонические нарушения; 10 — серная руда

Метасоматические руды содержат преимущественно мелкозернистую серу массивной, полосчатой, сетчатой, брекчиевидной текстур. Наложенное осернение представлено крупнозернистой серой с пятнистой, грубополосчатой, вкрапленной, кавернозной текстурами.

Наиболее обводненными породами являются залежи серных руд, образующие сложный по форме, но гидравлически единый водоносный горизонт. Верхним водопором служат ангидриты гаурдакской свиты; нижним — слабопроницаемые известняки гиссарской свиты. На большей площади водоносный горизонт подразделяется ангидритами на два горизонта. В приподнятой части залежи над верхним горизонтом руд почти повсеместно прослеживаются обводненные кавернозные известняки, не содержащие серы.

Карстовые полости имеют размеры по вертикали от 0,5—1,0 до 10 м и более; местами провалы бурового инструмента достигают нескольких десятков метров. Карст наиболее развит у кровли залежи, а местами в покрывающих ангидритах на контакте с рудами. Это сложная система пещер, протягивающаяся от самых глубоких участков залежей до их выхода на поверхность.

Пластовые воды представляют собой хлоридно-натриевый рассол с минерализацией от 70 до 150 г/л, плотностью 1,08—1,125 г/см<sup>3</sup> и температурой 28—32° С. Содержание сероводорода достигает 500 мг/л. В естественных условиях водоносный горизонт имел режим артезианского склона. В настоящее время питание осуществляется за счет нагнетания теплоносителя, разгрузка — в карьеры, а также в виде источников и путем самоизлива скважин.

Указанные гидрогеологические условия обуславливают высокую приемистость серодобычных скважин (до 200 м<sup>3</sup>/ч), распространение теплоносителя узкими языками по направлению восстания пласта и основных тектонических нарушений, потери расплавленной серы на заполнение карстовых полостей, быстрое остывание отработанных залежей в результате вторжения холодных пластовых вод, а также ряд других технологических особенностей процесса ПВС.

Битум. Месторождения битумов широко распространены в районе Волго-Уральской нефтеносной провинции и ряде других районов СССР. Битумы приурочены к песчаным и карбонатным коллекторам уфимского и казанского ярусов верхней перми и прослеживаются на огромных площадях. Битуминозные пласты залегают на глубине 80—100 м. В качестве примера приведем характеристику разреза Юлтемировского участка в ТАССР (г. Бугульма).

Казанский ярус состоит из трех горизонтов. В верхней части разреза залегают глины, алевролиты и известняки (до 14 м) барбашинского горизонта, под ними — мергели с прослоями из-

вестняков (35—36 м) кампшлинского горизонта. Еще ниже прослеживаются органогенные известняки, а затем лингулловые глины байтуганского горизонта.

Уфимский ярус представлен чередованием песков и глин, относящихся к шешминскому горизонту. В верхней части, под слоем лингулловых глин прослеживаются битуминозные песчаники мощностью до 20 м, разделенные прослоем глин и алевролитов на два пласта. Ниже расположен слой глин с редкими прослоями известняков общей мощностью 23 м, под которыми залегает еще один пласт битуминозных песчаников (8,5 м). Последние подстилаются кавернозным известняком сакмарского яруса нижней перми.

Содержание битума в песчаниках шешминского горизонта различно. Верхний пласт, сложенный мелкозернистыми крепкими песчаниками на карбонатном цементе, насыщен битумом неравномерно, в соответствии с неоднородностью коллекторских свойств. Нижний пласт мощностью 6—7 м отличается высокой и равномерной битуминозностью; залегание пласта слабо-наклонное.

Озокерит. Залежи озокерита генетически и пространственно связаны с нефтяными месторождениями. В месторождении Шор-Су озокерит пропитывает трещины и поры пласта известняков мощностью около 10 м, залегающего под углом 70—80° среди глин. На Бориславском месторождении озокерит пропитывает песчано-глинистые породы. Содержание озокерита составляет 1—3%. Здесь планируются опытные работы по добыче озокерита подземной выплавкой [16].

Асфальтит. Единственным разрабатываемым месторождением асфальтитов в СССР является Садкинское, запасы которого почти исчерпаны. Ивановское месторождение, расположенное в Оренбургской области, представляет собой жилу чистого асфальтита мощностью от 0,5 до 7 м, залегающую на глубине от 50 до 400 м. Вмещающими породами являются гипс, ангидрит, в зоне контакта отмечаются пирит и каменная соль. Асфальтиты по составу и свойствам близки к твердым битумам. При нагреве до 80—100°С они становятся пластичными, при 150°С — вязко-пластичными, в интервале 180—200°С приобретают свойства жидкости с вязкостью 0,075—0,28 Па·с. Это определяет перспективность добычи асфальтита подземной выплавкой.

## § 5. Месторождения, перспективные для подземной газификации

Уголь. Открытие крупнейших месторождений природного газа послужило одной из основных причин ослабления внимания к подземной газификации угля. Однако в странах, испытывающих нехватку собственных ресурсов нефти и газа, освоению метода подземной газификации придается большое значение.

Так, в США с 1974 г. ведутся полевые и лабораторные исследования процесса ПГУ в районе Прайстоун. В шт. Техас в 1976 г. построена установка ПГУ по лицензии, приобретенной в СССР.

Имеющийся опыт подземной газификации в Подмосковном, Донецком, Кузнецком и Ангренском бассейнах показал, что для этого метода пригодны угли самых различных типов. Для выбора технологии и способа осушения наибольшее значение имеют гидрогеологические условия. В Подмосковном бассейне водоносный горизонт залегает в подугольных песках и известняках и имеет высокую водообильность; полное их осушение невозможно. Днепровский буроугольный бассейн характеризуется наличием больших ресурсов подземных вод в над- и подугольных песках. В Донбассе обводненность незначительна. Месторождения Кузбасса обводнены широко распространенным надугольным водоносным горизонтом большой мощности [98].

Горючие сланцы. Технологическое использование горючих сланцев основано на их свойстве при нагревании выделять больше, чем какое-либо другое топливо, высокосортных жидких и газообразных продуктов. Смола и газ являются не только высококалорийными видами топлива, но и сырьем для получения химических продуктов (этилового спирта, аммиака, хлороформа, мазута, бензина, керосина, фенолов и др.). Разработка большинства месторождений обычными методами экономически не оправдана, поэтому представляет значительный интерес способ их подземной переработки.

Сера. Подземная газификация может служить одним из методов добычи серы. Метод заключается в сжигании серы до  $SO_2$  на месте залегания с последующим использованием выделяющегося газа для производства серной кислоты. Этот метод можно применять на сухих участках серных месторождений, в частности средневожских. Самородная сера этих месторождений приурочена к мергелисто-известняковым породам верхнеказанского подъяруса верхней перми. Характерно наличие шести-семи осерненных горизонтов, из которых верхние пять имеют мощность, превышающую 2 м, и содержание серы 10—13%. Покрывающими породами служат песчаники, глины и мергели татарского яруса, а местами неогеновые глины. Все месторождения в той или иной степени затронуты карстом и расположены выше регионального базиса эрозии.

Методом подземной газификации намечается также отработка сухих глубокозалегających участков Гаурдакского месторождения, где строится первая опытная установка. Заслуживает изучения также возможность газификации вулканогенных серных руд [43].

Ртуть, сурьма, мышьяк. Промышленное значение имеют низкотемпературные гидротермальные месторождения, среди которых по генетическому признаку выделяют глубинные и приповерхностные [57].

Минералы ртути представлены киноварью, сурьмы — антимонитом, мышьяка — арсенопиритом, а в зоне окисления валентинитом, сенармонитом, реальгаром, аурипигментом. Вмещающими породами чаще всего являются окварцованные известняки, песчаники, кварциты, сланцы. Из жильных минералов характерны халцедон, кальцит, марказит. Рудные тела часто экранированы малопроницаемыми породами типа глинистых сланцев. Проведенные на руднике Чаувай полупромышленные опыты по возгонке ртути дали положительные результаты [100].

Технология, аналогичная подземной возгонке, может применяться для геотехнологического обогащения карбонатных железных руд. Установлено [109], что сидеритовые руды Бакальского месторождения декарбонизируются при нагреве до температуры 700°С, при этом руда разрушается и теряет до 30% массы вследствие выделения углекислоты. Обоженная руда приобретает магнитные свойства, содержание железа повышается с 32—35 до 40—45%. Проведены успешные опытно-промышленные работы на базе шахты «Бакальчик».

\* \* \*

Приведенный обзор показывает, что область применения геотехнологических методов охватывает около 30 видов полезных ископаемых и нет сомнения, что этот список будет расширен уже в ближайшие годы.

Чтобы максимально использовать экономические выгоды от применения геотехнологических методов, необходимо:

1. Взять на учет все месторождения, перспективные для отработки геотехнологическими методами. Провести их геолого-экономическую переоценку с учетом особенностей новой технологии. Выделить первоочередные объекты для освоения геотехнологическими методами.

2. Разработать основные методические положения по разведке и доразведке месторождений и их участков, перспективных для освоения. Определить объемы и содержание геологоразведочных работ для каждого конкретного объекта.

3. Предусмотреть планами геологоразведочных работ специализированные работы по доразведке месторождений. Ориентировать поисковые работы на открытие месторождений, пригодных для отработки геотехнологическими методами.

4. Разработать типовые схемы проведения опытных работ для опробования различных вариантов технологии. Составить соответствующие технические условия.

Глава IV  
ДИНАМИКА РАБОЧИХ  
И ПРОДУКТИВНЫХ ФЛЮИДОВ ПРИ ДОБЫЧЕ  
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ  
ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

---

§ 1. Задачи и особенности гидродинамических расчетов

Одним из основных составляющих геотехнологических процессов добычи полезных ископаемых является движение рабочих и продуктивных флюидов в недрах. От динамики и пространственной структуры потока зависят охват месторождения рабочими агентами, протекание основных и сопутствующих реакций, а также потери рабочих и продуктивных агентов во вмещающие породы, что в конечном счете определяет технико-экономические показатели геотехнологического предприятия.

В ряде случаев удается свести расчеты геотехнологического процесса к гидродинамическим расчетам движения жидкости в недрах.

Методика гидродинамических расчетов выбирается, прежде всего, в зависимости от режима движения флюидов. В геотехнологических процессах можно выделить следующие основные режимы движения рабочих агентов (рис. 22).

I. Режим течения в свободном пространстве:

а) напорный и напорно-гравитационный при растворении каменной и калийной солей; б) безнапорный — при растворении глауберовой соли; в) режим гидравлической струи — при скважинной гидродобыче.

II. Режим фильтрации в пористой среде:

г) гравитационный — при выщелачивании сухих и осушенных месторождений металлов; д) водонапорный и е) безнапорный — при выщелачивании металлов из обводненных месторождений; ж) водонапорно-гравитационный — при подземной выплавке серы, битума и др.; з) газовый — при газификации и возгонке.

Могут встречаться и другие, более сложные режимы движения (водо-газонапорный, режим растворенного газа и пр.).

Методика гидродинамических расчетов движения флюидов в различных режимах наиболее разработана в применении к задачам нефтяной гидрогазодинамики, мелиорации, захоронения промстоков. Вопросы гидродинамики при подземной разработке солей освещаются в работах П. А. Кулле, П. М. Дудко и др. Применительно к целям геотехнологических методов задачи гидродинамики частично рассматривались в работах [1, 4, 5]. В книге В. Г. Бахурова и И. К. Рудневой [13] приводятся уравнения для расчета расхода жидкости между линейными рядами

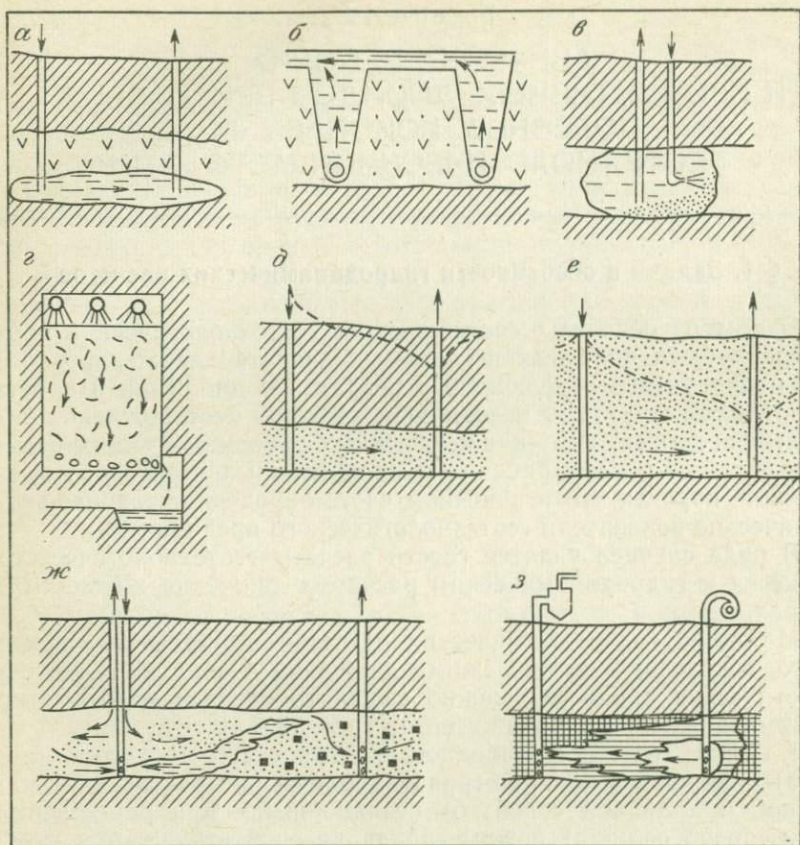


Рис. 22. Режимы движения флюидов при геотехнологических методах добычи полезных ископаемых:

*a-v* — в свободном пространстве (*a* — напорный, *б* — безнапорный, *в* — режим струи);  
*z-z* — в пористой среде (*z* — гравитационный, *д* — напорный, *е* — безнапорный, *ж* — напорно-гравитационный, *з* — газовый)

скважин, а также формулы для расчета средней концентрации. Методика гидродинамического и физико-химического расчетов процесса выщелачивания на примере отработки полиметаллического месторождения разработана Н. Н. Веригиным и А. В. Шибановым [24]. Н. Н. Веригиным дается также полный обзор решений задач физико-химической кинетики применительно к задачам подземного выщелачивания. Методика расчета дебита скважин при подземной газификации угля рассмотрена в статье Д. К. Семененко [90].

Расчеты потока жидкости в свободном пространстве. Различают потоки: 1) безнапорные (со свободной поверхностью); 2) напорные (в замкнутом простран-

стве с непроницаемыми границами) и 3) гидравлические струи (потoki, ограниченные жидкой или газовой средой). Движение потока жидкости в общем виде описывается известными уравнениями Эйлера с учетом неразрывности. Основными задачами при решении геотехнологических процессов являются расчеты движения флюидов в скважинах и в камере выщелачивания, а также разрушающего действия затопленной струи. Расчеты движения жидкостей в скважинах проводят с применением формул трубной гидравлики. Наиболее часто встречающейся при этом задачей является выбор оптимальных диаметров эксплуатационных колонн.

Завышенные диаметры приводят к увеличению затрат на бурение и оборудование скважин, а заниженные — к росту энергетических затрат на преодоление гидравлического сопротивления труб. Оптимальной является такая конструкция скважин, при которой сумма затрат на закачку и на сооружение скважины минимальна.

Расчеты движения жидкости в камере растворения ведутся с целью изучения поля скоростей жидкости, подаваемой и откачиваемой из скважины. Наиболее полно структура потока в добычной камере описывается известным дифференциальным уравнением движения вязкой несжимаемой жидкости Навье—Стокса, дополняемого краевыми условиями. Аналитическое решение этого уравнения возможно лишь для простейших случаев. При установившемся движении и без учета плотности задачи нахождения поля скоростей могут быть решены методом электрогидродинамической аналогии [102].

Методы расчетов затопленной струи наименее разработаны. Задача обычно сводится к определению давления струи на различных расстояниях от насадок в зависимости от их формы, давления и расхода воды [60]. Эти задачи, как правило, решаются по эмпирическим зависимостям или же путем физического моделирования.

Гравитационный режим фильтрации. Фильтрация жидкости под действием гравитационных сил наиболее характерна для технологии выщелачивания сухих и осушенных месторождений металлов, а также отвалов. Наиболее распространена схема выщелачивания, в которой предварительно производится дробление и магазинирование руды [14]. Орошение ведется разбрызгиванием рабочего раствора на верхнем горизонте, а дренаж — специальными выработками под раздробленным блоком. Характер фильтрации рабочих и продуктивных растворов зависит от интенсивности орошения и от степени дробления, определяющей проницаемость массива. При малом расходе орошения стекание раствора осуществляется в виде пленки, обволакивающих куски породы. Повышение интенсивности орошения ведет к насыщению породы и при некотором расходе достигается сплошной поток.

Максимальный расход  $Q$  раствора достигается при полном насыщении и может быть определен при известном коэффициенте фильтрации  $k$  по формуле

$$Q = kF, \quad (\text{IV.1})$$

где  $F$  — площадь сечения потока.

При неполном насыщении в поровом пространстве находится газопо-жидкостная смесь. Из-за этого относительная проницаемость массива снижается. Кроме того, уменьшается и градиент фильтрации, так как разность давлений обусловлена массой столба газопо-жидкостной смеси. В этом случае напорный градиент фильтрации  $i$  численно равен коэффициенту насыщения массива водой  $\eta$ , и расход определяется по формуле

$$Q = k_{\eta} \eta F, \quad (\text{IV.2})$$

где  $k_{\eta}$  — относительная проницаемость для воды при данном насыщении.

Осредненная скорость нисходящего потока раствора определяется делением расхода на пористость пород.

Водонапорный режим фильтрации. Наиболее распространен при подземном выщелачивании обводненных месторождений металлов растворами, незначительно отличающимися по физическим свойствам от подземных вод.

При этом могут ставиться следующие основные задачи: 1) расчет гидродинамических полей фильтрации для определения направления и скорости фильтрации; 2) расчет приемистости нагнетательных и дебита дренажных скважин; 3) расчеты потерь растворов в кровлю и почву, а также в окружающие породы; 4) расчеты времени контакта раствора с породой по различным линиям тока; 5) определение положения границ вытеснения пластовой жидкости растворителем и т. п.

Водонапорно-гравитационный режим фильтрации. Необходимость учета гравитационной составляющей возникает тогда, когда разность плотностей двух жидкостей вызывает опускание более тяжелой к подошве пласта. Характерным примером водонапорно-гравитационного режима фильтрации является процесс подземной выплавки серы. Аналогичные задачи решаются в нефтяной гидродинамике при нахождении безводного режима эксплуатации скважин. Задачи совместной фильтрации двух жидкостей в общем случае не имеют решения. В практике используются различные упрощенные схемы. Так, например, в работе [5] рассматривается задача поршневого вытеснения пластовых вод теплоносителем в однородном по проницаемости и мощности пласте. Решение позволяет определить минимальный расход, при котором происходит вытеснение жидкости по всей мощности пласта. В этой же работе рассмотрены задачи определения времени всплытия теплоносителя, гра-

витационного разделения жидкой серы и воды в зоне плавления и ряд других.

Большое число задач фильтрации с учетом разности плотностей решены в приложении к добыче нефти [83, 104, 110], однако прямой перенос этих решений для целей геотехнологии возможен лишь в очень ограниченных рамках. Большой интерес представляет решение задачи о вытеснении подземных вод проточками при закачке их в линейную галерею, полученное Н. Н. Веригиным, В. С. Саркисяном и А. В. Шибановым [23].

**Потери рабочих агентов.** Под потерями рабочих агентов в общем случае понимается разность между общим и полезно использованным расходом агента. Потери рабочих агентов обуславливаются фильтрацией рабочего агента в породах кровли и почвы, а также вне контура рудного тела в плане. Первая возникает в случаях, когда рудная залежь является частью водоносного горизонта или когда покрывающие и подстилающие водоупоры являются относительными.

Вторая возникает тогда, когда линии тока рабочего раствора выходят за контур рудного тела. Для их оценки необходимо построить плановую гидродинамическую сетку и определить значение функции тока для участка, где растворы фильтруются по пустым породам. Чаще всего задачу удается решить методом электрогидродинамической аналогии. При правильном расположении эксплуатационных скважин эти потери незначительны.

Еще одной задачей гидродинамических расчетов является определение закономерностей фильтрации рабочих и продуктивных флюидов, оставшихся в недрах после окончания эксплуатации.

## **§ 2. Фильтрация однородной жидкости в однородном пласте в условиях взаимодействия систем нагнетательных и дренажных скважин**

Поставленная задача имеет наибольший практический интерес применительно к подземному выщелачиванию металлов из проницаемых руд слабоконцентрированными растворами. В этом случае принятые допущения вполне приемлемы для решения задач проектирования систем расположения скважин. Удовлетворительные результаты получаются также при расчетах приемистости серодобычных скважин на начальное время их работы, когда изменения фильтрационных свойств под влиянием теплоносителя еще незначительны.

Два ряда скважин неограниченной длины с равными и противоположными по знаку расходами. При достаточно большой длине ряда он может быть представлен в виде сплошной совершенной дрены с расходом, равным суммарному расходу скважин. Понижение (или

повышение) напора в зоне влияния одной совершенной дрены бесконечной протяженности определяется уравнением [19]

$$S = \frac{qL}{km} R; R = \sqrt{F_0} \operatorname{ierfc} \frac{\bar{y}}{2\sqrt{F_0}}; \bar{y} = \frac{y}{L}; F_0 = \frac{at}{L^2}, \quad (\text{IV.3})$$

где  $q$  — расход на единицу длины ряда (единичный расход);  $km$  — водопроницаемость пласта;  $R$  — безразмерное гидравлическое сопротивление;  $F_0$  — параметр Фурье (безразмерное время);  $a$  — пьезопроводность;  $t$  — время от начала работы;  $y$  — расстояние от ряда до точки, в которой определяется понижение;  $\bar{y}$  — безразмерное расстояние;  $L$  — линейный параметр, за который мы будем принимать расстояние между рядами скважин;  $\operatorname{ierfc}$  — табулированная функция;

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{ierfc} z &= \frac{e^{-z^2}}{\sqrt{\pi}} - z \operatorname{erfc} z; \\ \operatorname{erfc} z &= 1 - \operatorname{erf} z; \\ \operatorname{erf} z &= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-\alpha^2} d\alpha. \end{aligned} \right\} \quad (\text{IV.4})$$

Здесь  $z$  — аргумент указанных функций, в частности, в формуле

$$z = \frac{\bar{y}}{2\sqrt{F_0}}. \quad (\text{IV.5})$$

Используя метод суперпозиции, это решение можно применить для любого числа рядов скважин. Рассмотрим вначале работу двух рядов, из которых один является нагнетательным, другой — водоотливным. При этом полагаем, что единичные расходы везде одинаковы. Тогда изменение напора

$$S_{\text{сум}} = \frac{qL}{km} (R_{\text{н}} - R_{\text{в}}), \quad (\text{IV.6})$$

где  $R_{\text{н}}$ ,  $R_{\text{в}}$  — гидравлические сопротивления от работы нагнетательного и водоотливного рядов соответственно. Подставляя значения  $R$  и принимая за начало координат нагнетательный ряд скважин, получим

$$S_{\text{сум}} = \frac{qL}{km} \sqrt{F_0} \left( \operatorname{ierfc} \frac{\bar{y}}{2\sqrt{F_0}} - \operatorname{ierfc} \frac{|\bar{y}-1|}{2\sqrt{F_0}} \right). \quad (\text{IV.7})$$

Результаты числового анализа этого уравнения представлены на графике (рис. 23).

Функция симметрична относительно прямой  $\bar{y}=1/2$ , где  $R_{\text{сум}}=0$ . Это означает, что на середине между двумя рядами напор остается постоянным и равным естественному. В точках  $\bar{y}=0$  и  $\bar{y}=1$ , соответствующим рядам скважин, происходит быстрое изменение уровня; при  $F_0=100$  гидравлическое сопро-

тивление становится практически постоянным. Аналогично ведет себя функция при  $\bar{y} < 0$  и  $\bar{y} > 1$ , т. е. вне поля фильтрации, но здесь изменение уровня происходит медленнее.

Это ведет к тому, что в самом начале фильтрация воды происходит как от нагнетательного ряда к разгрузочному, так и в противоположную сторону. Однако продолжительность этого периода невелика, так как уже при  $F_0 > 100$  формула (IV.7) приобретает вид уравнения Дюпюи для линейного потока:

$$S(y=0) = \frac{qL}{2km}. \quad (IV.8)$$

Для напорных пластов с пьезопроводностью порядка  $10^6 \text{ м}^2/\text{сут}$  это означает, что уже через сутки между рядами, отстоящими на 100 м один от другого, фильтрация приобретает стационарный характер. Легко показать, что утечки рабочей жидкости от нагнетательного ряда в сторону, противоположную разгрузочному ряду, настолько малы, что ими можно пренебречь.

В том случае, если пласт не является бесконечным, а ограничен со стороны нагнетательного ряда непроницаемым контуром, параллельным рядам скважин, расчетная формула для вычисления понижения в любой точке приобретает вид:

$$S_{\text{сум}} = \frac{qL}{km} (R_{\text{н}} - R_{\text{в}} + R'_{\text{н}} - R'_{\text{в}}), \quad (IV.9)$$

где  $R_{\text{н}}$  и  $R_{\text{в}}$  — расстояние до отражения нагнетательного и водопитательного рядов соответственно.

Значения  $R'_{\text{н}}$  и  $R'_{\text{в}}$  определяются:

$$R'_{\text{н}} = \sqrt{F_0} \operatorname{ierfc} \frac{\bar{N}}{2\sqrt{F_0}}; \quad R_{\text{в}} = \sqrt{F_0} \operatorname{ierfc} \frac{\bar{N}+1}{2\sqrt{F_0}}, \quad (IV.10)$$

где  $\bar{N}$  соответствует двойному расстоянию до границы.

Числовой анализ уравнения показывает, что изменение понижения во времени в этом случае происходит так же, как и в неограниченном пласте, но при этом стационарный режим наступает тем быстрее, чем ближе расположена граница. Еще быстрее растет и становится постоянным гидравлическое сопротивление в случае, если непроницаемые границы имеются с

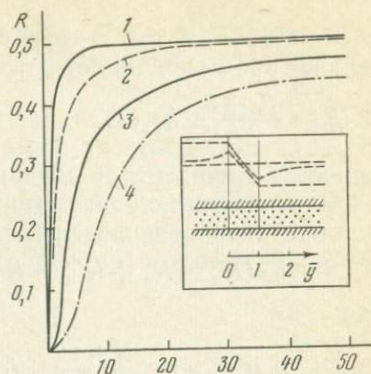


Рис. 23. Графики гидравлического сопротивления для двух взаимодействующих линейных дрен.

1 —  $\bar{y}=0$ ; 2 —  $\bar{y}=-1$ ; +2; 3 —  $\bar{y}=5$ ;  
4 —  $\bar{y}=10$

обеих сторон. В том и другом случае фильтрация через незначительное время подчиняется уравнению Дюпюи:

$$q = \frac{S_{\text{в}} + S_{\text{н}}}{L} km, \quad (\text{IV.11})$$

причем величины  $S_{\text{н}}$  и  $S_{\text{в}}$  зависят от расстояния до границ.

При наличии одной границы с постоянным напором формула для расчета изменения уровня приобретает вид:

$$S_{\text{сум}} = (R_{\text{н}} - R_{\text{в}} + R'_{\text{н}} - R'_{\text{в}}), \quad (\text{IV.12})$$

где

$$R'_{\text{н}} = \sqrt{F_0} \operatorname{erfc} \frac{\bar{N} + 1}{2\sqrt{F_0}}; \quad R'_{\text{в}} = \sqrt{F_0} \operatorname{erfc} \frac{\bar{N}}{2\sqrt{F_0}}.$$

Графики зависимости гидравлического сопротивления от параметра Фурье при различных расстояниях до границы с постоянным напором для  $\bar{y}=0$  (нагнетательный ряд) и  $\bar{y}=1$  (водоотливной ряд) приводятся на рис. 24.

Из графика видно, что в ряду, обращенном к границе I рода, в начальный момент происходит изменение уровня, которое переходит через максимум и затем снова уменьшается, приближаясь к первоначальному. В противоположном ряду изменение уровня асимптотически приближается к величине

$$S = \frac{qL}{km}. \quad (\text{IV.13})$$

Из этого следует, что потери рабочей жидкости в сторону открытой границы (или разбавление откачиваемого раствора,

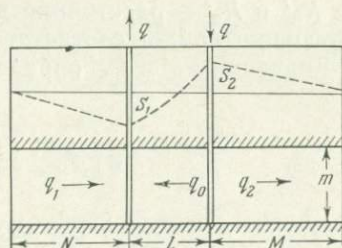
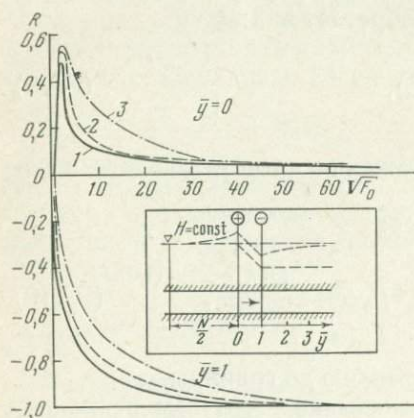


Рис. 24. Графики гидравлического сопротивления для двух взаимодействующих линейных дрен при наличии границы I рода.

1 —  $N=3$ ; 2 —  $N=5$ ; 3 —  $N=10$

Рис. 25. Схема расчета расходов при наличии двух границ с постоянным напором

если со стороны границы находится водоотливной ряд) происходят только до наступления установившегося режима фильтрации.

Совершенно иная картина наблюдается в том случае, если границы I рода имеются с обеих сторон системы. При этом установившееся движение наступает очень быстро, и в дальнейшем происходят постоянные потери из нагнетательного ряда и поступление пластовой воды в водоотливной ряд (рис. 25).

Величина утечек может быть найдена из условий баланса. Очевидно, что

$$q = q_0 + q_2; \quad q = q_0 + q_1, \quad (IV.14)$$

поэтому  $q_1 = q_2$  или  $(kmS_1)/N = (kmS_2)/M$ , откуда  $S_1/N = S_2/M$ . Кроме того,

$$q = km \left( \frac{S_1 + S_2}{L} + \frac{S_1}{N} \right).$$

Подставляя значение  $S_2 = (S_1M)/N$ , получаем:

$$q = kmS_1 \frac{N + M + L}{NL}; \quad S_1 = \frac{qNL}{km(M + N + L)};$$

$$S_2 = \frac{qML}{km(M + N + L)}; \quad q_1 = q_2 = \frac{qL}{N + M + L}. \quad (IV.15)$$

Таким образом, потери прямо пропорциональны расстоянию между рядами и обратно пропорциональны расстоянию от одной границы до другой. Из полученных соотношений следует также, что величина утечек не зависит от положения рядов (при фиксированном расстоянии между ними) относительно границ.

Основным условием в рассмотренных выше схемах является равенство расходов нагнетательного и водоотливного рядов при одновременном включении их в работу. В реальных условиях при подземной выплавке серы часто применяется разгрузка самоизливом. Тогда на линии водоотливного ряда мы имеем граничное условие I рода, а на линии нагнетательного ряда — II рода.

Изменение уровней в неограниченном пласте происходит в два этапа. Вначале действует только нагнетательный ряд до тех пор, пока уровень воды в водоотливном ряду не достигнет поверхности земли. В этот период изменение уровня описывается уравнением

$$S = \frac{qL}{km} \sqrt{F_0} \operatorname{ierfc} \frac{\bar{y}}{2\sqrt{F_0}}. \quad (IV.16)$$

График этой функции приводится на рис. 26. Используя этот график, можно определить время, за которое уровень

воды в водоотливном ряду достигнет поверхности. Для этого находим гидравлическое сопротивление по формуле

$$R = \frac{kmS}{qL}, \quad (IV.17)$$

где  $S$  — глубина от поверхности земли до пьезометрической поверхности.

По графику находим соответствующий параметр Фурье, и затем время:

$$t = \frac{L^2 F_0}{a}. \quad (IV.18)$$

Пример. Определить время начала самоизлива из скважин, расположенных в 200 м от нагнетательного ряда, при условиях:  $S=20$  м;  $km=10$  м<sup>2</sup>/сут;  $a=10^6$  м<sup>2</sup>/сут; расход в 1 скважину 20 м<sup>3</sup>/ч; расстояние между скважинами 40 м.

Находим единичный расход

$$q = \frac{20 \cdot 24}{40} = 12 \text{ м}^3/\text{сут},$$

затем гидравлическое сопротивление

$$R = \frac{10 \cdot 20}{12 \cdot 100} = 0,167.$$

По графику определяем параметр Фурье; он приблизительно равен единице. Находим время начала самоизлива

$$t = \frac{200^2 \cdot 1}{10^6} = 0,04 \text{ сут}.$$

Таким образом, самоизлив начинается практически одновременно с началом нагнетания. Из анализа расчетных формул видно, что при характерных для серных месторождений условиях время начала самоизлива ничтожно мало и в расчетах этот период можно не учитывать.

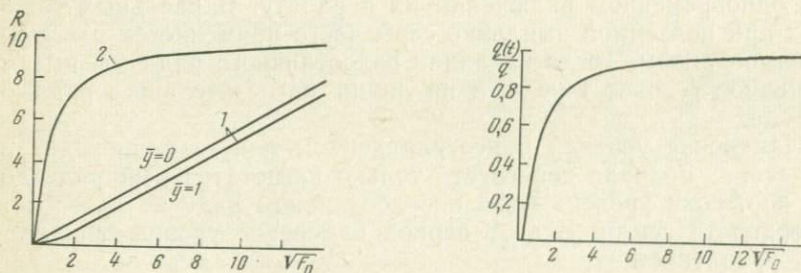


Рис. 26. Графики изменения напора при взаимодействии дрен с постоянными расходом и напором.

1 — гидравлическое сопротивление при работе I ряда; 2 — то же при работе обоих рядов

Рис. 27. График относительного расхода воды из водоотливного ряда при разгрузке самоизливом

После начала самоизлива водоотливной ряд представляет собой границу с постоянным напором и гидравлическое сопротивление определяется формулой:

$$R = \sqrt{F_0} \left( \operatorname{ierfc} \frac{\bar{y}}{2\sqrt{F_0}} - \operatorname{ierfc} \frac{\bar{y}+2}{2\sqrt{F_0}} \right). \quad (\text{IV.19})$$

График этой функции для линии, соответствующей нагнетательному ряду, приводится на рис. 26. Интересно оценить также, какая часть нагнетаемой воды будет разгружаться через водоотливной ряд.

Расходы воды в одну сторону от ряда, работающего в неограниченном пласте, определяется уравнением

$$q(t) = \frac{1}{2} q \operatorname{erfc} \frac{\bar{y}}{2\sqrt{F_0}}. \quad (\text{IV.20})$$

Используя метод суперпозиции, получим формулу при наличии водоотливного ряда, работающего на самоизлив:

$$q(t) = \frac{1}{2} q \left( \operatorname{erfc} \frac{\bar{y}}{2\sqrt{F_0}} \pm \operatorname{erfc} \frac{|\bar{y}-2|}{2\sqrt{F_0}} \right). \quad (\text{IV.21})$$

Знак плюс берется в области  $0 > \bar{y} > 1$ , т. е. между нагнетательным и водоотливным рядами, а знак минус — в области  $y < 0$ , т. е. с противоположной стороны.

При  $\bar{y} = 1$  формула принимает вид

$$q(t) = q \operatorname{erfc} \frac{1}{2\sqrt{F_0}}. \quad (\text{IV.22})$$

График функции  $q(t)/q$  приводится на рис. 27.

Если пласт является закрытым со стороны нагнетательного ряда, то общая закономерность фильтрации сохраняется, но процесс быстро становится стационарным и отношение  $q(t)/q$  уже через небольшой промежуток времени становится равным единице.

В том случае, если пласт имеет границу с постоянным напором, то расход нагнетаемой жидкости распределяется как в сторону водоотливного ряда, так и в сторону области разгрузки. Распределение расхода после наступления стационарного режима (рис. 28) определяется уравнениями

$$q_p = \frac{km(H_0 - H_p)}{N}; \quad q_b = \frac{km(H_0 - H_b)}{L}. \quad (\text{IV.23})$$

Решая их совместно, находим

$$H = \frac{qNL}{km(N+L)} + \frac{H_b N + H_p L}{N+L}; \quad (\text{IV.24})$$

$$q_b = \frac{qN}{N+L} + km \frac{H_p - H_b}{N+L}.$$

В частном случае, при  $H_B = H_P$  расход распределяется обратно пропорционально расстояниям:

$$q_B = \frac{qN}{N+L}; \quad q_P = \frac{qL}{N+L}. \quad (IV.25)$$

В реальных условиях при расчете распределения расходов следует в исходные формулы вводить значение  $km$  для соответствующих участков, при этом выражение для расчета расходов будет несколько более сложным.

Пример. Рассчитать расход водоотлива при  $km=10$  м<sup>2</sup>/сут;  $q=12$  м<sup>2</sup>/сут;  $L=200$  м;  $N=1000$  м;  $H_P - H_B = -20$  м;  $q_B = \frac{12 \cdot 100}{1200} - \frac{10 \cdot 20}{1200} = 10 - 0,167 = 9,83$  м<sup>2</sup>/сут, что составляет 82% от общего расхода.

Три бесконечных ряда скважин с расходами чередующихся знаков. Рассмотрим часто применяемую на практике систему, в которой расходы каждого из двух крайних рядов равны половине расхода центрального ряда и противоположны по знаку. За начало координат принимаем центральный ряд; за линейный параметр — расстояние между рядами.

Если обобщить ряд в сплошную галерею, то изменение уровня в любой точке определится выражением

$$S = \frac{qL}{km} \left( R_0 - \frac{1}{2} R_1 - \frac{1}{2} R_2 \right); \quad (IV.26)$$

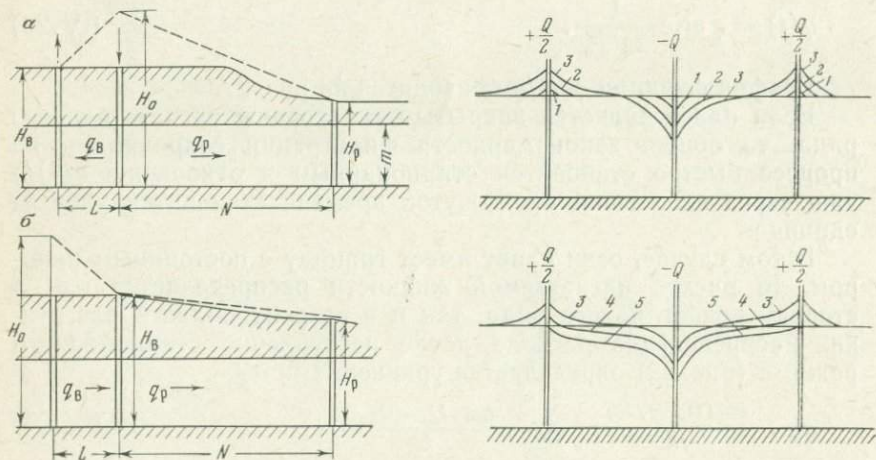


Рис. 28. Схема расчета потерь растворов при наличии границы с постоянным напором:

*a* — со стороны нагнетательного ряда; *b* — со стороны разгрузочного ряда

Рис. 29. Развитие депрессионной кривой при взаимодействии трех линейных дрен.

1, 2 — взаимовлияние отсутствует; 3 — зоны влияния сомкнулись; 4 — зона влияния вне системы уменьшается; 5 — установившийся режим

$$R_0 = \sqrt{F_0} \operatorname{ierfc} \frac{\bar{y}}{2\sqrt{F_0}}; \quad R_1 = \sqrt{F_0} \operatorname{ierfc} \frac{\bar{y}+1}{2\sqrt{F_0}}. \quad (\text{IV.27})$$

$$R_2 = \sqrt{F_0} \operatorname{ierfc} \frac{\bar{y}-1}{2\sqrt{F_0}}.$$

Анализ приведенных формул позволил установить, что в режиме движения жидкости можно выделить три фазы (рис. 29).

В момент времени  $t=0$  начинается откачка воды из дренажного ряда с единичным расходом  $q$ . С того же времени в каждый нагнетательный ряд начинает поступать расход  $q/2$ . В части пласта, примыкающей к дренажному ряду, формируется депрессия, а у нагнетательных скважин — репрессия, причем до некоторого времени взаимное влияние отсутствует (I фаза). В этот период от нагнетательных рядов жидкость поступает вправо и влево с расходами  $q/4$ . Вследствие этого в элементах пласта, заключенных между рядами, наблюдается дефицит жидкости и происходит дальнейшее снижение депрессионной поверхности в части пласта, примыкающей к дренажному ряду. В результате гидравлический уклон внутри контура увеличивается и все большая часть расхода от нагнетательных скважин поступает в сторону дренажных. Это движение (II фаза) наблюдается до тех пор, пока весь расход от нагнетательных скважин не станет поступать к дренажным. После этого режим фильтрации становится установившимся (III фаза).

В период неустановившегося движения происходят потери растворов из нагнетательных рядов в объеме, равном объему депрессионной воронки (для безнапорных вод). Для напорных вод установившийся режим фильтрации наступает практически мгновенно и потери не происходят (при указанных допущениях, рис. 30). После этого фильтрация описывается уравнением Дюпюи:

$$\begin{aligned} q_1 &= q_2 = \frac{kmS}{L}; \\ q &= q_1 + q_2 = \\ &= \frac{2kmS}{L}, \end{aligned} \quad (\text{IV.28})$$

где  $S$  — изменение уровня в центральном ряду.

Фильтрация жидкости при ограниченной длине рядов сква-

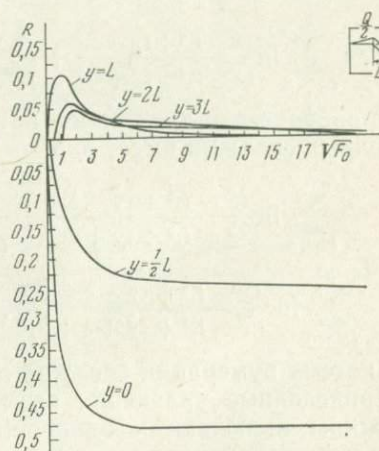


Рис. 30. Графики безразмерных сопротивлений для трех линейных дренажей

ж и н. В отличие от рассмотренных ранее расчетных схем, где фильтрацию можно было в первом приближении считать линейной, при ограниченной длине рядов наблюдается ярко выраженная плановая фильтрация.

Изменение напора в любой точке однородного безграничного пласта определяется по методу суперпозиции:

$$S = \frac{1}{4\pi km} \sum_{i=1}^n Q_i \ln r_i, \quad (IV.29)$$

где  $Q_i$  — расход каждой скважины;  $r_i$  — расстояние от точки, в которой определяется изменение уровня, до каждой из скважин (рис. 31).

В случае равнодебитных скважин, расположенных двумя параллельными рядами при расстоянии между рядами  $L$  и между скважинами в ряду  $b$  изменение уровня в точке с координатами  $x, y$  определится уравнением

$$S_{x, y} = \frac{Q}{4\pi kmR}; \quad R = \sum_{i=-n}^n \ln \frac{(x-ib)^2 + (y-L/2)^2}{(x-ib)^2 + (y+L/2)^2}. \quad (IV.30)$$

Учитывая, что между  $L$  и  $b$  существует кратная зависимость, заменим  $L/2$  на  $cb$ , а также разделим числитель и знаменатель на  $b$ . Тогда формула примет вид

$$R = \sum_{i=-n}^n \ln \frac{(\bar{x}-i)^2 + (\bar{y}-c)^2}{(\bar{x}-i)^2 + (\bar{y}+c)^2}; \quad \bar{y} = \frac{y}{b}; \quad \bar{x} = \frac{x}{b}. \quad (IV.31)$$

Если в работе находятся два водоотливных и два нагнетательных ряда скважин, расположенных в шахматном порядке, гидравлическое сопротивление определяется уравнением

$$R = \sum_{i=-n}^n \ln \frac{(\bar{x}-i)^2 + (\bar{y}-c)^2}{(\bar{x}-i)^2 + (\bar{y}+c)^2} + \sum_{i=-n}^{n+1} \ln \frac{(\bar{x}-i+0,5)^2 + (\bar{y}-c-1)^2}{(\bar{x}-i+0,5)^2 + (\bar{y}+c+1)^2} \quad (IV.32)$$

Уравнение для трех рядов нагнетательных и трех рядов разгрузочных скважин имеет вид

$$R = \sum_{i=-n}^n \ln \frac{(\bar{x}-i)^2 + (\bar{y}-c)^2}{(\bar{x}-i)^2 + (\bar{y}+c)^2} + \sum_{i=-n}^{n+1} \ln \frac{(\bar{x}-i+0,5)^2 + (\bar{y}-c-1)^2}{(\bar{x}-i+0,5)^2 + (\bar{y}+c+1)^2} + \sum_{i=-n}^n \ln \frac{(\bar{x}-i)^2 + (\bar{y}-c-2)^2}{(\bar{x}-i)^2 + (\bar{y}+c+2)^2}. \quad (IV.33)$$

Система нумерации скважин показана на рис. 31.

Приведенные уравнения выведены при допущении, что все скважины включаются одновременно и работают с одинаковыми и постоянными расходами.

В реальных условиях часто применяется схема, в которой ряд водопонизительных скважин служит границей с постоян-

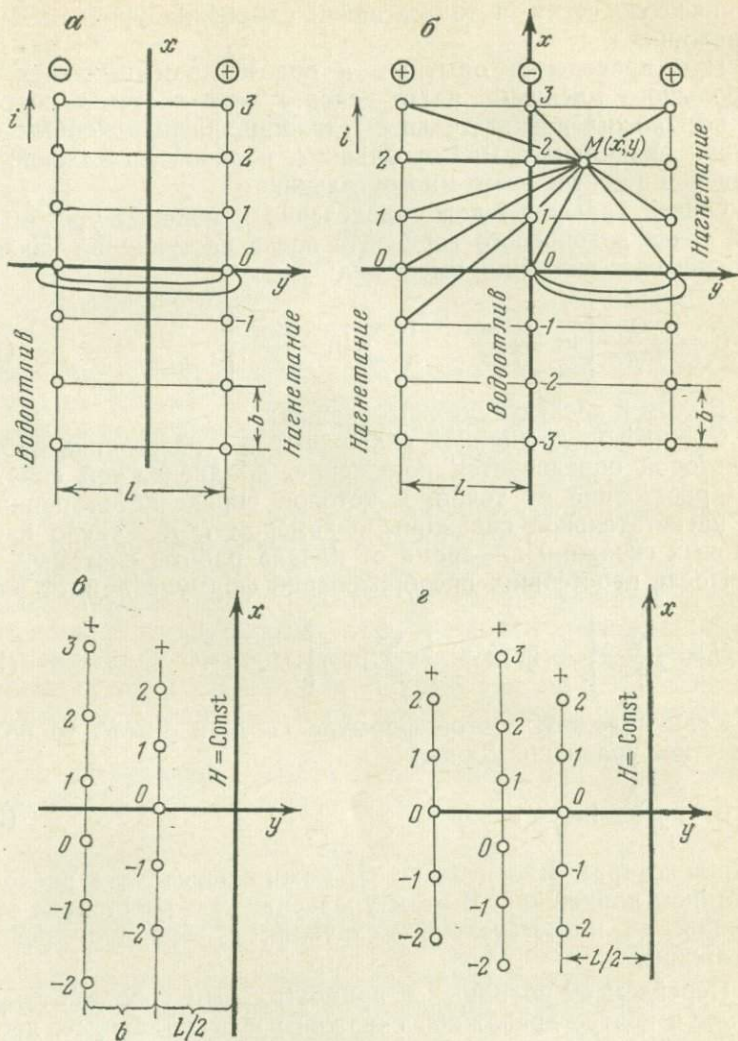


Рис. 31. Схемы к расчету взаимодействующих скважин:

$\alpha$  — два ряда с равными и противоположными по знаку расходами;  $\beta$  — три ряда, где в крайние ряды подается половинный расход;  $\nu$ ,  $z$  — два и три ряда при условии разгрузки самоизливом на расстоянии  $L$

ным напором, значение которого определяется выбранным способом водоотлива.

При этой схеме приведенные формулы остаются в силе с той лишь разницей, что  $cb = L$ .

Используя приведенные формулы, можно рассчитать давление в любой точке пласта, и, следовательно, построить гидроди-

намическую сетку, а также найти изменения уровней в самих скважинах.

При проведении опытных и опытно-промышленных работ небольшого масштаба часто используются системы, состоящие из нескольких нагнетательных скважин, расположенных в вершинах правильного многоугольника, и одной дренажной, находящейся в центре этого многоугольника.

Общее уравнение для определения изменения уровня в любой точке водоносного горизонта после наступления квазиустановившегося движения имеет вид:

$$S = \frac{Q}{4\pi km} \left[ \ln \frac{2,25 at}{r^2} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln \frac{2,25 at}{\rho_i^2} \right]. \quad (IV.34)$$

В этом и последующих выражениях:

$Q$  — расход дренажной скважины;  $r_i$  — расстояние от точки, в которой определяется понижение, до дренажной скважины;  $\rho_i$  — расстояние от точки, в которой определяется понижение, до нагнетательной скважины с номером  $i$ ;  $n$  — число нагнетательных скважин;  $t$  — время от начала работы системы.

После простейших преобразований формула примет вид

$$S = \frac{Q}{4\pi km} \left[ -\ln r^2 + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln \rho_i \right]. \quad (IV.35)$$

Если положим в этой формуле  $r=r_c$  и  $\rho_i=R$ , то получим известное уравнение Дююи:

$$S = \frac{Q}{2\pi km} \ln \frac{R}{r_c}, \quad (IV.36)$$

решая которое относительно  $Q$ , можно определить расход при заданном понижении. В этом уравнении  $R$  — расстояние от дренажной до нагнетательных скважин,  $r_c$  — радиус дренажной скважины.

Перейдем от полярных к прямоугольным координатам с началом в центре дренажной скважины и осью абсцисс, проходящей через  $n$ -ую нагнетательную скважину, тогда

$$r^2 = x^2 + y^2; \quad \rho_i = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2, \quad (IV.37)$$

где  $x, y$  — координаты точки, в которой определяется изменение уровня;  $x_i, y_i$  — координаты нагнетательных скважин.

Учитывая что

$$x_i = R \cos \alpha; \quad y_i = R \sin \alpha, \quad (IV.38)$$

где  $\alpha_i$  — угол между лучом, проходящим из начала координат через нагнетательную скважину с номером  $i$ , и осью абсцисс;  $R$  — расстояние от нагнетательной до дренажной скважины.

Величина угла  $\alpha_i$  может быть определена по формуле

$$\alpha_i = \frac{2\pi i}{n}. \quad (\text{IV.39})$$

Перепиcывая выражение (IV.35) с учетом (IV.37—IV.39), получаем

$$S = \frac{Q}{4\pi km} \left[ \ln |x^2 + y^2| + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[ \ln \left| \left( x - R \cos \frac{2\pi i}{n} \right)^2 + \left( y - R \sin \frac{2\pi i}{n} \right)^2 \right| \right] \right]. \quad (\text{IV.40})$$

Уравнение (IV.40) полезно представить в безразмерном виде, принимая за единицу измерения координат расстояние между дренажной и нагнетательными скважинами  $R$ . Тогда выражение, заключенное в квадратные скобки, не будет зависеть ни от параметров пласта, ни от расстояния между скважинами. Последняя формула может служить для расчета гидродинамической сетки, пример которой приводится на рис. 32.

Целесообразно также рассмотреть гидродинамику системы с гидравлической завесой. Особенность ее заключается в том, что она состоит из двух нагнетательных и двух дренажных скважин с равными и постоянными расходами (рис. 33). Внешние скважины системы служат для защиты растворов от растекания; движение последних происходит в строго ограниченном участке.

Изменение уровня в любой точке пласта при работе такой системы определяется по формуле

$$S = \frac{Q}{4\pi km} \left\{ \ln [\bar{x}^2 + (\bar{y} - 1 - \bar{a})^2] + \ln [\bar{x}^2 + (\bar{y} - 1)^2] - \ln [\bar{x}^2 + (\bar{y} + 1)^2] - \ln [\bar{x}^2 + (\bar{y} + 1 + \bar{a})^2] \right\}, \quad (\text{IV.41})$$

где  $a$  — расстояние от рабочей до защитной скважины.

За единицу измерения координат принята половина расстояния между рабочими скважинами.

Определение скорости и времени продвижения фронта растворов (однородная жидкость в однородной среде). Указанная задача представляет большой интерес, так как ее решение является основой для прогнозирования концентраций продуктивных флюидов. В процессе извлечения полезных ископаемых из пористой среды обычно различаются следующие стадии: вытеснение порового раствора рабочим агентом; нейтрализация минералов, более активных по сравнению с полезным ископаемым, формирование и фильтрация продуктивных флюидов; вытеснение последних порций продуктивного флюида пустым рабочим раствором [24].

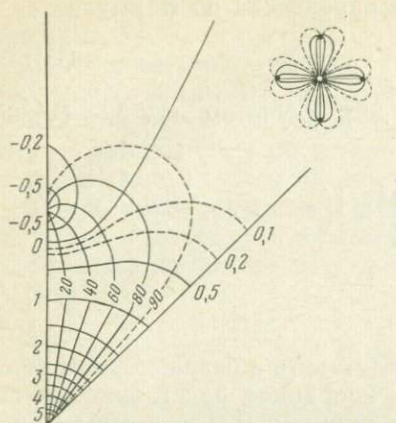


Рис. 32. Стандартная гидродинамическая сетка для пятискважинной системы откачки-нагнетания. Цифры на линиях напора — безразмерное гидравлическое сопротивление; на линиях тока — функция тока, в процентах от расхода внешних скважин

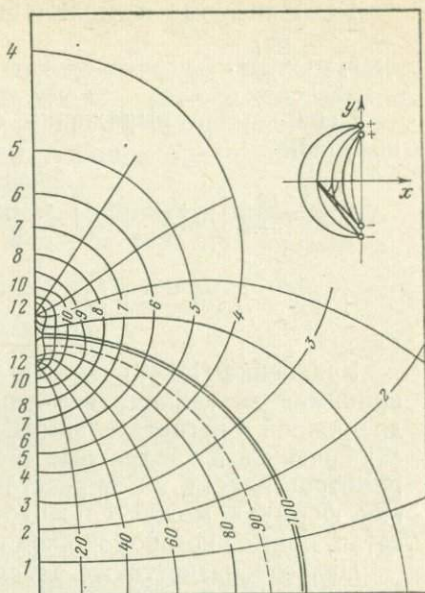


Рис. 33. Стандартная гидродинамическая сетка для системы с гидравлической завесой

Естественно, что выходные параметры процесса во многом определяются скоростью фильтрации.

При расчете скорости движения в некоторых случаях может применяться прием замены линейной цепочки скважин сплошной галереей. В этом случае оказывается, что растворы приходят от нагнетательного к дренажному ряду одновременно во всех точках. При этом грубом допущении можно считать, что:

$$V = -\frac{q}{mn_0} = \text{const}, \quad (\text{IV.42})$$

где  $q$  — единичный расход на 1 м ширины потока;  $m$  — мощность рудосодержащего водоносного горизонта.

Время фильтрации определяется отношением объема порового пространства к расходу раствора:

$$T = \frac{mn_0L}{q}, \quad (\text{IV.43})$$

где  $L$  — расстояние между рядами.

Указанная методика применима при грубых оценках скорости фильтрации в системах с густым расположением скважин в ряду и большим расстоянием между рядами, т. е. в тех случаях, когда фильтрацию можно считать линейной.

Более точное решение этой задачи производится по следующей методике.

Скорость определяется дифференцированием функции напора по линии тока:

$$V = \frac{k}{n_0} \frac{dS}{dl}, \quad (\text{IV.44})$$

где  $dl$  — элементарный отрезок линии тока.

Время прохождения частицей жидкости элементарной линии тока равно

$$dt = \frac{dl}{V} = \frac{dl}{\frac{k}{n_0} \frac{dS}{dl}}. \quad (\text{IV.45})$$

Время, за которое частица пройдет расстояние от  $l_1$  до  $l_2$ , составит:

$$T = \int_0^T dt = \frac{n_0}{k} \int_{l_1}^{l_2} \frac{1}{\frac{dS}{dl}} dl. \quad (\text{IV.46})$$

Нахождение криволинейного интеграла требует очень громоздких вычислений. На практике часто можно ограничиться расчетами по главной линии тока, представляющей кратчайшую линию, соединяющую скважины.

В качестве примера рассмотрим фильтрацию жидкости между двумя прямолинейными рядами скважин с равными и постоянными расходами противоположного знака. Подобная задача рассматривалась Е. Л. Минкиным [64], В. М. Гольдбергом [31] и другими в связи с вопросами охраны подземных вод от загрязнения.

Функция напора для указанной схемы имеет вид

$$S = \frac{Q}{4\pi km} \sum_{i=-n}^n \ln \frac{(\bar{x} - i)^2 + (\bar{y} - c)^2}{(\bar{x} - i)^2 + (\bar{y} + c)^2}. \quad (\text{IV.47})$$

Для главной линии тока ( $x=0$ )

$$S = \frac{Q}{4\pi km} \sum_{i=-n}^n \ln \frac{i^2 + (\bar{y} - c)^2}{i^2 + (\bar{y} + c)^2}. \quad (\text{IV.48})$$

Градиент напора в любой точке составит

$$\frac{dS}{d\bar{y}} = \frac{Q}{2\pi kmb} \sum_{i=-n}^n \left( \frac{\bar{y} - c}{i^2 + (\bar{y} - c)^2} - \frac{\bar{y} + c}{i^2 + (\bar{y} + c)^2} \right). \quad (\text{IV.49})$$

Скорость фильтрации определяется произведением градиента напора на коэффициент фильтрации.

Время прохождения отрезка  $\bar{y}_2 - y_1$  равно

$$T = \int_{\bar{y}_1}^{\bar{y}_2} \frac{d\bar{y}b}{V} = \frac{2\pi mn_0 b^2}{Q} \int_{\bar{y}_1}^{\bar{y}_2} \frac{d\bar{y}}{\sum_{i=-n}^n \left[ \frac{\bar{y} - c}{i^2 + (\bar{y} - c)^2} - \frac{\bar{y} + c}{i^2 + (\bar{y} + c)^2} \right]}. \quad (\text{IV.50})$$

Если требуется определить время движения жидкости от нагнетательной скважины до дренажной, интегрирование ведется в пределах от 0 до  $T_0$  и от  $-L/2$  до  $+L/2$ , где  $L$  — расстояние между рядами.

Аналитическое вычисление интеграла возможно только для некоторых частных случаев.

Например, при  $i=0$  (две скважины с равными расходами противоположного знака) время движения от нагнетательной скважины до точки, находящейся на расстоянии  $r$ , составит

$$T = \frac{2\pi mn_0}{QL} \left( \frac{r^3}{3} - \frac{Lr^2}{2} \right), \quad (\text{IV.51})$$

а до дренажной скважины ( $r=L$ )

$$T = \frac{\pi}{3} \frac{mn_0 L^2}{Q}. \quad (\text{IV.52})$$

Для лучевых систем время движения по главной линии тока выражается формулой

$$T = \frac{n}{n+2} \frac{\pi mn_0 L^2}{Q}, \quad (\text{IV.53})$$

где  $n$  — число лучей.

Для системы с гидравлической завесой

$$T = \frac{\pi}{6} \frac{mn_0 L^2}{Q}. \quad (\text{IV.54})$$

Задача расчета времени движения частицы жидкости по криволинейным линиям тока является чрезвычайно сложной и решена только для некоторых простейших схем [31].

Для практических расчетов может применяться следующая приближенная методика. По известной функции напора строят гидродинамическую сетку фильтрации и производят замер длины линий тока курвиметром. Поскольку уравнения фильтрации по всем линиям тока одинаковы, то для вычисления времени движения по любой линии достаточно подставить в формулу для данной системы длину соответствующей линии тока. Из анализа

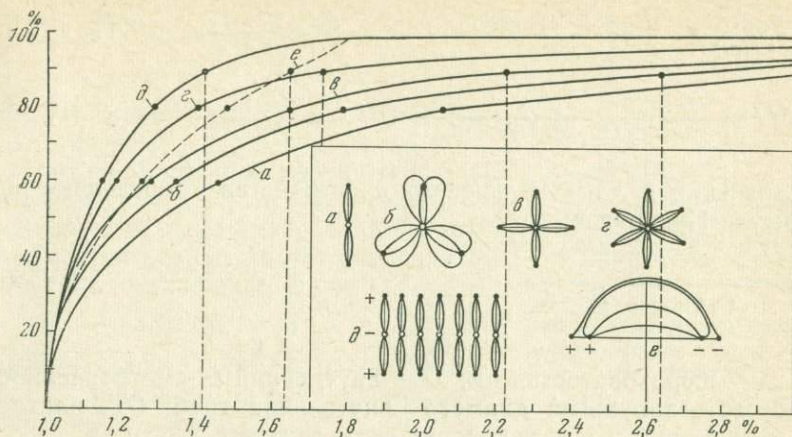


Рис. 34. Графики для определения длин линий тока в различных системах скважин (по вертикали — расход, ограничиваемый линией, по горизонтали — отношение длины линий тока к длине главной линии; а—е — типовые системы)

приведенных формул видно, что время движения по криволинейным линиям тока увеличивается по сравнению с временем движения по главной линии пропорционально квадрату отношения длин линий.

Для некоторых схем расположения скважин длину линий тока можно определить по графику (рис. 34).

### § 3. Несовершенство эксплуатационных скважин. Зависимость между устьевым давлением и расходом

Эксплуатационные геотехнологические скважины, как правило, являются *несовершенными*, т. е. обуславливают дополнительные гидравлические сопротивления. Последние могут быть вызваны неполным вскрытием пласта, сопротивлением фильтра, изменением структуры пород в прискважинной зоне, отклонением от линейного закона фильтрации в призабойной зоне, а также сопротивлением труб. Имеется ряд формул, позволяющих учесть дополнительные сопротивления и, таким образом, определить разность между напорами на устье скважины и в прискважинной зоне пласта.

При геотехнологических методах подачу жидкости нередко осуществляют по кольцевым зазорам между концентрически расположенными колоннами труб, при этом возникает существенное дополнительное сопротивление. Для практических целей наибольший интерес представляет режим подачи жидкости, при котором число Рейнольдса составляет от  $10^4$  до  $10^6$ , т. е. движение приобретает автомодельный режим.

Формула Дарси—Вейсбаха для кольцевых зазоров имеет вид [107]:

$$\Delta H = \frac{8}{\pi^2 g} \cdot \frac{\lambda}{(D - d_n)^3 (D + d_n)^2} Q^2 l. \quad (\text{IV.55})$$

Значение  $\lambda$  для кольцевого пространства определяют по формуле Нукурадзе:

$$\lambda = \frac{1}{1,74 + 2 \lg \frac{D - d_n}{2 \Delta}}, \quad (\text{IV.56})$$

где  $\Delta$  — шероховатость, мм;  $D$  — внутренний диаметр внешних труб;  $d_n$  — наружный диаметр внутренних труб;  $Q$  — расход;  $l$  — длина трубы;  $g$  — ускорение силы тяжести.

Обозначим величину  $\frac{8}{\pi^2 g} \cdot \frac{\lambda}{(D - d_n)^3 (D + d_n)^2}$  в формуле (IV.55) через  $c$ , тогда

$$\Delta H = c Q^2 l. \quad (\text{IV.57})$$

Для упрощения расчетов величины  $c$  составлена табл. 8.

Одним из вопросов, не нашедших отражения в литературе, является оценка несовершенства скважин по степени вскрытия в скальных породах. Имеющиеся формулы не могут быть использованы, так как между фильтром скважины и породами остается зазор, равный разности диаметров скважины и фильтра. Очевидно, что жидкость, выходящая (или входящая) из отверстий фильтра, частично распространяется по этому зазору. Если зазор велик, скважина приближается к совершенной по степени вскрытия, и наоборот, при отсутствии зазора скважина превращается в несовершенную и к ней могут быть применены известные формулы Н. Н. Веригина [20].

Чтобы оценить влияние кольцевого зазора, разобьем пласт на элементарные отрезки высотой  $\Delta y$  (рис. 35). Если напор в

Таблица 8

Наружный диаметр		Внутренний диаметр внешних труб	$\lambda$	$c, \text{ч}^2/\text{м}^5$
внешних труб	внутренних труб			
89	34	76	0,0299	$2,137 \cdot 10^{-4}$
114	34	100	0,0262	$3,048 \cdot 10^{-5}$
168	34	150	0,0225	$4,120 \cdot 10^{-6}$
168	89	150	0,0270	$1,335 \cdot 10^{-5}$
168	114	150	0,0465	$9,089 \cdot 10^{-5}$

сечении  $y$  равен  $S$ , то в сечении  $y + \Delta y$  он станет меньше на величину

$$\Delta S = -cQ^2 \Delta y, \quad (IV.58)$$

где  $Q$  — средний расход на элементарном отрезке.

Расход жидкости, движущейся по затрубному пространству, постоянно уменьшается из-за фильтрации в пласт. На участке длиной  $\Delta y$  это уменьшение по формуле Дююи составит

$$\Delta Q = -\alpha S_{\text{ср}} \Delta y, \quad (IV.59)$$

где  $\alpha$  — коэффициент пропорциональности, зависящий от проницаемости и граничных условий.

Разделив одно уравнение на другое, получим

$$cQ^2 dQ = \alpha S dS. \quad (IV.60)$$

Интегрируя это уравнение от  $Q_0$  до  $Q_y$  и от  $S_0$  до  $S_y$  получаем

$$S_y^2 = S_0^2 - \frac{2c}{3\alpha} (Q_0^3 - Q_y^3). \quad (IV.61)$$

Для сечения, соответствующего кровле пласта,

$$Q_y = 0 \text{ и } S = \sqrt{S_0^2 - \frac{2c}{3\alpha} Q_0^3}. \quad (IV.62)$$

Коэффициент  $c$  зависит от коэффициента трения и диаметров ствола скважины и труб. Значения его (в  $\text{ч}^2/\text{м}^6$ ) при шероховатости 1 мм приведены ниже

Диаметр труб, мм . . . . .	83	114	168
Диаметр ствола 200 мм	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$	$9,9 \cdot 10^{-3}$
То же 251 мм . . . . .	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$2,9 \cdot 10^{-4}$	$6,7 \cdot 10^{-3}$

Величина  $\alpha$  имеет порядок, близкий к значению коэффициента фильтрации,  $\alpha \approx k$ .

Пример. Оценим величину  $S$  для условий Гаурдака:  $Q=60 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;  $\alpha=1 \text{ м}/\text{ч}$ ;  $S_0=20 \text{ м}$ ;  $c=3 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^2/\text{м}^6$ :

$$S = \sqrt{400 - \frac{2 \cdot 3 \cdot 10^{-4}}{3 \cdot 1} \cdot 60^3} = 19 \text{ м.}$$

Для условий Яворовского рудника ПВС:  $Q=20 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;  $\alpha=0,1 \text{ м}/\text{ч}$ ;  $S=100 \text{ м}$ ;  $c=3 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^2/\text{м}^6$ ;  $S=100 \text{ м}$ .

Таким образом, в условиях Яворовского месторождения несовершенство по степени вскрытия можно не учитывать. В то же время в условиях Гаурдакского месторождения несовершенство существенно влияет на характер движения жидкости в прискважинной зоне, вызывая преимущественную фильтрацию в нижней части, что играет положительную роль.

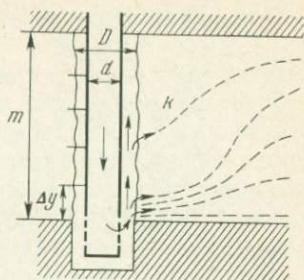


Рис. 35. Схема для расчета потерь напора в затрубном пространстве

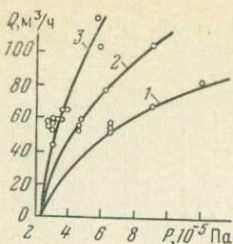


Рис. 36. Кривые зависимости расхода от давления теплоносителя на устье серодобычных скважин при нагнетании

1 — по водной колонне; 2 — по серной колонне; 3 — по обеим колоннам

Влияние гидравлического сопротивления труб и несовершенства скважин приводит к нарушению обычной прямой зависимости между дебитом и понижением (устьевым давлением и расходом). Кроме того, на характер такой зависимости влияет разность плотностей нагнетаемой и пластовой воды. В начальный момент, когда нагнетаемой жидкостью заполнен только ствол скважины, дополнительный напор над устьем в результате разности плотностей  $\Delta\rho$  составляет

$$\Delta H_1 = \Delta\rho H - \rho_n h, \quad (\text{IV.63})$$

где  $H$  — напор пластовой воды над кровлей;  $\rho_n$  — плотность нагнетаемой жидкости;  $h$  — глубина статического уровня от поверхности земли.

Значение начального давления при подземной выплавке серы в условиях Гаурдака достигает 0,3—0,5 МПа. Эмпирические зависимости расхода от давления на устье при работе одиночных скважин приведены на рис. 36, эти кривые удовлетворительно описываются уравнением

$$H_y = cLQ^2 + NQ + \Delta\rho H - \rho_n h, \quad (\text{IV.64})$$

где  $c$  — коэффициент гидравлического сопротивления труб;  $L$  — длина колонны;  $N$  — коэффициент, зависящий от гидрогеологических параметров пласта;  $\Delta\rho$  — разность плотностей нагнетаемой и пластовой воды;  $H$  — напор пластовых вод над кровлей;  $\rho_n$  — плотность теплоносителя;  $h$  — глубина от поверхности до уровня воды в естественном состоянии.

Графически эта зависимость представляется в виде параболы, смещенной по оси давлений на величину, равную начальному давлению.

#### § 4. Методика расчета водопроницаемости скважин с учетом их взаимодействия \*

Одной из основных задач при проектировании отработки месторождений геотехнологическими способами является выбор расположения эксплуатационных скважин, обеспечивающий за-

\* Раздел составлен при участии Т. Ф. Новиковой.

данную приемистость (дебит) каждой скважины и всей системы в целом.

Решение этой задачи начинается с анализа начальных и граничных условий рудовмещающего водоносного горизонта. С этой точки зрения можно выделить месторождения с границами I рода и месторождения, ограниченные в плане непроницаемыми породами. Расстояние между скважинами, расход рабочих растворов, подаваемых в одну скважину и суммарный его расход выбираются из технологических соображений и являются заданными параметрами. Требуется найти систему нагнетания и откачки воды, удовлетворяющую этим параметрам.

Рассмотрим методику решения этих задач на примере Гаурдакского и Язовского месторождений, обрабатываемых подземной выплавкой.

В условиях Гаурдакского месторождения задаются следующие исходные данные: давление на устье скважин не менее 0,6 МПа, приемистость каждой скважины не менее 100 м<sup>3</sup>/ч, расположение скважин по сетке 25×25 м в шахматном порядке рядами, параллельными границе безнапорной зоны, расстояние до которой 300 м. Водопроницаемость пласта 200 м<sup>2</sup>/сут. Суммарный объем вырабатываемого теплоносителя — 500 м<sup>3</sup>/ч. Начальный уровень воды на глубине 60 м; глубина до кровли рудного тела 250 м, мощность руды 40 м. Скважины имеют водную колонну 168 мм и серную 114 мм. Плотность пластовых вод 1,05.

Определим сначала положение уровня теплоносителя вследствие разности плотностей по формуле

$$\Delta H_1 = \Delta \rho H_c - h \rho_r, \quad (IV.65)$$

где  $\Delta \rho$  — разность плотностей пластовой воды и теплоносителя;  $H_c$  — высота столба пластовой воды над кровлей;  $h$  — глубина от поверхности земли до уровня воды;  $\rho_r$  — плотность теплоносителя.

$$\Delta H_1 = 0,15 \cdot 190 - 60 \cdot 0,9 = -26 \text{ м.}$$

Потери на трение определяем для условий подачи теплоносителя по серной колонне

$$\Delta H_2 = c L Q^2. \quad (IV.66)$$

Значение  $c$  принимаем по опытным данным равным  $3 \cdot 10^{-5} \times \Delta H_2 = 3 \cdot 10^{-5} \cdot 290 \cdot 100^2 = 87 \text{ м.}$

Избыточный напор на устье вследствие сопротивления труб и начального давления составит  $87 - 26 = 61 \text{ м.}$

Таким образом, минимальное давление на устье будет обеспечено при любом расположении скважин.

Теперь определим повышение пластового давления в результате нагнетания воды. Используя известный метод отображе-

ния, получим следующую формулу для определения изменения уровня под влиянием линейного ряда из пяти скважин:

$$S = \frac{Q}{4\pi km} R; \quad R = \sum_{i=-2}^2 \ln \frac{(\bar{x} - i)^2 + (\bar{y} - c)^2}{(\bar{x} - i)^2 + (\bar{y} + c)^2}, \quad (\text{IV.67})$$

где  $x = x/b$ ;  $\bar{y} = y/b$ ;  $c = L/b$ ;  $L$  — расстояние до границы с постоянным напором;  $b$  — расстояние между скважинами;  $x, y$  — координаты точки, в которой определяется изменение напора. Для центральной скважины ( $x=0, y=L+r_0$ )

$$R = 2 \ln \frac{r_0}{2L} + 2 \ln \frac{b^4}{(b^2 + 4L^2)(b^2 + L^2)}. \quad (\text{IV.68})$$

Подставив значения  $r_0=0,1$ ;  $b=25$ ;  $L=300$ , получим  $R=-35,0$ . Отсюда

$$S = \frac{100 \cdot 24}{4 \cdot 3,14 \cdot 200} \cdot 35,0 = 33 \text{ м.}$$

Окончательно, напор на устье скважины в центре ряда составит  $61+33=94$  м. В остальных скважинах давления будут иметь промежуточные значения.

Аналогичным образом можно рассчитать давление на устье при любом другом расположении скважин.

Расчет приемистости в условиях месторождений с закрытыми или весьма удаленными границами имеет некоторые особенности. Рассмотрим решение задачи о приемистости для условий Язовского месторождения со следующими заданными параметрами: водопроницаемость пласта  $10 \text{ м}^2/\text{сут}$ , скважины расположены рядами с расстоянием  $40$  м между скважинами в шахматном порядке; приемистость одной скважины не менее  $10 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; давление на устье не более  $1,5 \text{ МПа}$ , разгрузка ведется из двух водоотливных рядов скважин на удалении  $120$  м от действующих серодобычных скважин поверхностными центробежными насосами. Пласт мощностью  $15$  м залегает на глубине  $220$  м. Производительность котельной  $800 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Минерализация воды  $4 \text{ г/л}$ .

Прежде всего убедимся, что потери напора на трение в технологических колоннах ничтожны и могут не учитываться. Так, при  $c=2 \cdot 10^{-5}$  и  $L=230$  м получим

$$\Delta H_2 = cLQ^2 = 2 \cdot 10^{-5} \cdot 230 \cdot 10^2 = 0,46 \text{ м.}$$

С точки зрения технологии выгодно иметь в работе не менее двух рядов серодобычных скважин. Тогда всего будет в работе  $80$  скважин, по  $40$  скважин в ряду. На каждую добычную скважину будет приходиться  $1$  водоотливная скважина, дебит которой будет также равен  $10 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Ряд водоотливных скважин представляет собой границу с постоянным напором. Средняя отметка этого напора может

быть определена через дополнительное понижение в дискретных источниках по сравнению с линейной дреной [110]

$$S_{\text{доп}} = \frac{Q}{2\pi km} \ln \frac{b}{2\pi r_0}, \quad (\text{IV.69})$$

где  $b$  — расстояние между скважинами;  $r_0$  — радиус скважин. При  $b=40$  м;  $r_0=0,1$  и  $Q=10$  м<sup>3</sup>/ч получим

$$S_{\text{доп}} = \frac{10 \cdot 24}{6,28 \cdot 10} \cdot \ln \frac{40}{6,28 \cdot 0,1} = 16 \text{ м.}$$

Уровень в скважинах находится на глубине всаса центробежных насосов — 7 м. Средний напор в равноценной сплошной галерее будет составлять  $16-7=9$  м выше поверхности земли.

Рассматривая водоотливной ряд как границу с постоянным напором, составим, используя метод суперпозиции, уравнение для расчета повышения уровня:

$$S_{x,y} = \frac{Q}{4\pi km} R; \quad (\text{IV.70})$$

$$R = \sum_{i=-n}^n \ln \frac{(\bar{x}-i)^2 + (\bar{y}-c)^2}{(\bar{x}-i)^2 + (\bar{y}+c)^2} + \sum \ln \frac{(\bar{x}-i+0,5)^2 + (\bar{y}-c-1)^2}{(\bar{x}-i+0,5)^2 + (\bar{y}+c+1)^2}.$$

Обозначения те же, что в формуле (IV.67). Значение  $S$  отсчитывается от среднего напора водоотливного ряда. Для скважины в центре второго ряда, находящейся в самых неблагоприятных условиях, значение гидравлического сопротивления определяется формулой, полученной из (IV.70) путем подстановки соответствующих координат:  $\bar{x}=0$ ;  $\bar{y}=c+1+\bar{r}_0$

$$R = \ln \frac{\bar{r}_0^2}{4c^2} + 2 \sum_{i=1}^n \ln \frac{i^2}{i^2 + c^2} + 2 \sum_{i=1}^n \ln \frac{(2i-1)^2 + 4}{(2i-1)^2 + (2+2c)^2}, \quad (\text{IV.71})$$

Здесь  $n=(N-1)/2$ , где  $N$  — число скважин в ряду.

Подставив числовые значения, получим:

$$R = 82; \quad S = \frac{10 \cdot 24}{4 \cdot 3,14 \cdot 10} \cdot 82 = 155 \text{ м.}$$

Дополнительное повышение уровня вследствие разности плотностей составит

$$\Delta H_1 = 0,1 \cdot 239 + 9 \cdot 0,9 = 32 \text{ м.}$$

Суммарный напор над устьем

$$H_y = \Delta H_1 + S = 155 + 32 = 187 \text{ м.}$$

Расчет показывает, что условие предельного давления на устье не соблюдается.

При давлении на устье, равном 0,16 МПа,  $S=160-32=128$  м; приемистость скважин  $Q=8,3$  м<sup>3</sup>/ч. Для скважин первого серодобычного ряда  $R=73$ , соответственно

$$Q = \frac{4\pi kmS}{R} = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 10 \cdot 128}{73 \cdot 24} = 9,2 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Таким образом, оказывается, что работа двумя рядами при заданных условиях не обеспечивает минимальной приемистости скважин. Поэтому нужно расположить серодобычные скважины в один ряд. Однако при таком расположении длина фронта из 80 скважин составит 3,2 км, что больше размера залежи. Поэтому принимается решение работать двумя рядами с разгрузкой в обе стороны. Симметричное расположение скважин позволяет свести задачу к схеме с одним действующим рядом скважин, описываемым уравнением, аналогичным (III.67). Гидравлическое сопротивление при этом равно 42; репрессия при расходе 10 м<sup>3</sup>/ч — 80 м; напор над устьем 112 м. Таким образом, расположение скважин двумя рядами с двухсторонней разгрузкой является в данных условиях оптимальным, обеспечивая запас надежности около 25%. При большом числе взаимодействующих скважин возникают трудности с вычислением гидравлического сопротивления. В связи с этим проведены вычисления для некоторых типовых условий: расположение скважин в шахматном порядке, одновременное включение одного, двух, трех рядов; водоотлив из скважин на различном удалении — от первого до третьего рядов. Результаты вычислений представлены в виде графиков зависимости гидравлического сопротивления от числа взаимодействующих скважин (рис. 37).

Приблизительную оценку приемистости скважин (в м<sup>3</sup>/ч) можно проводить по формуле

$$Q = \beta kmP, \quad (\text{IV.72})$$

где  $km$  — водопроводимость, м<sup>2</sup>/сут;  $P$  — давление на устье 0,1 МПа  $\beta$  — коэффициент, учитывающий взаимодействие скважин. Значения  $\beta$  приведены в табл. 9.

Таблица 9

Разгрузка	Число рядов серодобычных скважин		
	Один	Два	
		первый ряд	второй ряд
Из одного ряда	0,24	0,15	0,12
Через один ряд	0,16	0,09	0,08
Через два ряда	0,13	0,07	0,06
Через три ряда	0,10	0,055	0,052

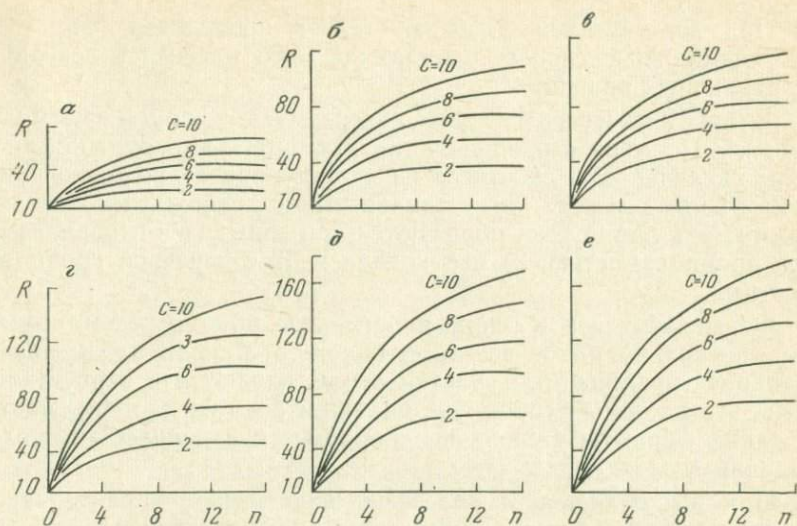


Рис. 37. Графики для расчета гидравлического сопротивления в зависимости от числа скважин в ряду  $n$  и расположения скважин: а — в один ряд; б, в — в два ряда (б — первый ряд, в — второй ряд); г, д, е — в три ряда (г — первый ряд, д — второй ряд, е — третий ряд)

Например, требуется оценить приемистость скважин при расположении их в два ряда и разгрузке через два ряда. Водопроницаемость составляет  $10 \text{ м}^2/\text{сут}$ , давление на устье  $1,4 \text{ МПа}$ . По таблице  $\beta=0,07$

$$Q = 0,07 \cdot 10 \cdot 14 = 9,8 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

При двухсторонней разгрузке дебиты удваиваются.

При гидродинамических расчетах не учитывается изменение проницаемости в процессе подземной выплавки. Анализ работы скважин показал, что основным условием является обеспечение нужной приемистости в начале работы, когда процесс выплавки еще не оказывает значительного влияния на проницаемость пласта. Кроме того, в процессе выплавки наряду с повышением проницаемости в зоне плавления происходит компенсирующее снижение на границах зон, где расплавленная сера частично перекрывает сечение водоносного горизонта. Поэтому приведенная методика, несмотря на ряд допущений, дает вполне приемлемые по точности на стадии проектирования результаты.

### § 5. Изменения гидрогеологических параметров рудовмещающего водоносного горизонта в процессе эксплуатации

Исследования по изменению фильтрационных свойств проводились в незначительном объеме [10, 67].

Под воздействием рабочих агентов происходит изменение фильтрационных свойств обрабатываемого массива в результате различных явлений.

Выщелачивание растворимых компонентов руды. По мере выщелачивания проницаемость отработанной зоны увеличивается, достигая некоторого предельного значения, и на участке между нагнетательными и дренажными скважинами вдоль линий тока образуются три зоны: 1) с первоначальной проницаемостью; 2) переходная и 3) с конечной проницаемостью.

Форма этих зон в плане и в разрезе обычно весьма сложная, поскольку пласт всегда в какой-то степени неоднороден. Наиболее проницаемые участки обрабатываются в первую очередь, это влечет за собой еще больший рост их проницаемости, и, таким образом, степень неоднородности в процессе выщелачивания возрастает.

При выщелачивании полезных ископаемых, характеризующихся высоким содержанием в рудах и устойчивой кровле (например, марганцевые руды с содержанием 20—25%), происходит оседание выщелоченной руды и образование в кровле пласта свободной полости. Давление в этой полости практически постоянно и равно давлению у забоя нагнетательной скважины. В результате движение жидкости в участке пласта ниже полости прекращается, что резко уменьшит скорость выщелачивания.

Образование газовой фазы. Частым спутником химических превращений руды под воздействием теплоносителя является выделение газообразных продуктов реакции, вследствие чего относительная проницаемость руд резко снижается. Выделение газа наиболее интенсивно происходит в зоне взаимодействия, к которой с одной стороны примыкает зона неизменных руд, а с другой — выщелоченная зона. Под действием сил поверхностного натяжения газ стремится занять наиболее крупные поры, в то время как жидкая фаза оттесняется в узкие поры. Это может привести к полному прекращению фильтрации. Положение усугубляется тем, что газ поступает в нагнетательную скважину и образует в ней эмульсию с небольшой плотностью; таким образом, напор в нагнетательной скважине снижается. Если рабочий раствор подается путем налива, может начаться фонтанирование нагнетательной скважины в результате эрлифта. В связи с этим прибегают к систематическим остановкам процесса и реверсированию скважин.

Наглядным примером влияния выделяющегося газа на фильтрацию может служить опыт, схема которого приведена на рис. 38. В сосуд помещался песок с содержанием кальцита 5% по массе. При подаче раствора кислоты сверху фильтрация не наблюдалась. Наоборот, при подаче кислоты снизу фильтра-

ция происходила даже при напоре, составляющем 40% от высоты образца.

Появление газовой фазы может играть и положительную роль, так как, снижая проницаемость отработанных участков, обуславливает более интенсивную проработку участков пласта с низкой проницаемостью. Кроме поверхностных сил на условия фильтрации двухфазных систем влияет и разность плотностей фаз. Особенно сильно это сказывается при наклонном залегании. В этом случае гравитационные силы вызывают вытеснение газированной жидкости в направлении восстания. Это нужно учитывать при выборе системы разработки месторождения. Так, при подземном выщелачивании наиболее выгодна обработка пластов по направлению восстания.

Выпадение нерастворимого осадка. Примером реакций, протекающих с выпадением осадка, может служить реакция кальцита с серной кислотой, продуктом которой является гипс. При этом объем твердых частиц увеличивается в полтора раза, т. е. порода с пористостью 10% и содержанием более 10% по объему карбоната при обработке серной кислотой должна стать полностью непроницаемой.

Проверка данного предположения проводилась на модели, состоящей из вертикальной фильтрационной трубки длиной 0,6 м, диаметром 60 мм и устройства для подачи воды и замера расходов. В трубку поместили просеянный песок фракции 0,25—0,5 мм, содержащий 10% по массе карбоната кальция.

Фильтрация осуществлялась снизу вверх при градиенте напора, равном единице. Коэффициент фильтрации образца при

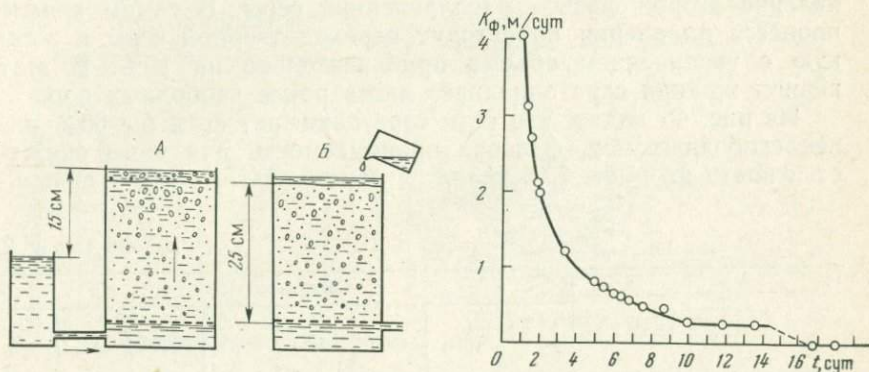


Рис. 38. Схема опыта по фильтрации в условиях газовыделения:

А — раствор кислоты подается снизу, происходит фильтрация и выделение газа; Б — раствор подается сверху, фильтрация прекращается

Рис. 39. Кривая снижения проницаемости в результате образования нерастворимого осадка гипса

пропускании воды изменялся от 3 до 5 м/сут. Затем в фильтрационную трубку снизу подали 5%-ный раствор серной кислоты и провели замеры расхода. В течение 14 дней коэффициент фильтрации образца снизился до 0,2 м/сут, т. е. уменьшился в 20 раз по сравнению с первоначальным, и на выходе появилась свободная серная кислота. После этого вместо кислоты в трубке была подключена вода. Через двое суток фильтрация полностью прекратилась. Динамика сокращения проницаемости показана на рис. 39.

После прекращения опыта проведен химический анализ проб, взятых из верхнего и нижнего слоев фильтрационной трубки.

Из табл. 10 видно, что произошло частичное замещение карбоната гипсом, причем осадок выпадал из раствора преимущественно в верхней части трубки, тогда как растворение происходило внизу.

Образование двух компонентов жидкой фазы. Примером образования двух компонентов может наглядно служить подземная выплавка серы, при которой в пласте происходит увеличение проницаемости в результате этой выплавки и освобождения заполненных ею пор и трещин. Лабораторными исследованиями установлено, что в зависимости от текстуры руды проницаемость образцов после выплавки составляет от 7 до 20 мкм<sup>2</sup> по сравнению с начальной проницаемостью 0,3—1 мкм<sup>2</sup> [67].

Кроме того, коэффициент фильтрации в зоне плавления увеличивается приблизительно в 5 раз вследствие уменьшения вязкости теплоносителя.

К уменьшению проницаемости приводит, прежде всего, появление второй фазы — расплавленной серы. В самом начале процесса плавления происходит переход твердой серы в жидкую с увеличением объема приблизительно на 10%. В этот период жидкая сера заполняет часть ранее свободных пор.

Из рис. 40 видно, что если сера занимает хотя бы 60% ранее свободных пор, фазовая проницаемость для воды снижается почти до нуля. Это является причиной того, что в началь-

Таблица 10

Слой	Содержание, %							
	Н. о.	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
Верхний	86,05	85,21	3,18	0,44	0,16	0,54	4,43	0,73
Нижний	94,31	93,17	2,18	0,32	0,20	0,61	2,14	0,30
Исходный образец	93,03	92,24	3,42	0,32	0,24	0,52	0,24	1,95

ный период работы серодобычной скважины ее приемистость постепенно уменьшается и часто прекращается совсем. После откачки серы поры освобождаются, но на границе с выплавленной зоной остается слой расплавленной серы, сквозь который теплоноситель не проходит. В дальнейшем фультрация идет только на контакте серного пласта с покрывающими породами и по безрудным проницаемым породам в кровле.

Таким образом, вокруг работающей серодобычной скважины существуют три зоны: 1) с очень высокой проницаемостью; 2) с затрудненной проницаемостью; 3) с начальной проницаемостью (рис. 41).

Размеры и форма зоны серонасыщения зависят от режима плавления и откачки серы и рельефа кровли залежи. Вниз по падению происходит перекрытие пласта, причем расстояние до этого барьера зависит от угла падения кровли, угла фильтрации серы и пустотности руд.

Вверх по падению залежи, в особенности при наличии безрудных фильтрующих пород в кровле, полное перекрытие пласта зоной серонасыщения (при условии своевременной откачки серы) не происходит.

Таким образом, водопроницаемость пласта в ходе подземной выплавки зависит от того, какие факторы являются преобладающими.

Для выяснения реальной картины были построены гидродинамические карты (рис. 42).

Исходными данными для построения карт служили ежедневные замеры расходов серодобычных и водоотливных скважин, а также температур и давлений. По этим данным вычисляли приведенные напоры.

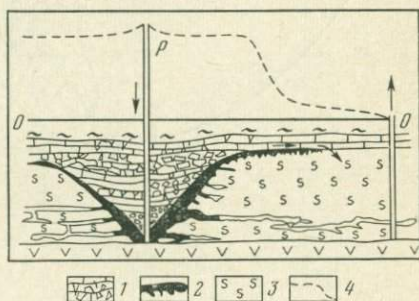
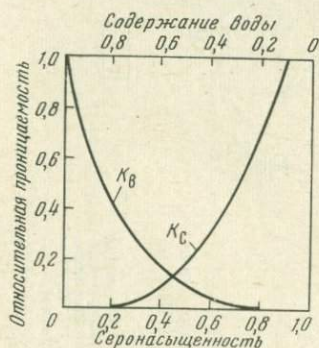


Рис. 40. Кривые фазовой проницаемости для двухфазной фильтрации серы и воды. Проницаемость:

$K_C$  для серы,  $K_B$  — для воды

Рис. 41. Схема зоны плавления.

1 — выплавленная высокопроницаемая зона; 2 — зона серонасыщения; 3 — зона неизменных руд; 4 — линия пьезометрического напора



Для расчета водопроводимости использовались скважины, характер фильтрации вокруг которых можно было бы свести к некоторым схемам, поддающимся расчету. Наиболее распространенным случаем являлась фильтрация от одной серодобычной скважины к нескольким разгрузочным. Этот случай можно свести к расчетной схеме, описывающей фильтрацию от скважины, расположенной в центре правильного многоугольника к скважинам, расположенным в его вершинах. Результаты расчетов водопроводимости приводятся в табл. 11, из которой видно, что рассчитанные водопроводимости в среднем соответствуют тем значениям, которые были определены в ходе детальной разведки. Следовательно, для предварительных расчетов водоприемности серодобычных скважин можно пользоваться этими данными.

Обрушение рудного скелета отработанных зон. При высоких содержаниях полезного ископаемого и благоприятных текстурных особенностях руды после отработки могут обрушиться. Это явление зависит от ряда свойств руды и покрывающих пород. Фильтрационные свойства обрушившегося скелета зависят от гранулометрического и минерального состава руды. Если одновременно происходит плавное опускание покрывающих пород, то этими фильтрационными свойствами определяется последующая фильтрация растворов.

В том случае, когда покрывающие породы не оседают, образуется полость. Наконец, если покрывающие породы обру-

Таблица 11

Номер скважины	Водопроводимость, м <sup>2</sup> /сут, по состоянию на:					
	июль 1971 г.	январь 1972 г.	июль 1972 г.	октябрь 1972 г.	январь 1973 г.	май 1973 г.
24д	—	7,0	—	—	19,0	4,2
40д	—	—	—	—	7,0	1,4
26в	—	—	—	—	56,3	24,0
22д	—	—	—	—	22,6	11,9
11д	—	—	—	—	1,0	2,3
8д	0,4	0,4	2,0	1,2	2,6	3,8
3д	—	21,5	14,0	11,0	1,2	25,0
2-бис	—	—	—	0,4	0,4	23,0
28в	—	—	—	—	5,8	1,1
26д	60,3	—	—	—	2,5	—
23д	—	39,0	3,6	—	2,3	—
4д	—	—	—	14,0	5,0	—
21д	—	—	1,7	2,9	4,1	—
17д	—	—	—	2,6	3,2	—
19д	—	—	2,2	—	3,5	—
10д	0,4	0,8	1,1	—	—	—
12д	—	43,7	1,9	—	—	—
35д	39,2	—	86,4	—	—	78,0
33д	29,4	22,0	—	—	—	—

шиваются, образуется зона, заполненная глыбами покрывающих пород. Характерным примером явлений обрушения скелета может служить участок ПВС на Гаурдакском месторождении.

Характер керна скважин, пройденных в зоне плавления, показывает, что высокое содержание серы в рудах обуславливает разрушение рудного скелета в результате выплавки, причем свойства обрушившейся массы зависят от первоначальной текстуры и структуры руды.

Основными типами руд в Гаурдаке являются наложенные известняковые руды, представляющие собой крепкий известняк, трещины и каверны которого заполнены крупнокристаллической серой, и метасоматические серно-кальцитовые руды, в которых наблюдается сложное прорастание кристаллов кальцита, серы и гипса (рис. 43).

Известняковые руды после выплавки не разрушаются или разрушаются с образованием крупных обломков; в то время как серно-кальцитовые превращаются в песок с частицами размером менее 1 мм.

Наиболее благоприятным моментом для обрушения является откачка серы. До тех пор, пока участок руды заполнен жидкой серой, на частицы действует взвешивающая сила тяжелой жидкости (серы) и нагрузка в основании слоя определяется формулой

$$P = m(\gamma_{п} - \gamma_{с}) \approx 0,8m, \quad (IV.73)$$

где  $m$  — мощность слоя;  $\gamma_{п}$ ,  $\gamma_{с}$  — плотность породы и серы.

После вытеснения серы водой нагрузка возрастает до 1,7 т, т. е. в 2 раза. Давление покрывающей толщи в данном случае

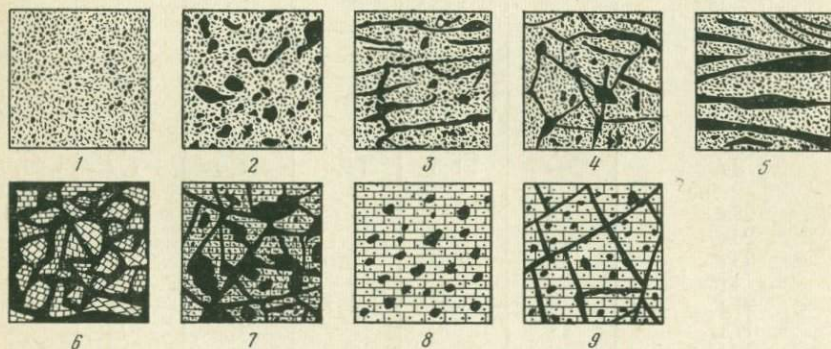


Рис. 43. Основные типы текстур серных руд Гаурдакского месторождения (по Г. Д. Филенко).

Серно-кальцитовые: 1 — рассеянная; 2 — гнездово-вкрапленная; 3 — гнездово-полосчатая; 4 — гнездово-прожилковая; 5 — вкрапленно-полосчатая. Известняковые: 6 — брекчиадная; 7 — гнездово-прожилковая; 8 — гнездовая; 9 — гнездово-прожилковая

не учитывается, так как они представлены высокоустойчивыми ангидритами.

В результате обрушения призабойная зона и перфорация оказываются заполненными обломками скелета и дальнейший приток серы к скважине будет определяться проницаемостью обрушившейся массы и ее мощностью. С явлением обрушения, видимо, связано образование «пробок» в скважинах — наиболее распространенная причина выхода последних из строя.

### § 6. Влияние разности плотностей жидкостей на условия их фильтрации

Различие плотностей жидкостей приводит к тому, что более легкая из них всплывает в верхнюю часть пласта, в результате чего фронт вытеснения в разрезе приобретает сложный характер. Вопросам исследования фильтрации жидкостей с переменной плотностью посвящено много работ [23, 68, 82, 104]. Наиболее распространенными примерами могут служить фильтрация пластовых вод и растворителя при выщелачивании, движение холодной воды и теплоносителя, теплоносителя и жидкой серы при подземной выплавке.

Движение жидкостей с переменной плотностью обусловлено гравитационными и гидравлическими силами, причем первые направлены по вертикали, а вторые по линии максимального градиента напора. Соотношение этих сил определяет направление движения жидкостей.

Влияние разности плотностей может быть проиллюстрировано на примере подземной выплавки серы. Представим себе участок серного пласта, по которому фильтруется теплоноситель. Капли расплавленной серы под действием силы тяжести стекают по стенкам пор вниз. Уже через короткое время в нижней части пласта поры полностью заполняются жидкой серой, в то время как в верхней части появляются дополнительные поры на месте гнезд и вкраплений серы. Известно, что чем выше содержание жидкой серы в порах, тем ниже проницаемость руд для теплоносителя. Из-за этого фильтрация теплоносителя в нижней части пласта постепенно уменьшается, а в верхней — интенсифицируется, и границы зоны плавления приобретают воронкообразную форму со стенками, наклоненными в сторону добычной скважины. Контрольным бурением на частично отработанных участках месторождений установлено наличие зон полной выплавки, насыщения и неизменных руд (рис. 44), и тем самым подтверждено представление о закономерностях развития зоны плавления.

На частицы серы, находящиеся на наклонной поверхности зоны плавления, действуют две силы (рис. 45): тяжести и гидродинамического давления. Первая пропорциональна синусу угла наклона поверхности и разности плотностей серы и воды,

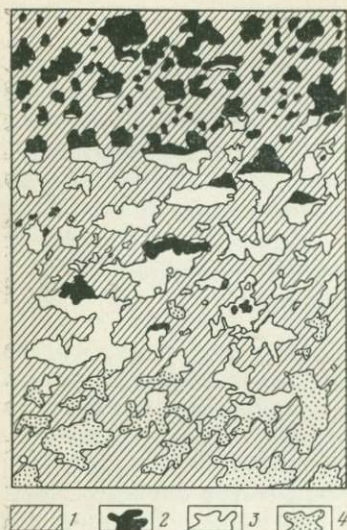


Рис. 44. Контакт между зоной плавления и неизменными рудами (зарисовка керна).

1 — известняк; 2 — пустоты; 3 — переплавленная сера; 4 — неизменная сера

вторая — градиенту напора теплоносителя. Условие равновесия можно записать в виде

$$\text{grad } H = \Delta\rho \sin \alpha, \quad (\text{IV.74})$$

где  $H$  — напор теплоносителя;  $\Delta\rho$  — разность относительных плотностей серы и воды;  $\alpha$  — угол наклона поверхности зоны плавления. Если  $\text{grad } H > \Delta\rho \sin \alpha$ , сера будет фильтроваться вместе с теплоносителем от скважины в глубь пласта, и наоборот. Таким образом, высокие градиенты давления могут привести к тому, что расплавленная сера перекроет каналы фильтрации теплоносителя и скважина перестанет его принимать. Такое явление неоднократно наблюдалось на участке ПВС Язовского месторождения.

В конце 1972 г. — начале 1973 г. из-за неподготовленности водоотливных скважин приемистость группы серодобычных скважин оказалась меньше суммарной производительности котельной. Основываясь на представлении о прямой зависимости расхода от давления, последнее на устье скважин подняли от предусмотренных регламентом 1,5 до 2 МПа и более.

Вопреки ожиданиям, приемистость скважин не только не возросла, но стала заметно затухать. Положение пришлось исправлять путем выпуска теплоносителя в атмосферу через ряд серодобычных скважин, после чего приемистость постепенно восстановилась до первоначальной. По той же причине потер-

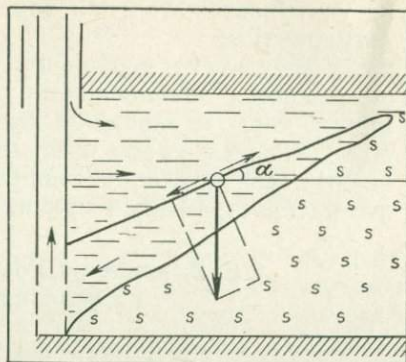


Рис. 45. Схема сил, действующих на частицы расплавленной серы

пела неудачу попытка увеличить приемистость путем откачки воды эрлифтом из расположенных рядом с добычными скважин. В начале откачки вода из скважины поступала с дебитом около 3 м<sup>3</sup>/ч, но уже на вторые сутки дебит стал уменьшаться, а затем приток воды полностью прекратился.

При вскрытии зон плавления жидкая сера фонтанирует вместе с теплоносителем, т. е. движется в пласте не по направлению уклона, а по направлению максимального градиента давления. В связи с этим представляется весьма интересным оценка градиентов напора в серном пласте при его разработке методом ПВС. Из уравнения равновесия видно, что при  $\text{grad } H = 0,9$  вытеснение серы за границу зоны плавления будет наблюдаться при самых крутых уклонах поверхности.

Рассмотрим случай радиального движения теплоносителя от скважины в однородной среде. Такие условия возникают в период прогрева скважины, когда в пласте еще не произошло заметных изменений проницаемости. Из формулы Дюпюи

$$\text{grad } H = \frac{dS}{dr} = \frac{Q}{2\pi kmr}, \quad (\text{IV.75})$$

где  $S$  — повышение уровня;  $Q$  — приемистость скважины;  $km$  — водопроницаемость;  $r$  — расстояние от оси скважины до точки, в которой замеряется градиент.

Для  $Q = 15$  м<sup>3</sup>/ч и  $km = 10$  м<sup>2</sup>/сут получим следующие градиенты при различных  $r$ :

$r, \text{ м}$	1	2	4	6	8	10
$\text{grad } H$	5,7	2,4	1,2	0,9	0,6	0,57

С уменьшением водопроницаемости градиенты возрастают.

Таким образом, в период первоначального прогрева скважин могут создаться условия для оттеснения расплавленной серы от скважины в глубь пласта. С этим связано нередко наблюдаемое явление затухания приемистости скважины в период первоначального прогрева, а также прорывы теплоносителя при большой подаче воды по водной колонне в процессе откачки серы.

Теперь оценим градиенты при размерах зоны плавления диаметром до нескольких метров. Допустим, что зона плавления имеет цилиндрическую форму с водопроницаемостью  $(km)_1$ ; в остальной области водопроницаемость равна  $(km)_2$ . Изменение напора на границе зоны плавления может быть оценено по формуле

$$S_x = \frac{\beta S_0 \lg R/r_x}{\lg r_x/r_0 + \beta \lg R/r_0}; \quad \beta = \frac{(km)_1}{(km)_2}, \quad (\text{IV.76})$$

где  $r_0, R_x, R$  — радиусы скважины, зоны плавления и влияния соответственно;  $S_0$  — изменение напора в самой скважине.

Подставляя значение  $S_x$  в формулу Дюпюи и дифференцируя его, находим, что градиенты фильтрации в зоне плавления и в окружающей зоне равны соответственно

$$I_1 = \frac{Q}{2\pi (km)_1 r}; \quad I_2 = \frac{Q}{2\pi (km)_2 r}. \quad (IV.77)$$

Иными словами, градиент напора в зоне плавления снижается во столько раз, во сколько повышается проводимость этой зоны. По данным лабораторных определений проницаемость выплавленных руд приблизительно на два порядка выше. Таким образом, градиенты давления в зоне плавления малы и принимают критические значения при тех же, что и в первом примере, условиях, только на внешней границе зоны плавления при ее размерах до 6 м. С уменьшением естественной водопроницаемости размеры зоны возрастают. После этого (для приведенного примера) явление вытеснения серы при нормальном давлении на устье не происходит и приемистость скважины не снижается даже при больших перерывах откачки серы.

В приведенных оценках принималось условие радиального движения теплоносителя, характерное для начального периода работы скважины. Со временем в связи с водоотливом в сторону параллельных добычных рядов скважин происходит постепенный переход от радиального движения к линейному. Кроме того, форма зоны плавления превращается сначала из цилиндрической в коническую, а затем в призматическую, так как зоны соседних скважин соединяются между собой. В связи с этим представляет интерес оценка градиентов для линейного случая фильтрации при допущениях, что зона плавления с проницаемостью  $k_1$  имеет призматическую форму.

Значения градиентов в зоне плавления и вне ее определяются выражениями

$$I_1 = \frac{\Delta H}{\left[ \frac{x_0}{k_2 - k_1} (\ln k_2 - \ln k_1) + \frac{L - x_0}{k_2} \right] \left( k_1 + x \frac{k_2 - k_1}{x_0} \right)}, \quad (IV.78)$$

$$I_2 = \frac{\Delta H}{\frac{x_0 k_2}{k_2 - k_1} (\ln k_2 - \ln k_1) + L - x_0}, \quad (IV.79)$$

где  $\Delta H$  — перепад напоров между добычным и водоотливным рядами;  $L$  — расстояние между ними;  $x_0$  — расстояние до края зоны плавления.

Из анализа этих формул видно, что градиент напора достигает своего максимального значения на границе зоны плавления и далее остается постоянным.

Оценим его значение при условии, что  $k_2/k_1 = 100$ , тогда окажется, что

$$I \approx \frac{\Delta H}{L - x_0}. \quad (\text{IV.80})$$

Отсюда видно, что если  $\Delta H = 100$ , то при разгрузке из ближних (I и II) рядов создаются градиенты, превышающие критические. Это широко подтверждается практикой работы Яворовского рудника ПВС, где при вскрытии пласта скважинами вблизи зоны плавления наблюдался вынос жидкой серы вместе с водой фонтанирующих скважин. Следует заметить, что по мере приближения к водоотливным скважинам линейное движение переходит в радиальное и градиент снова возрастает обратно пропорционально расстоянию от скважины.

Проведенные оценки позволяют сделать ряд важных практических выводов:

1. Для каждого конкретного геолого-гидрогеологического условия существует предельное давление на устье скважин, при превышении которого наблюдается отеснение серы и кольматация пласта. Поэтому давление следует выбирать не только из условия недопустимости гидроразрыва, но и из условия допустимого градиента.

2. При близком расположении водоотливных скважин вместо желаемого увеличения приемистости может произойти кольматация пласта расплавленной серой. Это же явление будет вызываться применением принудительного водоотлива.

3. При фильтрационных расчетах приемистости скважин необходимо учитывать ограничение, связанное с возможностью превышения критического градиента.

В условиях Гаурдакского месторождения, где естественные пластовые воды сильно минерализованы, большую роль играет разность плотностей теплоносителя (0,9 г/л) и пластовой воды (1,125 г/л). Вследствие разности плотностей теплоноситель всплывает в верхнюю часть пласта и движется в направлении восстания.

В зависимости от соотношения гидродинамических и гравитационных сил могут наблюдаться следующие три случая распространения теплоносителя в пласте (рис. 46).

Если преобладает влияние гидродинамического поля, то происходит вытеснение пластовых вод по всей мощности залежи. Так как по мере удаления от скважины гидравлический уклон уменьшается, то на некотором расстоянии от скважины горизонтальное перемещение нижней точки границы раздела прекращается и вытеснение идет уже не по всей мощности.

Если преобладает влияние сил гравитации, то теплоноситель полностью всплывает вверх и зона вытеснения принимает форму воронки. Промежуточным является случай, когда основание воронки находится на забое скважины. Соответствующие это-

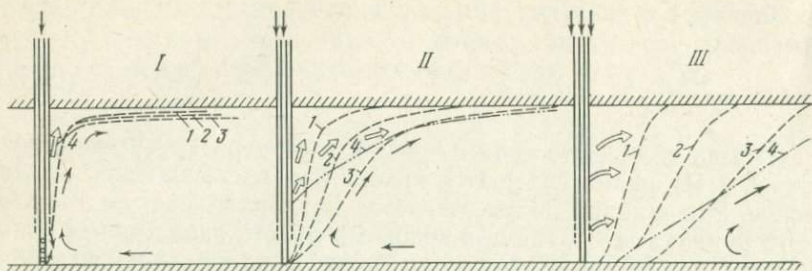


Рис. 46. Распространение теплоносителя в пласте, насыщенном высокоминерализованной водой.

I — расход меньше критического; II — расход равен критическому; III — расход больше критического; 1—4 — последовательные положения контура вытеснения. Стрелками указано направление движения теплоносителя (двойные стрелки) и пластовых вод

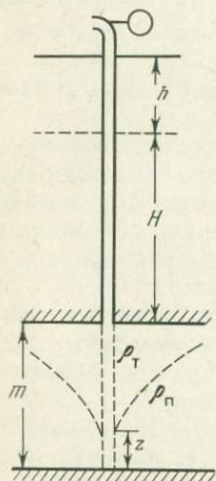


Рис. 47. Схема расчета критического давления

му случаю расход и давление теплоносителя называют критическими.

Очевидно, что во втором случае на стенке скважины существует точка, в которой скорость и градиент напора фильтрации равны нулю. Отсюда следует, что пластовая вода ниже зоны раздела неподвижна и находится под тем же давлением, что и в естественных условиях.

Баланс напоров для точки раздела записывается в следующем виде:

со стороны скважины

$$P_z = P_m - \rho_w (m - z); \quad (IV.81)$$

со стороны пласта

$$P_z = P_m - \rho_n (m - z). \quad (IV.82)$$

Репрессия в точке  $z$  составляет

$$\Delta P_z = \Delta \rho (m - z). \quad (IV.83)$$

При  $z=0$ , т. е. для критического случая,

$$\Delta P_z = \Delta \rho m. \quad (IV.84)$$

В приведенных формулах  $P_z$  — напор в точке  $z$  (рис. 47);  $P_m$  — напор у кровли пласта;  $m$  — мощность пласта;  $z$  — расстояние от кровли до точки  $z$ ;  $\rho_\tau$ ,  $\rho_\Pi$  — плотность теплоносителя и пластовой воды соответственно.

Отсюда видно, что повышение напора при нагнетании теплоносителя должно увеличиваться с увеличением мощности пласта и плотности пластовых вод. Например, при характерных для Гаурдака условиях ( $m=40$  м;  $\Delta\rho=0,2$ )  $\Delta P_{кр}=8$  м. Для определения критического расхода теплоносителя примем движение послойным и, пренебрегая разностью вязкостей нагнетаемой и пластовой воды, найдем расход на элементарном отрезке  $\Delta z$  по формуле Дюпюи:

$$\Delta Q = \frac{2\pi k \Delta z \Delta P \gamma}{\mu \ln R/r}, \quad (IV.85)$$

где  $k$  — проницаемость;  $\gamma$  — плотность;  $\mu$  — вязкость,  $R$  — радиус влияния;  $r$  — радиус скважины. Подставляя вместо  $\Delta P$  значение критической забойной репрессии, переходя к бесконечно малым и интегрируя полученное выражение в пределах от  $z=0$  до  $z=m$ , получаем:

$$Q_{кр} = \frac{2\pi k \gamma \Delta P m^2}{\mu \ln R/r}. \quad (IV.86)$$

Например, при  $k=20$  мкм<sup>2</sup>;  $m=40$  м;  $\gamma=1,1$ ;  $\mu=1$  МПа·с;  $R=1000$  м;  $r=0,05$  м;  $\Delta\rho=0,2$ ;  $Q_{кр}=85$  м<sup>3</sup>/ч.

Для сравнения приведем расчет критического расхода в условиях Язовского месторождения, где  $k=20$  мкм<sup>2</sup>;  $m=18$  м;  $\Delta\rho=0,1$ ; остальные величины те же; в этих условиях  $Q_{кр}=0,6$  м<sup>3</sup>/ч.

Из этого сравнения видно, что разность плотностей имеет большое значение в условиях Гаурдака и не играет роли в условиях Язовского месторождения. Приведенное решение грубо приблизительно и может применяться лишь для начального момента работы скважины, когда весь пласт заполнен только пластовой водой.

При небольших скоростях движения можно пренебречь членом уравнения Фурье, зависящим от времени, тогда задачу можно решить на электрической модели методом смены стационарных состояний. Такое решение приводится в работе [99] при следующих условиях: мощность водоносного горизонта 40 м; проницаемость 10 мкм<sup>2</sup>; вязкость теплоносителя 0,2 МПа·с; воды 1 МПа·с; плотности теплоносителя и воды 0,92 и 1,2 г/см<sup>3</sup> соответственно; пористость пласта 2%; расход воды 100 м<sup>3</sup>/ч. Профиль вытеснения показан на рис. 48. Характерно,

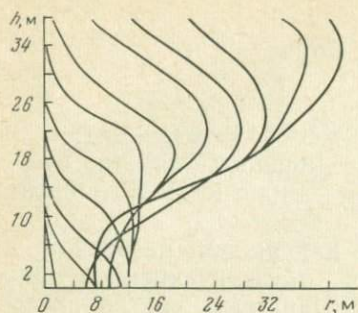


Рис. 48. Профили вытеснения пластовых вод теплоносителем в различные моменты времени. Точка ввода теплоносителя — начало координат

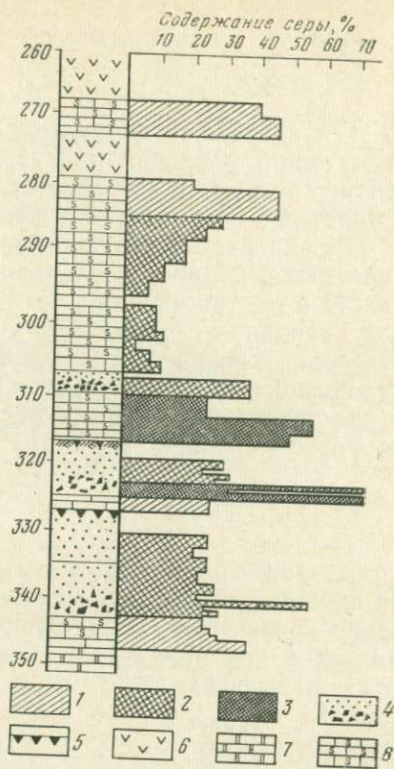


Рис. 49. Геологическая колонка скв. 15д.

1 — неизменные руды; 2 — зоны частичной выплавки; 3 — зоны вторичного обогащения; 4 — зоны обрушения; 5 — провалы; 6 — ангидрит; 7 — известняк; 8 — серная руда

что теплоноситель занимает все более высокое положение, причем в нижней части пласта вытеснение в некоторый момент прекращается и начинается движение границы раздела в обратном направлении. Физическая сущность этого явления заключается в уменьшении гидравлического сопротивления верхней части пласта из-за уменьшения вязкости.

Данное решение дает наибольшее приближение, однако и оно далеко от реальных условий, поскольку не учтены морфология, неоднородность пласта и влияние процесса выплавки. Тем не менее полученные результаты очень важны для понимания процесса.

Изучение керна многочисленных скважин, вскрывших зону плавления, позволило установить, что ее развитие имеет чрезвычайно сложный характер. В качестве примера может служить скв. 15д, пробуренная после отработки первых семи серодобычных скважин (рис. 49).

В интервале 267,1—272,0 м вскрыта богатая серная руда, лежащая на слое ангидритов мощностью 5,7 м. Ниже, в интервале 278,5—306,5 м залегают известняковые серные руды с различным содержанием. Под ними вскрыт провал и затем трех-

метровый слой известняково-гипсового песка с включением мелких обломков и шариков серы. С глубины 309—316 м поднят kern массивной известняковой руды с высоким содержанием серы, причем серой заполнены все карстовые каверны и трещины. Под этим слоем снова наблюдался провал и затем 5-метровый слой сплошной серы с включением обломков карбонатов и гипса. В интервале 324,3—326,3 м также вскрыт прослой известняковой руды, под которым наблюдался провал и затем снова песок с высоким содержанием серы. На глубине 332,2—346,5 м залегает практически неизменная серная руда. Аналогичная картина получена по скважинам 13д, 16д, 14д, 22д и др. Имеющиеся данные позволяют сделать вывод о чрезвычайно сложном характере фильтрации расплавленной серы в недрах. В зоне движения теплоносителя она в виде струек и капель движется по трещинам вниз. Вследствие неоднородности начальной проницаемости и серосодержания пласта, скорость фильтрации неравномерна. В результате на отдельных горизонтах поровое пространство полностью насыщается серой. Обрушение скелета создает полости, по которым сера может двигаться сплошным потоком в направлении уклона сероупорного ложа. При наличии карстовых полостей ниже забоя серодобычной скважины жидкая сера течет в эти полости до тех пор, пока передний край потока не застынет и не создаст преграду для дальнейшей утечки серы.

Таким образом, основные особенности фильтрации серы в условиях Гаурдака заключаются в том, что а) неравномерная скорость фильтрации по вертикали приводит к разобщению зоны плавления на ряд горизонтов, сероупорами для которых служат бедные руды с относительно низкой начальной проницаемостью; б) при наличии крупных карстовых полостей сера может уходить за пределы зоны плавления, в направлении падения пласта. Указанные особенности могут быть проиллюстрированы примерами эксплуатации скважин в различных условиях.

Наиболее закарстован западный фланг участка ПВС-45. По-видимому, именно с этим связана низкая продуктивность скважин, расположенных в этом районе. Наглядное представление о процессе, приводящем к потере серы, дает рис. 50.

Очевидно, что если выплавленная сера аккумулируется в карстовых полостях, то ее можно частично выплавить скважинами, расположенными вниз по падению от ранее работавших. На это указывают высокие показатели добычи серы по скважинам, расположенным вниз по падению от ранее отработанных. В скв. 41д в основании рудного тела вскрыт прослой переплавленной серы мощностью 3,5 м. Когда одновременно работают две скважины, расположенные по линии падения, сера стекает к нижней скважине. Примером могут служить скв. 40 (3000 т) и скв. 46 (50 т), показанные на рис. 51. Переток серы к нижним скважинам в данном случае очевиден.

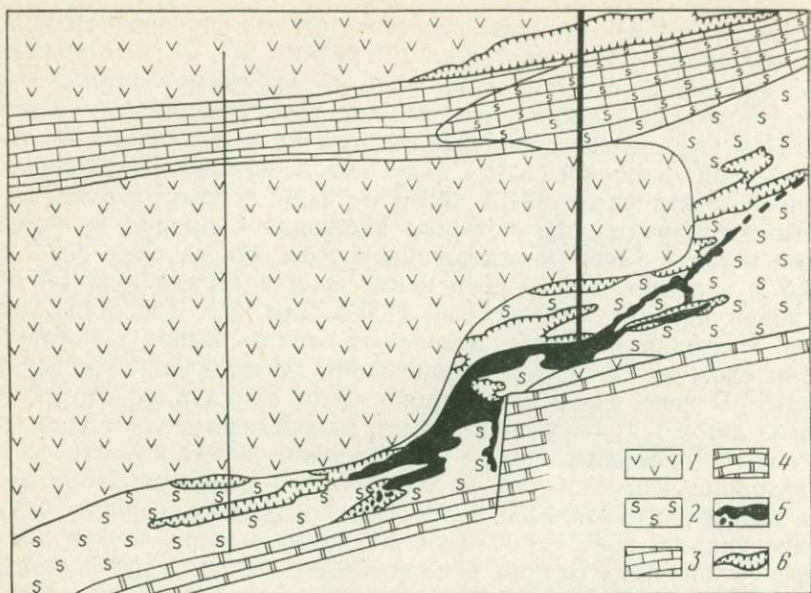


Рис. 50. Схема потерь серы в карстовые полости при эксплуатации скв. 35.  
 1 — гипс; 2 — серная руда; 3 — известняк гаурдакской свиты; 4 — известняк гиссарской свиты; 5 — расплавленная сера; 6 — карстовые полости

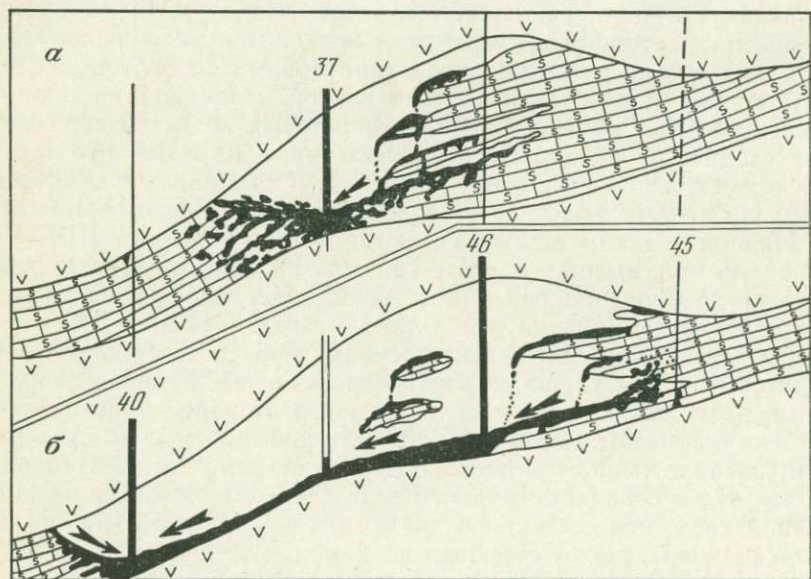


Рис. 51. Схема притока серы к нижней скважине при одновременной работе двух скважин. Условные обозначения см. на рис. 50:  
 а — разрез после отработки скв. 37; б — после отработки скв. 40, 46

Результаты эксплуатации скважин, расположенных вверх по падению от ранее работавших, как правило, неудовлетворительны, так как при этом наблюдаются потери серы в выплавленные зоны.

Опыт показывает, что для достижения высокого извлечения необходимо соблюдать последовательность отработки по направлению падения пласта. Однако при таком способе теплоноситель используется эффективно лишь до тех пор, пока зона плавления работающей скважины не соединится с ранее образованной зоной плавления. В дальнейшем теплоноситель пойдет по уже проплавленным каналам и будет плавить серу лишь на большом удалении.

Отсюда напрашивается вывод о необходимости закладки зон плавления. Проведенные в этом направлении работы показали их большую эффективность [84].

ОСОБЕННОСТИ РАЗВЕДКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ,  
НАМЕЧЕННЫХ К ОТРАБОТКЕ  
ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ§ 1. Задачи разведки. Оценка месторождений  
на стадии поисков

Целью проведения геологоразведочных работ является комплексная оценка месторождений как сырьевой базы для народного хозяйства. При традиционных способах разработки в задачи разведочных работ входит, с одной стороны, общая геологическая характеристика месторождения (запасы, форма рудных тел, тектонические нарушения и т. п.) и, с другой, получение данных для решения вопросов технологии подготовки (осушение, вскрытие), эксплуатации (система разработки) и передела [45]. Аналогичны задачи исследований и при разведке месторождений под геотехнологические методы, однако содержание исследований меняется в соответствии с изменениями технологии эксплуатации.

При проведении поисковых работ необходимо учитывать не только современное состояние техники и технологии эксплуатации месторождений, но и перспективы их развития [62]. В частности, развитие геотехнологических методов, для которых глубина залегания месторождений не имеет решающего значения, требует увеличения глубинности поисковых работ. В результате проведения последних выясняется, заслуживает ли выявленное месторождение предварительной разведки, для чего должны быть оценены решающие факторы, определяющие возможность отработки месторождения тем или иным способом (табл. 12).

Для определения возможности применения того или иного метода добычи решаются следующие вопросы: 1. Какое свойство полезного ископаемого или руды можно использовать для перевода их в подвижное состояние. 2. Если такими свойствами полезное ископаемое (руда) не обладает, то нет ли способа искусственно получить эти свойства. 3. Позволяют ли естественные свойства рудной залежи обеспечить доставку к месту реакции рабочего агента и отвод продуктов реакции. 4. Если нет, то имеются ли способы и технические средства для искусственного изменения проницаемости и пористости пород. 5. Как взаимодействуют порообразующие минералы и вмещающие породы с рабочим агентом и какова доля затрат агента на сопутствующие реакции. 6. Возможно ли обеспечить фильтрацию агента только по рудной залежи и каковы будут его потери в окружающие породы. 7. Можно ли искусственно создать гидро-

Геотехнологические свойства полезных ископаемых	Свойства залежи полезного ископаемого				
	Тело залежи является полезным ископаемым	Тело залежи, содержащее рассеянные включения полезного ископаемого			
		проницаемое		слабопроницаемое	
		пористое и рыхлое	трещиноватое и кавернозное	связное	скальное
Способность гореть и возгораться (переход в газообразное состояние)	Газификация (уголь)	Газификация (торф, лигнит)	Газификация (сера)	Газификация (сланцы)	Возгонка (реальгар, киноварь)
Способность к плавлению	Выплавка (бишофит, карналлит)	Выплавка в электрических полях (битумы, тяжелые нефти)	Выплавка теплоносителем (сера, озокерит, битумы)	—	Выплавка токами высокой частоты (сера)
Способность к образованию жидких систем	Растворение (каменные и калийные соли, бишофит и др.); гидрогенизация (уголь)	Выщелачивание (уран, ванадий, озокерит)	Выщелачивание (полиметаллы)	Перегонка (сланцы)	Выщелачивание с предварительным дроблением (медь, никель, мышьяк и др.)
Способность к образованию подвижных взвесей	Скважинная гидродобыча (уголь, лигнит, торф, песок)	Скважинная гидродобыча (фосфориты, марганец и россыпные металлы)	—	Гидродобыча с размывом (ураноносные, медистые, битуминозные песчаники)	Растворение связующего (апатит-нефелиновые руды)

изоляция залежи, если характер вмещающих пород обуславливает большие потери рабочего агента.

В качестве примера приведены ответы на перечисленные вопросы для оценки возможности подземной выплавки серы на Гаурдакском месторождении.

1. Свойство серы плавиться при температуре  $120^{\circ}\text{C}$  позволяет расплавить ее в недрах. Высокая плотность расплавленной серы обеспечивает ее накопление в нижней части пласта.
2. Улучшать свойства не требуется.
3. Руды трещиноваты и кавернозны, что позволяет обеспечить подачу в пласт теплоносителя. Однако неравномерность закарстованности затрудняет управление теплоносителем. Кроме того, на малых глубинах невозможно поднять температуру выше  $120^{\circ}\text{C}$ , так как теплоноситель будет вскипать.
4. Для улучшения условий выплавки целесообразно обеспечить предварительную закладку карстовых полостей слабопроницаемым материалом.
5. Вмещающие породы практически не реагируют с теплоносителем и затраты его на прогрев рудного скелета невелики.
6. Проницаемость залегающих в кровле пласта ангидритов равна нулю и потери тепла в окружающие породы невелики. Однако выход пласта на поверхность обуславливает большие потери теплоносителя в направлении разгрузки.
7. Гидроизоляцию залежи можно улучшить путем создания специальной водоупорной перемычки или закладки выработанных пространств.

**Заключение:** подземная выплавка возможна; эффективность отработки зависит от размеров затрат на снижение проницаемости и гидроизоляцию залежи.

Приведем еще один пример: оценка возможности отработки забалансовых участков Никопольского месторождения марганца.

1. Минералы марганца — пиролюзит, манганит и псиломелан слабо растворяются в кислых растворах.
2. Однако при воздействии на них сернистой кислоты они переходят в растворимые в воде сульфаты.
3. Залежь в естественном состоянии имеет пористость 20—30% и проницаемость в десятых долях квадратных микрометров, что позволяет обеспечить фильтрацию растворов.
4. Проницаемость повышается в процессе выщелачивания и специальная подготовка не требуется.
5. Породообразующие материалы инертны по отношению к растворителю.
6. Рудное тело залегает среди проницаемых песчано-глинистых отложений, что обусловит большие потери растворов во вмещающие породы. Проседание пород над выработанными пространствами увеличит потери.
7. Имеющиеся способы снижения проницаемости песчано-глинистых пород не освоены в промышленных масштабах.

**Заключение:** отработка подземным выщелачиванием в принципе возможна, однако целесообразность эксплуатации зависит от величины потерь растворов во вмещающие породы.

Как видно из приведенных примеров, оценка возможности применения геотехнологических методов, как правило, не требует постановки специальных исследований и может быть сделана на основании общих геологических данных. Решение же вопроса об экономической целесообразности требует более детального изучения месторождения, количественного определения решающих и главных факторов.

Таким образом, возможные способы эксплуатации месторождения определяются уже на стадии поисков, а более детальные исследования ведутся целенаправленно.

Для того чтобы правильно выбрать методику и детальность геологоразведочных работ на различных стадиях разведки, необходимо иметь представление о влиянии природных факторов на условия отработки. Безусловно, геотехнологические процессы весьма сложны и трудно назвать то или иное свойство руд, которое в какой-то мере не влияло бы на течение процесса. Однако для каждого конкретного месторождения и каждого определенного метода разработки существует свой перечень решающих, главных и второстепенных факторов.

Часто кроме пригодных и непригодных для отработки на месторождении могут быть выделены условно пригодные запасы, отработка которых вызывает увеличение себестоимости по сравнению с безусловно пригодными участками. Чем выше значимость факторов, тем большее внимание должно быть уделено их изучению при разведке месторождений.

Анализ влияния различных факторов на условия и результаты эксплуатации месторождений позволяет определить требования к изученности месторождений с учетом стадий разведки. При этом детальность изучения зависит как от стадии разведки, так и от значимости различных факторов. Пользуясь понятием категорий изученности, аналогичным категории изученности запасов, требования к детальности изучения можно представить в виде следующей общей схемы (табл. 13).

В обозначения категорий изученности вкладываются следующие понятия: А — детальная количественная оценка; В — приблизительная количественная оценка;  $C_1$  — ориентировочная количественная оценка;  $C_2$  — качественная оценка.

Таким образом, задачи разведочных работ сводятся к следующим.

На стадии *поисковой разведки* — определить принципиальную возможность применения геотехнологических методов, для чего выделить решающие факторы и дать им хотя бы ориентировочную количественную оценку.

На стадии *предварительной разведки* необходимо оценить главные факторы, нужные для составления ТЭО целесообразности освоения месторождения и составления временных кондиций.

Стадия разведки	Факторы		
	решающие	главные	второстепенные
Поисковая	$C_1 + C_2$	$C_2$	
Предварительная	$B + C_1$	$C_1 + C_2$	$C_2$
Детальная	$A + B + C_1$	$B + C_1 + C_2$	$C_1 + C_2$
Промышленная	$A + B$	$A + B + C_1$	$B + C_1$
Эксплуатационная	$A$	$A + B$	$A + B$

Задача *детальной разведки* — достоверное изучение всех факторов, влияющих на условия эксплуатации месторождения с целью проектирования горнодобывающего предприятия.

Из поставленных задач вытекает, что на стадии предварительной разведки требуется изучить месторождение на всей площади более или менее равномерно, а при детальной разведке достаточно изучить ту его часть, на которой проектируются горнокапитальные работы.

## § 2. Общая методика разведки месторождений

При проведении разведки целесообразно различать следующие три направления исследований: 1) изучение месторождений как природного объекта; 2) изучение гидротермодинамических условий месторождения как среды для осуществления геотехнологических процессов; 3) определение характеристик, необходимых для расчета параметров конкретной технологической схемы эксплуатации.

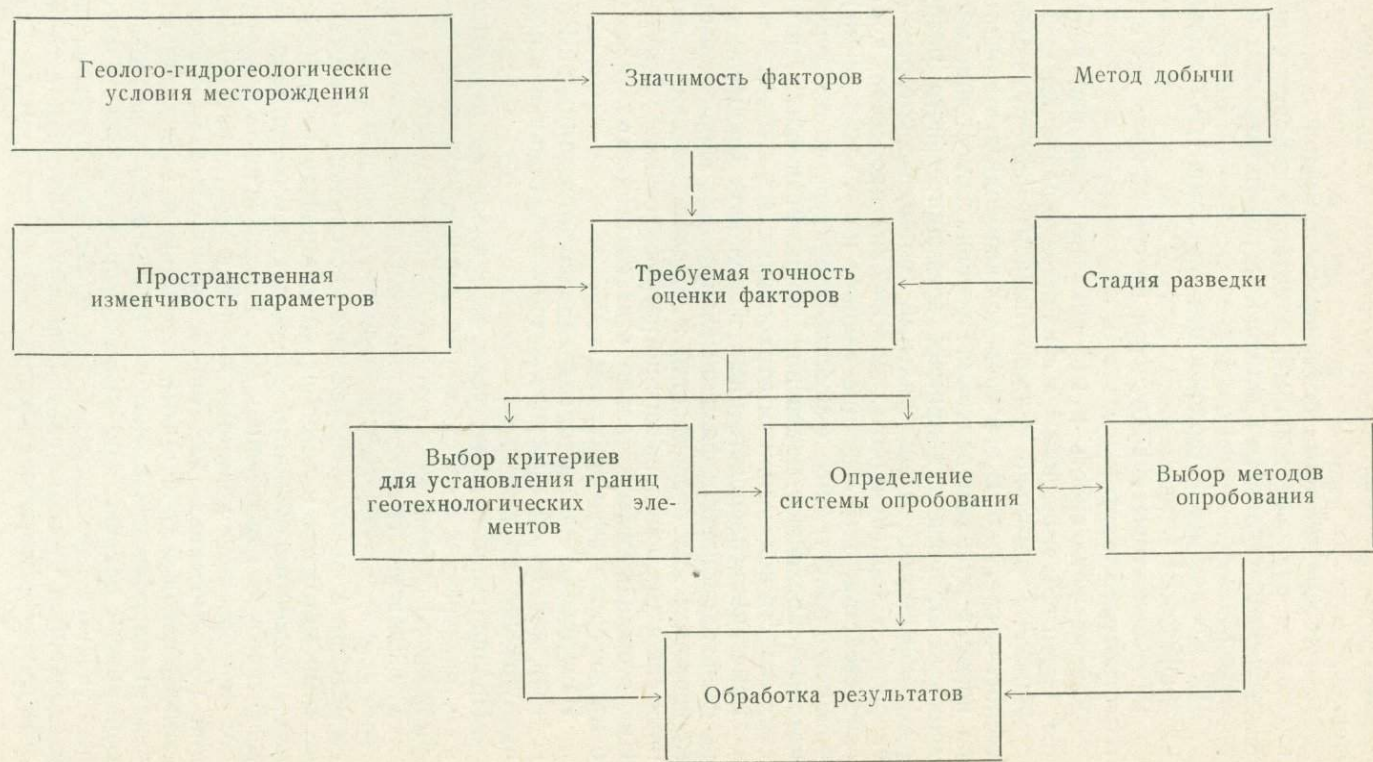
На основе полученных на стадии поисковой разведки знаний о месторождении как природном объекте определяется геотехнологический метод разработки, т. е. виды воздействий на руды или полезные ископаемые для перевода их в подвижное состояние.

Затем необходимо установить перечень главных факторов, от которых зависят условия применения выбранного метода. С учетом степени влияния факторов определяют необходимую точность и надежность их изучения и выбирают критерии для определения границ геологических тел. Общая структурно-логическая схема разведки месторождений для целей геотехнологии представлена в табл. 14.

Целесообразно выделять следующие группы геологических тел:

I. Рудосодержащие геологические тела (РГТ) — область пространства, внутри которой в процессе эксплуатации осуще-

## Структурно-логическая схема разведки месторождений



ствляется фильтрация (течение) рабочих и продуктивных флюидов.

II. Непосредственные водоупоры — геологические тела, граничащие с рудосодержащими, в которых перенос вещества и энергии осуществляется в основном в результате молекулярных процессов.

III. Коллекторы (водоносные горизонты), гидравлически связанные с РГТ.

IV. Коллекторы и водоупоры, не связанные с РГТ (прочие геологические тела).

Задачи, детальность и методика исследований перечисленных групп геологических тел существенно различны.

Наиболее детально должно быть изучено рудовмещающее геологическое тело. В его пределах необходимо изучить свойства пород и руд, определяющие условия подготовки месторождения к отработке (например, предварительного разрушения руд), химический и минеральный состав, от которых зависит скорость и характер геотехнологических процессов, коллекторские свойства, оказывающие влияние на условия движения рабочих и продуктивных флюидов, структуру и текстуру пород, которые определяют изменения водно-физических и технических свойств под влиянием отработки.

Изучение непосредственных водоупоров сводится к оценке их фильтрационных и физико-механических свойств, выяснению морфологических особенностей и условий залегания, определению основных минералого-петрографических характеристик. При этом наиболее детально эти геологические тела должны быть изучены в зоне контакта с РГТ.

Изучение коллекторов, гидравлически связанных с РГТ, проводится для целей прогноза потерь и разбавления рабочих и продуктивных растворов.

Прочие геологические тела специально не изучаются; для их характеристики используются данные, получаемые попутно с изучением первых трех групп геологических тел.

Установление границ геологических тел обозначается общим термином *геометризация*, а изучение состава и свойств горного массива в целях эксплуатации месторождения геотехнологическими методами целесообразно обозначить термином *геотехнологическое опробование*. Это понятие гораздо шире понятия геологическое опробование [2]. В инженерной геологии [53] под опробованием понимают комплекс последовательных операций по измерению или определению состава, состояния и свойств пород с требуемыми точностью и надежностью. В это понятие опробования входит любое определение свойств не только в объеме какой-то пробы, но и в пределах любых определенных участков горной среды. Так, проведение геофизических исследований и опытно-фильтрационных работ будет также входить в понятие опробования.

Таким образом, весь комплекс работ по геологическому изучению месторождений можно подразделить на геометризацию и опробование. В результате опробования внутри геологических тел выделяются *геотехнологические элементы*.

Обычно выделяются такие геотехнологические элементы, как рудные залежи и их участки с различными геотехнологическими свойствами; безрудные участки внутри залежей, в их кровле и подошве. В непосредственных водоупорах целесообразно выделять в отдельный элемент наиболее подверженную влиянию рабочих агентов приконтактную часть, размеры которой можно ориентировочно оценить теоретически, путем решения уравнений диффузии, теплопроводности и других в соответствующих граничных условиях, а также по методу аналогии.

Пространственное размещение точек или участков опробования называется *системой опробования*. Так как при разведке месторождений для геотехнологических целей используются исключительно скважинные методы разведки, то система опробования в плане сводится к выбору рациональной сети скважин, а по вертикали — к определению интервалов опробования скважин. Система опробования выбирается в зависимости от пространственной изменчивости свойств, а также требуемой точности и надежности их определения.

В сложившейся практике геологоразведочных работ при определении густоты разведочной сети исходят прежде всего из требуемой точности подсчета запасов полезных ископаемых. Однако при геотехнологических методах запасы не всегда представляют собой главный фактор. Как известно, они служат основой при определении мощности будущего предприятия и срока его эксплуатации. Ошибки в их подсчете приводят к неоправданным капитальным затратам.

При применении геотехнологических методов капитальные вложения резко снижаются по сравнению с обычными; соответственно снижаются и требования к точности подсчета запасов. Так, в работе [6] показано, что в условиях Предкарпатских месторождений серы для квалификации запасов по категории  $C_1$  достаточна разведочная сеть  $600 \times 600$  м. В то же время другие факторы могут быть значительно более изменчивыми, чем мощность и содержание, и в то же время оказывать очень большое влияние на условия эксплуатации месторождения. Например, на тех же Предкарпатских месторождениях фильтрационные свойства руд имеют чрезвычайно высокую изменчивость и от них зависит возможность применения метода подземной выплавки. Отсюда ясно, что выбор густоты опробования следует производить по наиболее изменчивому из главных факторов. Естественно, что тем самым гарантируется достаточно высокая точность опробования для остальных факторов.

Наиболее полное обобщение современных представлений о выборе систем опробования приводится в работах [17, 45],

где сформулированы следующие принципы размещения точек измерения геологических параметров в пространстве. 1. Принцип равнопредставительности: любые равные по объему части выделенного геологического тела, статистически однородного и выдержанного по исследуемому показателю в соответствии с принятыми критериями должны быть охарактеризованы одинаковым числом измерений. 2. Системы опробования устанавливаются отдельно для каждого выделенного по принятым критериям геологического тела, исходя из его изменчивости по исследуемому показателю и принятого уровня значимости показателей. 3. Ориентировка системы опробования должна соответствовать главным направлениям изменчивости состава и свойств пород или направлениям экстремальных значений градиентов полей показателей. 4. Чем больше анизотропия состава и свойств пород, тем больше различаются параметры системы в характерных направлениях изменчивости.

Нам представляется, что применительно к задачам разведки месторождений перечисленные четыре основных принципа целесообразно дополнить еще двумя: принципом последовательного сгущения разведочной сети, выдвинутым Л. Д. Белым [11] и развитым в работах Н. В. Коломенского [53], Г. К. Бондарики [17] и других, и принципом максимального совмещения систем опробования, выбранных для отдельных показателей.

Выбор систем опробования неразрывно связан с методами опробования. Последние целесообразно различать прежде всего по уровню выявляемой этими методами неоднородности состава и свойств пород.

М. В. Рац [85] предлагает в прикладной геологии различать следующие уровни неоднородности: I. Неоднородность массива пород (наличие различных геологических образований, их нарушенность и т. д.), т. е. геологическое строение массива. II. Неоднородность структуры и состава горных пород в пределах пачки, ритма, слоя (слоистости, трещиноватости, мелких дислокаций и т. д.). III. Неоднородность состава и структуры горной породы (пористости, минерального состава, формы и размера зерен, характера контактов). IV. Неоднородность внутреннего строения кристаллов (наличие дефектов кристаллической решетки, дислокаций, вакансий, обменных ионов и т. д.).

Аналогично выделенным уровням неоднородности для практических целей можно выделить следующие уровни изучения природных факторов, влияющих на геотехнологические процессы.

1. Геологические и гидротермодинамические условия месторождения: геологическое строение, глубина залегания, геостатическое давление, внутривещное давление, начальная температура, положение в водонапорной системе и гидравлическая связь с проницаемыми породами и поверхностью.

2. Состав и свойства руд и вмещающих пород в массиве: литологический состав, прочностные, гидравлические тепловые и электрические свойства; пустотность, трещиноватость.

3. Состав и свойства образцов руд: содержание полезного ископаемого, минеральный и химический состав, текстура, пористость, проницаемость, прочностные, деформационные, тепловые и электрические свойства, состав, свойства и состояние подземных вод.

4. Свойства минералов: химический состав, состояние, поверхностные, термические, электрические, прочностные и деформационные свойства, плотность, форма выделения (размер и форма зерен, окатанность и т. п.), состав и свойства связанных форм воды.

Первому и второму уровню соответствуют полевые методы исследований, третьему и четвертому — лабораторные.

Особую важность для большинства геотехнологических методов имеют гидрогеологические исследования, проводимые в целях: а) оценки притока подземных вод в рабочую зону, а также потери рабочих агентов и продуктов; б) расчета приемистости и дебитов эксплуатационных скважин; в) расчета полей скорости фильтрации в рабочей зоне.

Для решения указанных задач необходимо: 1) определить положение месторождения в водонапорной системе; 2) составить карту водопроницаемости рудовмещающего геологического тела; 3) установить степень его связи с другими водоносными горизонтами и поверхностными водотоками; 4) оценить свойства водоупоров; 5) изучить химический состав и физические свойства подземных вод; 6) дать оценку возможных изменений гидропроницаемости руд и вмещающих пород под влиянием геотехнологических процессов; 7) определить возможные и предельные значения напоров в системах эксплуатационных скважин; 8) изучить распределение проницаемости в плане и в разрезе РГТ; 9) исследовать поле распределения мезо- и макропустотности; 10) изучить прочностные свойства руд и вмещающих пород, их изменения в процессе эксплуатации.

В отличие от обычных методов, где гидрогеологические условия обуславливают лишь применение различных схем осушения месторождений, при геотехнологических методах они непосредственно определяют способ, систему и режим эксплуатации. С этим связан ряд особенностей гидрогеологических исследований. Основными из них являются следующие.

1. При обычных методах изучают в равной степени все водоносные горизонты, участвующие в обводнении горных выработок. При геотехнологических — объектом изучения являются, в первую очередь, *рудовмещающее геологическое тело* (РГТ). Оно может быть проницаемым или водоупорным, а также включать водоупорные и проницаемые породы.

Определяемый параметр	Метод опробования
Осредненная водопроницаемость геологических тел	Опытные откачки
Водопроницаемость в заданном направлении	Откачка-нагнетание
Связь между водоносными горизонтами	Кустовые откачки
Свойства водоупоров	Лабораторные определения начального градиента фильтрации и проницаемости, кустовые откачки
Распределение проницаемости в разрезе	Расходомерия, резистивиметрия, ядерные методы, лабораторные определения по керну
Эффективная пористость	Индикаторные опыты, лабораторные определения
Геометрические характеристики порового пространства	Трещинно-структурный анализ, изучение шлифов под микроскопом, лабораторные определения
Химический состав подземных вод	Отбор и анализ проб
Изменение свойств в процессе эксплуатации	Лабораторное моделирование, метод аналогии, специальные опытные работы

2. При обычных методах разработки месторождений основная область фильтрации находится за контуром горных работ. При геотехнологических — фильтрация происходит в основном в пределах участков, ограниченных системами нагнетательных и дренажных скважин, и лишь в незначительной мере за контуром эксплуатации.

3. При обычных методах отработки для оценки водопритоков и расчета систем осушения требуется определить осредненные гидрогеологические параметры водоносных горизонтов. При геотехнологических — необходимо исследовать распределение проницаемости и пустотности в плане и в разрезе.

4. При обычных методах фильтрационные свойства в процессе эксплуатации изменяются незначительно или остаются постоянными. Геотехнологические процессы, как правило, вызы-

вают резкое изменение гидрогеологических параметров РГТ в ту и другую сторону.

5. При обычных методах обработки происходит фильтрация однородных по свойствам подземных вод, поэтому морфологические особенности водоносных горизонтов не имеют значения. При геотехнологических — в фильтрации участвуют компоненты жидкой фазы, различающиеся по плотности, вязкости, поверхностным свойствам, что определяет большую роль элементов залегания и морфологических особенностей РГТ. Перечисленные особенности обуславливают необходимость нового подхода к методике гидрогеологических исследований.

В соответствии с задачами исследований применяют следующие методы гидрогеологического опробования (табл. 15).

### § 3. Предпроектная оценка месторождений. Подсчет запасов

Технико-экономическое обоснование целесообразности освоения месторождения включает определение экономической эффективности обработки месторождения по следующим критериям: величина приведенных затрат, рентабельность предприятия, удельные и общие капитальные вложения, эффективность капитальных вложений, срок окупаемости, срок освоения месторождения. Методика расчетов экономических показателей широко известна [62]. Определение показателей производится методом аналогии или прямым расчетом. Как правило, используется последний метод, так как промышленный опыт освоения месторождений геотехнологическими методами еще не велик.

К важнейшим объектам основных фондов при использовании геотехнологических методов относятся: эксплуатационные скважины в объеме, обеспечивающем запланированную годовую добычу, установки для приготовления рабочих агентов, насосные и компрессорные станции для подачи рабочих агентов в недра и откачки продуктов на поверхность, установки для переработки продуктивных флюидов, контрольно-распределительные пункты и трубопроводы, объекты общерудничного назначения.

Одной из существенных составляющих капитальных затрат могут оказаться расходы на подготовительные работы.

Эксплуатационные расходы складываются из затрат на материалы, электроэнергию, рабочие агенты, реагенты-интенсификаторы, заработную плату, подготовку, горно-капитальные работы, амортизацию, утилизацию отходов и промстоков, а также из цеховых и общерудничных внепроизводственных расходов. Общая экономико-математическая модель себестоимости строится на основе частных моделей по отдельным звеньям процесса.

По полученным результатам расчетов определяют эффективность разработки месторождения, срок окупаемости, произ-

водительность труда, фондоотдачу и другие экономические показатели.

Специфические особенности геотехнологических методов заключаются в том, что рабочим агентом обрабатывается определенный участок пород независимо от того, как меняются характеристики полезного ископаемого в его пределах. Площадь этого блока удобнее всего условно отнести к площади, приходящейся на одну добычную скважину. Размер блока по вертикали зависит от свойств руд и вмещающих пород. Например, при выщелачивании проницаемых руд границами движения флюидов служат верхний и нижний водоупоры. При выплавке серы нижней границей служит подошва рудного пласта, а верхней — кровля рудосодержащего водоносного горизонта. При скважинной гидродобыче нижняя граница определяется также подошвой рудного тела, а верхняя — положением контакта с породами, не разрушающимися при добыче.

Поэтому наиболее целесообразно в качестве основной единицы при экономических расчетах принимать объем подверженных воздействию агентов пород, приходящихся на одну скважину — единичный добычный блок. Затраты на отработку блока складываются из стоимости скважины, затрачиваемых рабочих агентов, энергетических затрат на закачку и откачку флюидов, затрат на их переработку, а также заработной платы, амортизационных отчислений и накладных расходов. Все эти затраты должны окупаться продукцией, полученной в результате отработки блока.

Стоимость скважины определяется простым расчетом и зависит от ее глубины и конструкции. Затраты рабочих агентов складываются из полезных затрат на перевод полезного ископаемого в подвижное состояние, затрат на реакцию с породообразующими минералами, на реакцию с вмещающими породами, потерь в кровлю и почву, а также коэффициента использования рабочего агента.

Затраты на перевод полезного ископаемого в подвижное состояние зависят от содержания полезного ископаемого и характера основной реакции. Так, при плавлении серы тепло расходуется на нагрев серы до температуры плавления, на переход ее из твердой фазы в жидкую и подогрев до температуры, при которой сера имеет минимальную вязкость.

При горении, выщелачивании и растворении расход реагента определяется по уравнению реакции. При скважинной гидродобыче расходы определяются затратами на получение энергетической воды.

Затраты на реакции с породообразующими минералами и вмещающими породами зависят от характера реакций этих пород с рабочим агентом. Так, при кислотном выщелачивании урана расход кислоты почти всецело определяется содержанием карбонатов и это последнее обстоятельство часто целиком оп-

ределяет экономические показатели. Характеристикой единичного добычного блока с этой точки зрения может служить понятие реагентоемкости (кислото-, тепло-, энергоемкости).

Потери в кровлю и почву РВГ зависят, прежде всего, от степени их непроницаемости и инертности по отношению к рабочим агентам, а также от времени отработки. Коэффициент использования рабочего агента зависит от его концентрации на входе и выходе.

Энергетические затраты на закачку и откачку зависят от заданного расхода, конструкции скважин и времени отработки блока, фильтрационных свойств пласта, а также допустимого давления на устье и понижения уровня в скважинах. Затраты на переработку продуктивных растворов зависят от концентрации в них полезного компонента и технологии переработки. Амортизационные отчисления зависят от величины капитальных затрат на строительство поверхностных сооружений по приготовлению рабочих агентов и переработке получаемого продукта.

Как уже говорилось, все эти затраты должны окупиться получаемой продукцией. Количество этой продукции зависит от запасов полезного ископаемого в единичном блоке и степени их извлечения.

Степень извлечения зависит от полноты извлечения из участков, полностью прореагировавших с рабочим агентом, и определяется произведением коэффициента извлечения на коэффициент охвата. При прочих равных условиях степень извлечения обычно увеличивается при сгущении сети эксплуатационных скважин.

В связи с указанными особенностями технологии и структурой затрат на добычу в кондиции целесообразно включать как один из основных показателей минимальный метропроцент. Удобнее всего пользоваться показателем величины запасов, приходящихся на единицу площади, который называют продуктивностью пласта. Последняя определяется по формуле

$$\Pi = \sum_{i=1}^n m_i c_i \gamma_i, \quad (V.1)$$

где  $m$  — мощность;  $c$  — содержание, %;  $\gamma$  — объемная масса руды;  $n$  — число интервалов.

Минимальная продуктивность пласта определяется по формуле

$$\Pi_{\min} = \frac{S}{E_0 E_n \Pi_0 P}, \quad (V.2)$$

где  $S$  — себестоимость продукции, добытой из единичного бло-

ка;  $E_{II}$  — коэффициент извлечения;  $E_0$  — коэффициент охвата;  $C_0$  — оптовая цена получаемого продукта;  $P$  — площадь блока.

Так как коэффициент охвата зависит от площади блока (густоты добычных скважин), то расчет кондиций целесообразно проводить по нескольким вариантам площади блока, аналогично тому, как при обычных способах добычи ведут подсчеты при различных вариантах бортовых мощностей и содержаний.

В большинстве случаев при геотехнологических методах некоторая часть полезного ископаемого не может быть извлечена из недр. Поэтому есть смысл проводить раздельно подсчет общих и извлекаемых запасов. При этом общие запасы нужны лишь для сопоставления вариантов отработки обычными и геотехнологическими методами.

Отсюда следует вывод, что подсчет этих запасов проводится на стадии предварительной разведки, по результатам которой решается вопрос о целесообразности и способе отработки месторождения. При детальной разведке общие запасы уже не имеют значения, и подсчету подлежат извлекаемые запасы.

Как и при обычных способах эксплуатации месторождений, руды могут быть неравноценными, это вызывает необходимость выделять их различные сорта. Так, например, технология отработки проницаемых и слабопроницаемых серных руд резко различна, соответственно различаются и технико-экономические показатели при их отработке. Это вызывает необходимость оконтуривания руд по сортам.

Определение минимальной продуктивности вместо минимального содержания в расчете на блок позволяет исключить из кондиций такие показатели, как бортовое содержание, допустимое соотношение мощностей руды и безрудных прослоев и т. п.

Глубина возможной отработки месторождений геотехнологическими методами определяется в основном не соображениями экономики, а техническими условиями, поскольку мало сказывается на себестоимости.

Известно, что подземное растворение соли с успехом осуществляют на глубине более 2000 м, и это не является пределом.

Показатель минимальной мощности руд имеет значение в тех случаях, когда в процессе добычи существенную роль играет вертикальное движение рабочих и продукционных флюидов. Так, растворение соли в камере осуществимо при мощности не менее 10—15 м; подземная выплавка горизонтально залегающих серных руд — при мощности более 3 м.

Таким образом, основным показателем кондиций при подсчете запасов месторождений полезных ископаемых, обрабатываемых геотехнологическими методами, является минимальная продуктивность залежи.

#### § 4. Подземная выплавка

Специализированная разведка месторождений серы для целей ПВС проводилась на Язовском, Загайпольском, Немировском, Сырейско-Каменнодольском и Гаурдакском месторождениях, что позволило накопить достаточно большой опыт.

Установление перечня факторов, подлежащих изучению. Характеристика влияния различных природных факторов на условия ПВС приведена в главе III. К числу главных факторов относятся:

на первом уровне мощность рудной залежи и форма рудных тел, глубина залегания, напор подземных вод над водоупорной кровлей; наличие водоносных горизонтов и условия их связи с поверхностью;

на втором уровне литологический состав руд, водопроницаемость рудовмещающего водоносного горизонта, тектоническая нарушенность, степень и формы развития карста;

на третьем уровне содержание серы в руде, текстура и структура руд, прочностные и деформационные свойства покрывающих водоупоров, тепловые свойства руд и вмещающих пород, химический состав подземных вод;

на четвертом уровне химический состав и свойства природной серы.

Выбор критериев для установления границ геологических тел. На месторождениях серы выделяются следующие геологические тела: серные залежи (критерий для выделений — наличие осернения); рудовмещающий водоносный горизонт — трещиноватые и закарстованные осерненные и неосерненные известняки (критерий — проницаемость); надрудные и внутрирудные неосерненные известняки (критерий — литологический состав и проницаемость); прослой гипсов и глин в рудовмещающем водоносном горизонте (критерий — водоупорность); покрывающие водоупоры (критерий — водоупорность); подстилающие породы (критерий — отсутствие осернения).

Пространственная изменчивость. Исследованиями изменчивости мощности и содержания серных руд Предкарпатья установлено, что коэффициент вариаций мощности составляет 41%, а серосодержания — от 14 до 22%. Для Гаурдакского месторождения [101] коэффициент вариации мощности вкрест простирания составляет от 53 до 97%, а по простиранию — 62—91%. Коэффициент вариации серосодержания составляет 45%.

В то же время мощность карстовых полостей, зафиксированная по провалам бурового инструмента, характеризуется коэффициентом вариации до 121%. Анализ изменчивости макропустотности, проведенный на участке ПВС Язовского месторождения, показал, что по этой характеристике коэффициент

вариаии достигает 85%. Остальные факторы (литологический состав руд, текстурно-структурные особенности, свойства покрывающих пород и др.) имеют меньшую значимость и изменчивость. Таким образом, наиболее изменчивыми показателями являются характеристики пустотности руд и связанные с ними проницаемость и водопроницаемость.

Определение системы опробования. Методика выбора системы опробования детально рассмотрена в работах [17, 45, 15]. В основе этой методики лежат статистические методы. При этом задаются определенной точностью и надежностью определения показателя. В практике геологоразведочных работ для определения требований к точности проводят классификацию месторождений по сложности и масштабам [3].

I группа. Наиболее крупные и простые месторождения, требующие обычно и крупных капиталовложений для их освоения. Разработка проектов производится на основе запасов категорий  $A+B+C_1$ , при этом запасов по категории A должно быть не менее 10%, а по категории B не менее 20%.

II группа. Средние по масштабам месторождения, разведка которых до категории A нецелесообразна или невозможна из-за сложности их строения. Проектирование разрешается на запасах категорий  $B+C_1$  при наличии запасов категории B не менее 20%.

III группа. Небольшие месторождения обычно очень сложного строения, на которых даже при густой сети разведочных выработок невозможно разведывать запасы до категорий A и B. Проектирование разрешается на запасах по категории  $C_1$ .

Такое подразделение основывается прежде всего на степени риска при капитальных вложениях, которые являются одной из основных статей, определяющих эффективность освоения. При этом исходят из точности подсчета запасов, хотя в определении самих категорий отмечается необходимость оценки гидрогеологических и инженерно-геологических условий. В работе [3] указывается, что если для определенных месторождений проектирование проводится на запасах по категориям B или  $C_1+C_2$ , то независимо от этого степень изученности гидрогеологических и геологических параметров, если это возможно, должна соответствовать требованиям категории A.

Отсюда видно, что требования к точности определяются прежде всего экономическими последствиями от ошибок, допущенных при определении параметров месторождения.

При подземной выплавке серы наибольшая доля затрат приходится на теплоноситель (36—38%) и горно-подготовительные работы (от 10 до 30%). Как показывает практика, расход теплоносителя зависит прежде всего от гидрогеологических условий. Так, в Гаурдаке значительная часть теплоносителя уходит по карстовым каналам в зону разгрузки. В условиях Язовского месторождения низкая проницаемость руд вынуждает сбрасы-

вать теплоноситель на небольшом расстоянии от зон плавления, в результате чего его температура достигает  $80^{\circ}\text{C}$ , т. е. половина тепла не используется.

Необходимо также отметить, что для условий подземной выплавки серы вряд ли справедливо положение о том, что чем крупнее месторождение, тем детальнее оно должно быть изучено. На крупном месторождении всегда можно увеличить число скважин и довести тем самым мощность рудника до планируемой. В то же время на месторождении небольших масштабов мощность рудника ПВС жестко ограничена суммарной приемистостью системы серодобычных скважин.

Как известно, между приемистостью скважин и производительностью рудника существует прямая связь: на 1 т серы тратится определенный, изменяющийся в небольших пределах, объем теплоносителя, называемый удельным расходом. Поэтому на стадии предварительной разведки необходимо определить параметры, от которых зависит суммарная приемистость системы серодобычных скважин.

Определение суммарной приемистости проводится, как показано в главе IV, аналитическими методами, в которых неоднородность пласта не учитывается. Отсюда следует, что фильтрационные параметры, закладываемые в расчет, должны характеризовать средние условия для отдельных участков месторождения.

Таким образом, фильтрационные свойства пласта нередко оказываются наиболее изменчивым и значимым фактором, по ним и следует выбирать систему опробования.

Выбор методов опробования. При выборе методов опробования необходимо исходить из требуемой точности определения параметров и пространственной изменчивости поля определяемого показателя. Кроме того, следует учитывать требование последовательного сгущения сети и стремиться к максимально полному использованию получаемой информации. В первую очередь должны использоваться методы, позволяющие получить хотя бы и неполную информацию при небольших затратах, а затем на основе обработки полученной информации уточнять методику проведения дорогостоящих методов опробования, дающих большую точность.

С учетом этих положений можно выделить первоочередные методы, основанные на интерпретации общегеологических данных.

В известняках показателем степени обводненности пород является трещиноватость и карст. Использование карста и трещиноватости как косвенных показателей обводненности широко применяется на серных месторождениях, обрабатываемых методом ПВС [42].

Оценка кавернозности дается в значениях объема пустых каверн по вскрытой мощности известняков. Определение про-

цента кавернозности проводилось в поле, исходя из процентного соотношения площади, занятой кавернами по отношению всей площади в продольном сечении керна исследуемого кавернозного интервала. При этом делается допущение, что такое соотношение сохраняется в любом параллельном сечении и, следовательно, в итоге совпадает с цифровыми значениями соотношения объема пустых каверн и объема керна исследуемого интервала, т. е. равное проценту кавернозности. Если, к примеру, вскрытый скважиной разрез имеет два интервала кавернозности — первый мощностью 1,5 м с кавернозностью 1% и второй мощностью 5,0 м с кавернозностью 10%, соответственно, в первом случае свободный объем составит  $1,5 \times 0,1 \times F = 0,015$  единиц объема, и во втором случае  $5 \times 0,1 \times F = 0,5$  единиц объема, где  $F$  — поперечное сечение керна. Отсюда, суммарный свободный объем по вскрытому скважиной разрезу будет  $(0,015 + 0,5) F = 0,515 F$ . Для удобства графических построений указанные значения даются в условных величинах  $0,01 F$ . В приведенном случае это будет 51,5. Полученные таким образом цифровые величины совпадают со значениями метропроцентов по кавернозным интервалам. В дальнейшем составленная по этим данным качественная карта водопроводимости была подтверждена результатами опытных откачек.

При геотехнологических методах разработки месторождений полезных ископаемых в недрах, как правило, движется жидкости с переменной плотностью, что обуславливает большое влияние на их динамику морфологии и элементов залегания рудных тел и рудовмещающих водоносных горизонтов. Влияние гравитационных сил приводит к тому, что более легкие жидкости движутся по линии восстания, в сторону наивысших отметок кровли водоносного горизонта. В то же время более тяжелые жидкости имеют тенденцию к опусканию, направляясь по линии падения. Это предопределяет необходимость изучения геоструктурных условий обрабатываемых месторождений подобно тому, как это делается при добыче нефти и газа [89]. Так, для решения задач о направлении движения теплоносителя и жидкой серы при ПВС авторами предложено использовать карты стратозогипс по кровле и подошве рудовмещающих водоносных горизонтов [84].

Гидрогеофизические исследования. Существенную информацию о гидрогеологических условиях дают геофизические исследования. Целью последних является выяснение интервалов водоносных пород, а также профиля проницаемости и пористости в разрезе. Комплекс геофизических исследований включает стандартный электрокаротаж, кавернометрию, гамма-каротаж, нейтронный гамма-каротаж, термометрию, резистивиметрию, расходомерию и другие методы.

Применению геофизических методов при гидрогеологических исследованиях посвящено большое число работ [70, 36, 95],

поэтому мы ограничимся лишь изложением методики исследований, использовавшихся при разведке и подготовке к эксплуатации серных месторождений методом ПВС.

При исследованиях для целей подземной выплавки с помощью геофизического каротажа уточняют положение контактов рудовмещающего водоносного горизонта и определяют положение проницаемых интервалов.

Выделение и прослеживание контактов осерненного интервала производится по данным комплекса методов: КС, ГК, ГГК, НГК. На Язовском месторождении продуктивные отложения представлены высокоомными осерненными известняками ( $\rho_k$  до 1000 Ом), среди которых имеются небольшой мощности глинистые прослои, а также закарстованные и трещиноватые участки ( $\rho_k$  в пределах 5—10 Ом). Покрывающими породами являются низкоомные песчано-глинистые отложения, подстилающими — плотные высокоомные гипсоангидриты.

Кровля известняков прослеживается с помощью КС по резкому уменьшению сопротивления при переходе от известняков к песчано-глинистым отложениям и повышению естественной радиоактивности. По данным ГГК, как правило, песчано-глинистые отложения отмечаются повышенными значениями регистрируемой интенсивности по сравнению с известняками. По данным НГК на зонде 50—60 см известняки отмечаются повышенными значениями параметров, а песчано-глинистые отложения пониженными их значениями.

Для определения контакта известняк — гипсоангидрит необходимо использовать данные замеров МБК, ГК, ГГК и НК (нейтронный каротаж по тепловым нейтронам, или нейтронный гамма-каротаж). В некоторых случаях, особенно при отсутствии данных НК, для уверенного и точного определения нижнего контакта необходимо проводить отбор грунтов, используя стрелюющие грунтоносы.

На кривой МБК, как правило, переход от известняков к гипсоангидритам отмечается резким увеличением кажущегося сопротивления. Кроме того, в интервале известняков кривая МБК более изрезанная, что указывает на их неоднородность. Гипсоангидриты отмечаются как монолитный высокоомный пласт. Если между известняками или гипсоангидритами прослеживаются прослои глины, это отмечается пониженным значением сопротивления на кривых КС и повышенным значением естественной радиоактивности на кривой ГК. Контакт известняков и гипсоангидритов четко прослеживается на кривой НК пониженными значениями плотности тепловых нейтронов за счет повышенного водородосодержания гипсоангидритов по сравнению с известняками.

Выделение в интервале осерненного известняка пористых, трещиноватых, кавернозных и закарстованных интервалов можно проводить по комплексу КС, ГК, ГГК, кавернометрии. Эти

участки выделяются пониженными значениями сопротивлений, повышенными значениями естественного и рассеянного гамма-излучения и увеличением диаметра по сравнению с номинальным.

При интерпретации каротажных диаграмм используются также данные резистивиметрии. Отношение сопротивления породы к сопротивлению насыщающей ее воды будет тем выше, чем ниже пустотность пород. При интерпретации учитывается форма диаграмм, по которой можно судить о неоднородности разреза. Трещиноватые породы характеризуются зазубренными, пилообразными диаграммами, в то время как пористые и монолитные породы характеризуются более плавными формами кривых.

Задача определения мест притока возникает как при разведке месторождения для прослеживания карстовых и трещиноватых зон, так и при исследовании серодобычных скважин. При этом могут применяться резистивиметрия, термометрия, БКЗ, расходометрия, методы радиоактивного индикатора. Последние два метода дают количественные результаты.

Резистивиметрия и термометрия применяются при невысокой водопроницаемости пласта. Эти методы заключаются в том, что в скважину закачивают воду, отличающуюся от пластовой по электрическому сопротивлению или температуре. Затем, отбирая воду из скважины, вызывают приток и проводят замеры сопротивления или температуры.

При больших водопроницаемостях пласта на движение воды значительное влияние оказывают гравитационные силы, и полученные результаты могут сильно исказить действительную картину распределения водопроницаемости в разрезе.

Метод БКЗ основан на изменении электрического сопротивления пород при нагнетании в них жидкости, отличающейся от пластовой. При нагнетании пресной воды участки поглощения отмечаются на диаграммах БКЗ повышением сопротивления по сравнению с первоначальной кривой.

Расходометрия применяется при исследованиях высокодебитных скважин (более  $5 \text{ м}^3/\text{ч}$ ). В скважину опускают прибор, измеряющий вертикальную скорость движения воды в ней, и затем ведут откачку или нагнетание с постоянным расходом. При подъеме расходомера регистрируют скорости движения воды на различных глубинах, а затем, имея данные кавернометрии, рассчитывают расход. Расходограмма дает представление о распределении проницаемости в вертикальном разрезе.

При проведении расходометрии следует проводить налив или нагнетание воды, не отличающейся по плотности от пластовой, а еще лучше вести не нагнетание, а откачку, чтобы исключить влияние гравитационных сил. Обязательным условием является постоянство расхода. Измерения проводятся в отдельных точках скважины через 0,5—1 м в зависимости от геологического разреза.

В интервалах наибольших изменений скорости счета выполняется детализация наблюдений. Изменение скорости счета не должно быть связано с изменением диаметра скважины, что проверяется сопоставлением замеров по разрезу с данными карвернометрии.

При идеально равномерном притоке по всему интервалу график расхода имеет вид прямой, наклоненной к вертикали. При неравномерном притоке наклон кривой изменяется. Чем больше угол наклона, тем интенсивнее приток в данном интервале. Если кривая параллельна оси скважины, это означает, что в данном интервале притока жидкости нет.

Метод радиоактивного индикатора применяется при скоростях движения воды в скважине менее 2 см/с, когда расходомерия невозможна из-за низкой чувствительности приборов. Метод заключается в том, что в нагнетаемую воду добавляют радиоактивный индикатор, чаще всего иод-131 или бром-82 [95]. С помощью двух детекторов определяют скорость продвижения индикатора по стволу скважины на различных участках. По скорости определяют расход.

На Гаурдакском месторождении для выявления степени трещиноватости и закарстованности пород успешно используется каротаж пятиточечным электрическим зондом [105].

Опытно-фильтрационные работы. Соблюдение принципа опережения геологических исследований позволяет использовать результаты интерпретации геологических и геофизических исследований для выбора рационального размещения опытных скважин и продолжительности фильтрационных опытов в соответствии с задачами, решаемыми на различных стадиях. Очевидно, что точность определения гидрогеологических параметров должна отвечать требованиям к изученности, сформулированным в § 1 настоящей главы и условно обозначаемым четырьмя категориями.

Для обеспечения изученности по категории  $C_2$  достаточно использовать результаты интерпретации геологических данных.

Изучение по категории  $C_1$  требует разделения геологических тел на гидрогеологические элементы с осредненной количественной характеристикой каждого элемента. Такими элементами могут служить отдельные залежи полезного ископаемого, если в их пределах гидрогеологические параметры отвечают условию непрерывности. Прерывность гидрогеологических параметров, как правило, обусловлена тектоническими нарушениями.

Выделенный гидрогеологический элемент может быть охарактеризован проведением опыта, радиус влияния которого превышает расстояние до границы элемента.

Проведение длительных откачек позволяет не только получать осредненные гидрогеологические параметры выделенного гидрогеологического элемента, но и установить степень его взаимосвязи с соседними элементами а также характер границ.

Для этого используется анализ полученных зависимостей между дебитом, понижением и временем.

Если существующие гидрогеологические условия (величина уровнепроводности, наличие границ I и II родов) не позволяют охарактеризовать весь гидрогеологический элемент одним опытом, то площадь вне зоны влияния опыта характеризуется экстраполяцией с учетом геологических данных.

При изучении по категории В ставится задача получения данных для выбора системы разработки и расчета производительности эксплуатационных скважин. В расчетные формулы входят осредненные гидрогеологические показатели. Для их определения необходимо: 1) установить соответствующие данной категории изученности и технологическим требованиям критерии для выделения гидрогеологических элементов; 2) выделить гидрогеологические элементы по уже имеющимся данным; 3) охарактеризовать каждый из элементов фильтрационными опытами и уточнить положение границ.

При подземной выплавке серы критериями для выделения гидрогеологических элементов могут служить требования к приемистости скважин.

В соответствии с этими требованиями выделяют площади, на которых приемистость скважин оптимальна (более  $10 \text{ м}^3/\text{ч}$ ), и площади, на которых требуется проведение специальных мероприятий для повышения приемистости.

Количественную характеристику выделенных гидрогеологических элементов наиболее целесообразно определять кратковременными опытами, радиус влияния которых соизмерим с расстояниями до границ элементов. Так как при выборе системы разработки учитывается анизотропность свойств пласта, то необходимо в процессе опытов вести наблюдения по лучам скважин, расположенным параллельно и перпендикулярно к направлению анизотропности.

Длительность кратковременных одиночных откачек целесообразно определять временем, за которое развитие депрессионной воронки в точке, соответствующей расстоянию между эксплуатационными скважинами, примет квазистационарный характер.

Изучение по категории А подразумевает степень детальности, обеспечивающую оценку приемистости или дебита каждой скважины проектируемой системы. Такие жесткие требования объясняются тем, что приемистость и дебит скважин определяют мощность будущего предприятия, причем исправление допущенной ошибки в ходе эксплуатации часто оказывается невозможным и запланированные сроки освоения мощности могут быть сорваны. На этом этапе исследований необходимо получить гидрогеологические параметры, позволяющие провести расчеты приемистости и дебита скважин будущей системы методом моделирования. Полученные результаты должны характеризовать

свойства пласта по направлению, соответствующему направлению фильтрации теплоносителя.

Для решения этих задач целесообразно использовать групповые откачки-нагнетания, простейшим видом которых является откачка-нагнетание по двум скважинам [50].

В простейшем варианте опыт проводится следующим образом. Из одной скважины откачивается вода с расходом  $Q$ , эта вода тут же подается во вторую скважину (рис. 52), за счет чего автоматически соблюдается равенство расходов. Изменение уровня в любой точке пласта представляет собой алгебраическую сумму изменений под влиянием каждой из скважин, т. е.

$$S = S_1 + S_2 = \frac{1}{4\pi km} \left( Q_1 \ln \frac{2,25at_1}{r_1^2} + Q_2 \ln \frac{2,25at_2}{r_2^2} \right). \quad (V.3)$$

Допуская, что в области фильтрации пласт однороден ( $km = \text{const}$ ;  $a = \text{const}$ ), а также учитывая, что  $Q_1 = Q_2$ ,  $t_1 = t_2$ , после простейших преобразований получаем:

$$S = \frac{Q}{2\pi km} \ln \frac{r_2}{r_1}, \quad (V.4)$$

где  $r_1$  — расстояние до разгрузочной скважины;  $r_2$  — расстояние до нагнетательной скважины.

Решая уравнение (V.4) относительно  $km$ , получаем

$$km = \frac{0,366Q \lg r_2/r_1}{S}. \quad (V.5)$$

Если измерение понижения проводится в водоотливной скважине, то  $r_1$  — радиус скважины, а  $r_2$  — расстояние между скважинами.

Опыты по схеме откачка-нагнетание позволяют определить также и активную пористость.

Активная пористость является основной характеристикой, определяющей скорость фильтрации рабочих и продуктивных флюидов. В связи с этим при подземном выщелачивании, выплавке и газификации определение активной пористости составляет одну из важнейших задач детальных гидрогеологических исследований. При определении активной пористости могут ис-

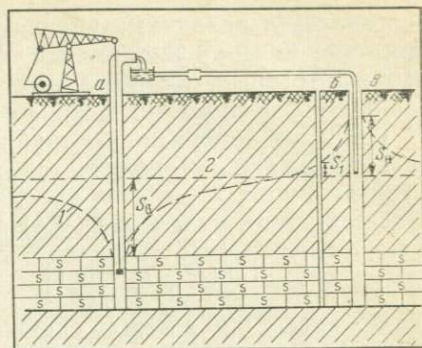


Рис. 52. Схема опытно-фильтрационных работ с использованием двух скважин:

$a$ — $б$  — скважины ( $a$  — водозаборная,  $б$  — нагнетательная,  $в$  — наблюдательная);  $1$  —  $2$  — уровни ( $1$  — динамический,  $2$  — статический)

пользоваться различные индикаторные методы, в том числе нагнетание меченой жидкости с фиксированием ее появления в наблюдательных скважинах, метод закачки-откачки с использованием пары скважин, а также геофизические методы.

Градиент напора по кратчайшей линии тока (прямой, соединяющей скважины) получается дифференцированием уравнения по этой линии.

Представим уравнение (V.4) в виде

$$S = \frac{Q}{2\pi km} [\ln(R-r) - \ln r], \quad (V.6)$$

где  $R$  — расстояние между скважинами.

Продифференцируем по  $r$ :

$$\frac{dS}{dr} = \frac{QR}{2\pi km (r^2 - Rr)}. \quad (V.7)$$

Скорость движения по главной линии тока

$$V = \frac{k}{n} \cdot \frac{dS}{dr} = \frac{QR}{2\pi mn (r^2 - Rr)}. \quad (V.8)$$

Время, за которое частица жидкости проходит отрезок длиной  $dr$ , определится из уравнения

$$dt = \frac{dr}{V} = \frac{2\pi mn}{QR} (r^2 - Rr) dr. \quad (V.9)$$

Отсюда время движения от нагнетательной скважины до любой точки на главной линии тока составит:

$$T = \int_0^r dt = \frac{2\pi mn}{QR} \left( \frac{r^3}{3} - \frac{Rr^2}{2} \right). \quad (V.10)$$

При  $R=r$

$$T = \frac{\pi}{3} \frac{mnR^2}{Q}. \quad (V.11)$$

Используя зависимость (V.11), можно найти по известному времени движения жидкости от нагнетательной до наблюдательной скважины величину динамической пористости  $n$ . Для этого желательно иметь две наблюдательные скважины, которые следует располагать приблизительно на четверти расстояния от нагнетательной и дренажной скважин, в створе пары скважин. Периодичность проведения резистивиметрии (или других измерений) для определения времени появления закачиваемой воды в наблюдательной скважине определяется из расчета получения результата с ошибкой не более 10%. Для этого следует ориентировочно определить время  $t$  появления жидкости и назначить период между повторными замерами не менее 0,1 т.

Время можно определять способами радиоактивного индикатора, красителя, закачки воды, отличающейся по химическому

составу. Момент появления закачиваемой воды можно определить замером электрического сопротивления. Если такие замеры проводить резистивиметрическим каротажем, создается возможность установить характер движения жидкости в разрезе.

Возможны также и другие варианты способа, например: откачка из одной скважины и закачка в две или более скважины, или, наоборот, откачка из нескольких скважин и закачка в одну.

Расчетные зависимости для определения водопродовимости и динамической пористости могут быть легко выведены аналогичным путем.

Пример расчета параметров пласта. Исходные данные: пласт залегает на глубине 200 м, уровень воды устанавливается на глубине 70 м. Средняя мощность пласта на участке 6 м.

Для опыта используются две скважины, расположенные в 150 м одна от другой. Наблюдательная скважина расположена в створе опытных скважин на расстоянии 20 м от нагнетательной. Радиус скважин 0,05 м. При проведении опыта получены следующие данные: дебит  $Q=4,5$  м<sup>3</sup>/ч;  $S_n=50$  м;  $S_n=63$  м;  $S_1=12$  м. В ходе опыта откачиваемая вода подкрашивалась метиленовой синькой, которая была обнаружена в наблюдательной скважине через 3 ч. Определяем водопродовимость пласта: для нагнетательной скважины

$$km = 0,37 \frac{4,5 \cdot 24 \lg 150/0,05}{63} = 2,2 \text{ м}^2/\text{сут};$$

для водоотливной скважины

$$km = 0,37 \frac{4,5 \cdot 24 \lg 150/0,05}{50} = 2,76 \text{ м}^2/\text{сут};$$

для наблюдательной скважины

$$km = 0,37 \frac{4,5 \cdot 24 \lg 150/20}{12} = 2,9 \text{ м}^2/\text{сут}.$$

Коэффициент фильтрации получаем делением водопродовимости на мощность: 0,37; 0,46; 0,48 м/сут.

Определяем динамическую пористость:

$$n = \frac{3 \cdot 24 Q T}{\pi m R^2} = \frac{3 \cdot 24 \cdot 4,5 \cdot 3}{3,14 \cdot 6 \cdot 400} = 0,13.$$

Документация и опробование разведочных скважин. При геотехнологических методах добычи полезных ископаемых используются только системы разведки буровыми скважинами. Исключение представляют участки отработанных или отработываемых обычными способами месторождений. Поэтому документация и опробование керна является основным источником информации и должна проводиться с особой тщательностью.

Получаемый при этом исходный материал служит, с одной стороны, для расшифровки геологического строения месторождения, решения вопросов закономерностей его локализации и формирования, и с другой — для решения чисто утилитарных задач будущей эксплуатации. Поэтому описание керна состоит как бы

из двух частей: в первой части дается подробная общепринятая характеристика пород и руд, а во второй — конкретная характеристика факторов, влияющих на условия отработки. При подземной выплавке серы важнейшими характеристиками руды являются степень трещиноватости и кавернозности, серосодержание, структура и текстура руды; эти показатели должны характеризоваться наиболее полно.

Вопрос о частоте отбора проб на лабораторные определения различных показателей широко освещен в литературе [2, 17, 45]. Наиболее целесообразно поинтервальное бороздвое опробование, за исключением тех случаев, когда требуется отбор образцов в ненарушенном состоянии.

Для четкости характеристики технологических свойств руд последние классифицируют по основным показателям. Серные руды, обрабатываемые подземной выплавкой, различают по: литологическому составу породного скелета (известняковые, известняково-гипсовые, глинистые); текстуре (прожилковые, гнездовые, вкрапленные, рассеянные); структуре (крупно-, средне-, и скрытокристаллические); кавернозности (монокристаллические, пористые, слабокавернозные, сильнокавернозные) и т. д.

Практика показывает, что основной классификационный признак не может быть единым для всех месторождений, поскольку для каждого месторождения существуют свои решающие и главные факторы.

Например, на Гаурдакском месторождении серы основной причиной выхода скважины из строя служит обрушение скелета выплавленной руды с образованием тонкодисперсной смеси обломков пород, пропитанной расплавленной серой. Поэтому в условиях Гаурдака необходимо выделять руды устойчивые после выплавки и две категории неустойчивых: с образованием крупнообломочного и тонкодисперсного материала. Точно так же при выщелачивании металлов на одних месторождениях решающим фактором является карбонатность, на других — проницаемость руд, на третьих — минеральный состав полезного компонента.

Одной из главных задач разведочных работ является геометризация руд различных сортов. Для правильного решения этого вопроса необходимо найти связь между технологическими показателями и минералого-петрографическими характеристиками руды, что позволяет применить наиболее результативный генетический подход, т. е. использовать общеизвестные методики для решения специальных вопросов.

**Обработка результатов.** Результатом предварительной разведки месторождений серы должна явиться геолого-гидрогеологическая документация, позволяющая составить в укрупненном, обобщенном виде проект будущего предприятия. Основные задачи, решаемые при этом, следующие.

Мощность будущего предприятия определяется, как известно, с учетом необходимых капитальных вложений и норм их амортизации. С этой точки зрения оказывается, что небольшие капитальные затраты при ПВС позволяют обеспечить рентабельность освоения месторождений даже при небольших запасах. Поэтому требования к точности подсчета запасов серы снижаются; проектирование ведется на основании подсчета запасов по категориям В и С<sub>1</sub> (Предкарпатье) или С<sub>1</sub> (Гаурдак).

Однако возможная мощность при применении метода ПВС жестко ограничивается суммарной приемистостью системы серодобычных скважин. Поэтому одним из основных документов, составляемых по результатам разведки, служит *карта водопроницаемости рудной залежи*.

Как показано в главе IV, приемистость скважин существенно зависит от направления потока теплоносителя в неоднородных по углу наклона кровли пластах. Установлено, что система разработки должна учитывать элементы залегания пласта. Отсюда вытекает необходимость составления по результатам разведки *детальных карт рельефа кровли и почвы* серной залежи, а также тектонические карты с указанием линий разломов, амплитуд и знаков смещения отдельных блоков.

Зависимость процесса плавления от структурно-текстурных особенностей предопределяет необходимость построения *карт распространения различных сортов руд* (по выплавляемости, степени разрушаемости рудного скелета и т. п.).

Дебит серы и удельный расход теплоносителя зависят прежде всего от мощности рудной залежи. Для получения этих показателей необходимо составить *карты изомощности рудных тел*.

Границы применения метода ПВС определяются напором подземных вод над кровлей и глубиной залегания серных руд; информацию об этих показателях дают карты *изопьез и глубин залегания*.

Перечисленные материалы дополняются разрезами, на которых, помимо данных о литологии и содержании серы, целесообразно выделять интервалы повышенной кавернозности и технологические типы руд.

## § 5. Подземное выщелачивание

За последние годы специализированная разведка и доразведка проведена на ряде месторождений металлов эпигенетического и осадочно-эпигенетического происхождения [13, 14]. Задачи и методика разведки таких месторождений во многом аналогичны методике исследований для целей подземной выплавки серы.

Перечень факторов, подлежащих изучению. Как показано в главе III, главными факторами, определяющими условия ПВ, служат: мощность рудной залежи, содержание полезного ископаемого, мощность покрывающих и подстилающих

проницаемых пород, минеральный состав, напор подземных вод, глубина залегания, граничные геологические условия, водоупорные свойства покрывающих пород, окислительно-восстановительная обстановка и кислотно-щелочная характеристика пласта в естественных условиях.

Выбор критериев для установления границ геологических тел.

Целесообразно выделять следующие геологические тела: рудная залежь (по содержанию полезного ископаемого); рудовмещающий водоносный горизонт (по проницаемости), верхний и нижний водоупоры (по водоупорности), водоносные горизонты, связанные с рудовмещающим; прочие водоносные горизонты и водоупоры.

Пространственная изменчивость. Эпигенетические месторождения металлов приурочены, как правило, к комплексу терригенных отложений. Условия их образования освещены в ряде работ [40]. Рудные тела формируются в песчаных водоносных горизонтах на выклинивании зоны пластового окисления. Они подчиняются строгому литологическому контролю и занимают закономерное положение в эпигенетической зональности. Эта зональность включает зоны окисления, оруденения и безрудных сероцветных пород. На размещение зон оруденения оказывает существенное влияние интенсивность водообмена и наличие органического вещества в породах. Таким образом, изменчивость свойств рудных залежей зависит от первоначального литологического состава рудовмещающей толщи и развития последующих эпигенетических изменений.

Система опробования. Условия образования эпигенетических месторождений определяют обычно весьма сложную форму рудных залежей и неоднородность их по мощности, содержанию и минеральному составу. Поэтому для детального изучения месторождений применяется густая сеть разведочных скважин. На стадии предварительной разведки, когда требуется оценить только масштабы месторождения и выяснить средние показатели свойств руд, разведочная сеть может быть разрежена. Поскольку месторождения часто приурочены к русловым фациям и имеют вытянутую форму, то обычно разведочные профили ориентируют перпендикулярно к длинной оси залежей.

Так, на одном из месторождений, приуроченном к аллювиальным отложениям четвертичного возраста, применялась сеть в виде профилей с шагом 100 м при расстоянии между профилями 600 м. При этом запасы были квалифицированы по категории С<sub>1</sub>. На участке, разведанном по категории В, расстояние между скважинами и профилями были уменьшены вдвое. Это вполне достаточно для составления технико-экономического обоснования промышленного освоения, поскольку целесообразность его в связи с небольшими капитальными затратами не вызывала сомнения.

Методы опробования. Опробование для подсчета запасов ведется по обычной методике. Основная особенность заключается в том, чтобы выяснить приуроченность полезного ископаемого к определенным литологическим разностям, детально изучить минеральный состав и проницаемость руд. Эти параметры определяют приемистость и дебит скважин, степень извлечения полезного ископаемого, затраты рабочих агентов.

Как и при других методах разработки, в первую очередь необходимо как можно полнее использовать общегеологические данные и косвенные методы определения фильтрационных свойств. Известно, что между гранулометрическим составом песчаных пород и их фильтрационными характеристиками существует зависимость, выражаемая эмпирическими формулами. Это позволяет по результатам гранулометрического анализа определить проницаемость, что не требует отбора образцов с нарушенной структурой.

На месторождении, приуроченном к аллювиальным пескам, для определения гранулометрического состава отбирались бороздовые пробы из керна скважин. Длина интервала опробования составляла 1 м. Анализ проводился ситовым методом с ареометрическим окончанием. По результатам анализов рассчитаны коэффициенты фильтрации.

Для контроля было отобрано 25 проб с ненарушенной структурой, по которым коэффициент фильтрации определяли в фильтрационном приборе. По результатам опробования руды разделены на глинистые, суглинистые, супесчаные и песчаные. Первые два типа руд имеют ничтожную проницаемость и отнесены к забалансовым. В дальнейшем полученные результаты сопоставлялись с данными прямого определения фильтрационных свойств опытными откачками и показали удовлетворительную сходимость.

На месторождениях, приуроченных к более древним и глубокозалегающим отложениям, начальные фильтрационные свойства существенно изменяются в результате эпигенетических процессов; нередко такие породы цементируются и превращаются из рыхлых в скальные и полускальные.

Обводненность скальных и полускальных пород определяется интенсивностью их трещиноватости и степенью раскрытости трещин. Поэтому изучение трещиноватости представляет собой необходимый элемент любых гидрогеологических исследований. Вопросам ее изучения посвящено огромное число научных работ, которые, в зависимости от целей изучения делятся на три группы: а) трещиноватость как характеристика геологической структуры; б) трещиноватость как фактор, определяющий устойчивость к деформации горных пород; в) трещиноватость как фактор, определяющий коллекторские свойства.

Методы изучения и количественная оценка степени трещиноватости детально разработаны и общеизвестны. Однако коллек-

торские свойства пород связаны не столько с густотой трещин, сколько с их раскрытостью, а степень раскрытости трудно поддается определению. Качественным показателем раскрытости трещин является характер вторичного минералообразования на их стенках. Наличие пленок, натеков, инкрустаций и корочек вторичных минералов, изъеденный, неровный характер поверхности указывают на движение подземных вод по трещинам. Наоборот, наличие зеркал скольжения, глинистых примазок свидетельствуют о закрытости трещин.

Для полускальных пород возможность существования раскрытых трещин определяется их прочностью и глубиной залегания. Коллекторские свойства растворимых скальных пород (известняк, гипс, соль) определяются развитием карста, неразрывно связанного с трещиноватостью [93].

Раздельнозернистые породы под влиянием геостатического давления, времени и деятельности поровых флюидов претерпевают различные изменения. Так, кварцевые зерна в участках максимального напряжения (на контактах) растворяются, и кварц отлагается на этих же зернах, играющих роль стенок пор. Под давлением происходит переориентировка зерен [65]. Огромную роль играют эпигенетические процессы, связанные с деятельностью подземных вод и микроорганизмов. Выщелачивание отдельных компонентов породы может вызвать ее разрыхление и деформацию покрывающих толщ. Все это требует комплексного подхода к изучению свойств массива пород, определяемых всей его геологической историей.

Использование геологических данных для расшифровки гидрогеологических условий позволяет уменьшить объем и рационально направить гидрогеологические исследования, а также получить представление о гидрогеологических условиях уже на ранних стадиях разведочных работ.

Как уже отмечалось, важное значение для подземного выщелачивания имеет минеральный состав руд и вмещающих пород. Лабораторные минералогические и химические анализы весьма трудоемки, поэтому для определения затрат рабочего агента применяется комплексная характеристика минерального состава — кислотоемкость. Для этого из керна скважин отбирают поинтервально бороздовые пробы, которые затем сокращают квартованием до 50 г. После высушивания пробы помещают в сосуд с рабочим агентом определенной концентрации при периодическом перемешивании выдерживают до достижения постоянной величины рН раствора. Прореагировавший раствор сливают и заливают свежую порцию; опыт повторяют. По разности рН до и после реакции определяют расход рабочего агента на единицу массы руды.

Как правило, основной расход кислоты приходится на реакцию с карбонатами. Поэтому целесообразно также определять карбонатность газометрическим способом, что одновременно

позволяет судить и о количестве выделяющейся в результате реакции углекислоты. Методика проведения полевых опытно-фильтрационных работ в целом аналогична описанной для месторождения серы.

**Обработка результатов.** По результатам изучения литологии выделяют руды существенно песчаные и существенно глинистые. Запасы в песчаных рудах относятся к извлекаемым и подсчитываются отдельно. Подсчет запасов в глинистых рудах производится в том случае, если разработка месторождений возможна также обычными методами. Распределение руд в залежи по литологическим типам отражается на литологической карте.

Руды могут быть разделены на сорта также по степени карбонатности или по кислотоемкости, что также отражается соответствующими картами.

Интенсивность процесса выщелачивания в значительной мере определяется проницаемостью руд, а также другими факторами, от которых зависят приемистость и дебит эксплуатационных скважин. Для расчета этих параметров строят карты водопроводимости рудовмещающего водоносного горизонта, глубин залегания подземных вод и кровли рудного тела.

Характер оруденения изображают на картах изомощностей или метропроцентов. Полезно также составлять специальные карты, на которых показывают соотношение между мощностями руд и безрудных проницаемых пород. Для расчетов затрат рабочих агентов могут быть использованы карты метропроцента кислотоемкости рудовмещающего водоносного горизонта.

На разрезах изображают литологический состав руд, а также в виде графиков распределение проницаемости и кислотоемкости в разрезе.

## § 6. Скважинная гидродобыча

Специализированные геолого-гидрогеологические исследования для целей СГД проводились на Кингисеппском месторождении фосфоритов.

Перечень факторов, подлежащих изучению. Как показано выше, главными факторами являются прочностные свойства руд и покрывающих пород, минеральный и гранулометрический состав руд, форма рудных тел, гидрогеологические условия.

Выбор критериев для установления границ геологических тел. Из представлений о влиянии различных факторов целесообразно различать: рудное тело, рудовмещающий массив (руда и покрывающие ее рыхлые образования), покрывающую толщу, рудовмещающий водоносный горизонт.

**Пространственная изменчивость.** Рыхлые отложения, доступные для добычи методом СГД, имеют различную из-

менчивость в зависимости от генетического типа и последующих эпигенетических изменений.

Морские отложения песков с включением фосфатных раковин отличаются высокой степенью выдержанности по содержанию фосфатов и мощности; кровля и почва практически горизонтальны. Наиболее изменчивым фактором является прочность руд: они могут быть рыхлыми, слабосцементированными доломитовым цементом. Встречаются также линзы крепко сцементированных конкреционных песчаников. В разрезе песчаники могут быть приурочены к кровле и середине рудного пласта. Распространение в плане весьма сложно; определенных закономерностей пока установить не удалось. Размер линз в плане также чрезвычайно изменчив.

Системы опробования. Специфика опробования рудных залежей для целей СГД заключается в том, что в число главных факторов входят прочностные свойства, а также рельеф почвы рудного тела. Густота разведочной сети должна выбираться таким образом, чтобы по результатам разведки можно было разделить руды по сортам на рыхлые (легкоразмываемые), слабосцементированные (трудноразмываемые) и прочные (неразмываемые). Кроме того, необходимо исследовать геометрию почвы рудных тел, так как от этого зависит коэффициент извлечения. Большое влияние на условия разработки оказывают прочностные и деформационные свойства кровли. Если последние имеют большую изменчивость, чем свойства самой рудной залежи, выбор разведочной сети необходимо проводить по фактору прочности покрывающих пород.

Методы исследований. Как и другие характеристики горных пород, прочность и неоднородность по физико-механическим свойствам целиком определяются их образованием и последующей геологической историей. Поэтому первым этапом изучения является использование общегеологических данных. Теоретические основы оценки осадочных пород с точки зрения их физико-механических свойств детально разработаны И. М. Горьковой [34] и рядом других авторов, работающих в области инженерной геологии. По И. М. Горьковой, деформационные и реологические свойства осадочных пород во всем их многообразии закономерно определяются различным сочетанием и величинами показателей дисперсности, характера структурных связей, степени уплотнения, водонасыщенности и литификации. Схема зависимости деформационных особенностей пород от комплекса перечисленных показателей выдержана и в геолого-генетическом отношении, так как состав, характер структурных связей пород и их состояние непосредственно связаны с условиями осадконакопления, эпигенеза и диагенеза.

Таким образом, для определения особенностей деформирования горных пород необходимо прежде всего отнести их к тому или иному типу. Дальнейшая методика исследований должна

выбираться в зависимости от типа пород. И. М. Горькова рекомендует применение следующих классификационных испытаний.

Определение прочностных свойств для пород слабой степени литификации производится методом конического пластомера, а для пород высокой и весьма высокой степени литификации — методом одноосного сжатия. Влажность и плотность определяют обычными методами. После выделения на основе первых трех показателей отдельных геотехнологических элементов ведут опробование каждого элемента с отбором проб на гранулометрический и микроагрегатный анализы. Для определения характера структурных связей в породах рекомендуется метод ротационного вискозиметра Воларовича. На стадии предварительной разведки перечисленные показатели, как правило, достаточны для решения вопроса о целесообразности детальной разведки месторождения.

Для определения достижимых градиентов фильтрации при гидродобыче, а также решения вопросов оборотного водоснабжения и возможности предварительного осушения или отжатия подземных вод необходимо изучить гидрогеологические условия.

Детальность и методика гидрогеологических исследований аналогичны применяемым при обычных методах отработки.

Обработка результатов. Методика выбора расчетных показателей по набору результатов испытаний детально рассмотрена в ряде работ по инженерной геологии [17]. При этом используются методы математической статистики и теории вероятности. Обобщение результатов находит свое отражение в серии карт, из которых обязательны карты метропроцента, изомощностей, рельефа кровли и подошвы рудного и рудовмещающего тел, осредненных на мощность РГТ содержаний, а также гидрогеологические карты. На разрезах, кроме литологии, целесообразно показывать в виде эпюр прочностные свойства пород.

## ГЕОЛОГО-ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РУДНИКОВ

---

### § 1. Задачи и особенности геологической службы

Задачи и методы геологического обслуживания горнодобывающих предприятий с исчерпывающей полнотой освещены в книге М. Н. Альбова и А. М. Быбочкина [3]. Основная задача — всестороннее геологическое изучение месторождений в процессе их эксплуатации и вытекающие из этого изучения практические рекомендации по максимально возможному извлечению его запасов.

Применение геотехнологических методов существенно повышает роль и ответственность геологической службы, а также расширяет ее задачи. Это объясняется прежде всего тем, что геотехнологические процессы чрезвычайно чувствительны к различным изменениям природной обстановки; они недоступны для непосредственного наблюдения. Управление процессами основывается на глубоком изучении физико-геологической обстановки, оценке влияния различных факторов на течение процессов, тщательном сборе и обработке всей информации, получаемой в период эксплуатации.

Поэтому на рудниках создается единая геологическая и технологическая служба, в задачи которой входит не только сбор и обработка геологической информации, но и принятие конкретных решений по системе и режиму отработки.

В круг обязанностей геолого-технологической службы входят следующие основные задачи: эксплуатационная разведка, составление планов горных работ, документация и опробование эксплуатационных скважин, сбор и обработка информации о ходе процесса добычи, выдача рекомендаций по системе и режиму эксплуатации, учет движения запасов.

Помимо перечисленных задач геотехнологическая служба обеспечивает контроль за качеством работ по вскрытию и подготовке месторождения (контрольные замеры, обсадка и опрессовка скважин, монтаж технологического оборудования в скважинах, приемка и списание скважин и т. д.). Методика решения этих задач рассматривается на примерах обслуживания предприятий подземной выплавки серы и подземного выщелачивания.

## § 2. Эксплуатационная разведка

Эксплуатационной разведкой называют заключительную стадию геологоразведочных работ на действующем руднике, в результате которых достигается перевод запасов полезного ископаемого из категорий В и  $C_1 + C_2$  в категории А+В в тех частях, блоках и горизонтах месторождения, которые предназначаются к разработке в ближайшее время [3]. Цель эксплуатационной разведки — получение надежных материалов для планирования добычи.

В сложившейся практике в первый год функционирования рудника работы ведутся на горно-капитальном участке; в дальнейшем составляются ежегодные планы горных работ. Соответственно эксплуатационная разведка должна проводиться с опережением, позволяющим по полученным материалам составлять планы.

Скважины эксплуатационной разведки целесообразно располагать по сети, кратной сети эксплуатационных скважин, что позволяет в дальнейшем использовать их в качестве добычных или вспомогательных.

Опыт показывает, что изменение планов горных работ в ходе эксплуатации из-за недостаточности геологических материалов нередко приводит к нарушению стабильности процесса, ведет к невыполнению плана производства продукции. Поэтому точность определения необходимых для планирования характеристик геологических тел должна, как правило, соответствовать категории А. Так, например, детальный анализ результатов бурения более 700 эксплуатационных скважин на Язовском месторождении показал, что исходя из изменчивости мощности расстояние между скважинами эксплуатационного бурения должно составлять от 70 до 100 м.

В условиях Гаурдакского месторождения анализ разведочной сети [101] позволил рекомендовать для стадии эксплуатационной разведки сеть  $30 \times 60$  м. Такая сеть обеспечивает не только достаточное выяснение морфологических особенностей рудных тел, но и распространение карста, как одного из главных факторов. Наоборот, на Язовском месторождении рекомендованная по параметру изменчивости мощности сеть не обеспечивает достаточной точности определения фильтрационных характеристик пласта; ошибка в определении водопроводимости при такой сети достигает 100%. Более точное определение водопроводимости потребовало бы сгущения сети до  $30 \times 40$  м, т. е. густота бурения соответствовала бы эксплуатационной сети, что экономически неоправдано. Поэтому полученные гидрогеологические материалы следует считать недостаточно надежными и при планировании добычных работ необходимо предусматривать резерв на тот случай, если фактические параметры окажутся худшими, чем ожидаемые по данным разведки.

Результатом эксплуатационной разведки является комплекс обобщающих материалов, раскрывающих условия и ожидаемые результаты эксплуатации участков месторождения. Наряду с составлением обычных детальных планов и разрезов необходимо составлять специальные геологические документы — геолого-технологические карты. На этих картах выделяют контуры отработки, технологические типы руд, ожидаемое извлечение, прогнозную производительность скважины.

### § 3. Документация керна эксплуатационных скважин. Контрольное опробование

Бурение эксплуатационных скважин, как правило, ведут с отбором керна только в интервале пород, подверженных непосредственному воздействию рабочих агентов.

Описание керна проводят целенаправленно, с конкретной характеристикой факторов, влияющих на процесс эксплуатации. Например, при документации серодобычных скважин описание керна серной руды включает: литологический состав, структуру, текстуру, содержание серы, количество трещин на 1 м, степень раскрытости трещин, кавернозность, преобладающий размер пустот. Серосодержание и пустотность определяют визуально, с использованием эталонных коллекций. Опыт показывает, что ошибка в определении серосодержания при визуальном определении не превышает 5 отн. %. Обязательно фиксируют наличие карстовых полостей по выходу керна и провалам бурового инструмента. Характеризуют степень заполнения карстовых полостей и характер заполнителя.

Положение контакта руды с подстилающими породами должно фиксироваться с большой точностью. Поэтому по каждой скважине проводится комплекс геофизических исследований.

Все документы по скважинам (геологическая колонка с описанием керна, акты на обсадку, цементацию, контрольные замеры, и т. д.) подшиваются в папки, именуемые паспортом скважины. Керн хранят до окончания эксплуатации скважин, после чего проводят его ликвидацию или сокращение.

Полученный первичный материал служит для составления обобщающих материалов, отражающих условия будущей эксплуатации. При подземной выплавке серы составляют карты: 1) мощностей рудной залежи и рудовмещающего водоносного горизонта; 2) продуктивности залежи; 3) рельефа кровли и почвы пласта; 4) пустотности руд. Кроме того, составляют серии разрезов с выделением на них технологических типов руд. Аналогичную документацию составляют при подземном выщелачивании металлов из проницаемых пластовых месторождений.

При скважинной гидродобыче основное внимание при документации керна уделяют прочностным характеристикам руд и покрывающих пород, а также трещиноватости последних.

Уже в ходе подготовки месторождения следует предусматривать необходимость бурения контрольных скважин, целью которых является оценка степени текущего и конечного извлечения полезных ископаемых из недр, а также изучение характера сопутствующих процессов. Для этого на обрабатываемом участке предусматривается бурение опорных скважин. Опорные скважины размещают на участках с различными условиями эксплуатации. Документацию опорных скважин ведут особо тщательно, а определение основных характеристик — лабораторными способами.

В качестве примера может служить методика опробования опорных и контрольных скважин, использованная на месторождении, обрабатываемом выщелачиванием.

Перед началом работ бурятся скважины для детального изучения рудоносности и литологических особенностей рудного тела. При этом проводится изучение состава пород, кислотоемкости и содержания полезного компонента. При изучении состава можно пользоваться инженерно-геологической классификацией пород В. В. Охотина [63], основанной на соотношении песчаных, пылеватых и глинистых частиц, так как она наиболее полно отражает их фильтрационные свойства. Отбор образцов на гранулометрический анализ следует проводить из каждого слоя вмещающих пород, а из рудного слоя — не реже чем через 0,5 м. Пробы отбираются бороздовым способом с последующим сокращением.

Определение кислотоемкости необходимо для расчета расхода рабочих реагентов на выщелачивание; пробы пород отбирают по вмещающим породам из каждого слоя, а из рудного слоя через каждые 10 см. Содержание полезного компонента определяют лабораторными методами.

В ходе выщелачивания или после его окончания необходимо выяснить степень извлечения полезного компонента и получить представление о том, насколько прореагировали породы с рабочими растворами. Для этой цели вблизи от скважины, пробуренной до начала работ, проходят контрольную скважину. Расстояние между скважинами должно составлять 1—1,5 м, так как вокруг первой скважины создается зона, в которой фильтрация снижена в результате коагуляции пор глинистым раствором. По скважине проводится контрольное опробование. Сравнение содержания полезного компонента до выщелачивания и после дает возможность определить степень его извлечения. О том, насколько полно прошла реакция рабочих растворов с породами, можно судить по уменьшению кислотоемкости последних.

Чтобы определить, проник ли раствор в поровое пространство руд, следует отобрать специальные пробы для определения рН порового раствора.

Целесообразно применять следующую методику для его определения. Из керна отбирают образцы массой 40 г, которые

делят на две части. По одному образцу определяют естественную влажность  $W$ , а другой помещают в сосуд, куда заливают  $30 \text{ см}^3$  дистиллированной воды и выстаивают при периодическом помешивании в течение 30 мин. Затем потенциометрическим методом измеряют рН суспензии, который пересчитывают на рН порового раствора с учетом естественной влажности по формуле

$$\text{pH} = \text{pH}_c + \lg \frac{W}{30}, \quad (\text{VI.1})$$

где  $W$  — влажность образца.

Полученные результаты исследований показаны на рис. 53, где в виде графиков изображены кислотность и рН порового раствора различных литологических разностей пород по скважине, пробуренной на участке выщелачивания после трех месяцев работы.

В тяжелых суглинках поровый раствор остался нейтральным, в то время как в песках местами снизился до 2. В легких суглинках, залегающих в основании водоносного горизонта, рН имеет промежуточные значения. Наблюдается также понижение рН поровых растворов песков с глубиной. Это, по-видимому, объясняется тем, что рабочие растворы, будучи высокоминерализованными, вытесняют пластовые воды в первую очередь из нижней части водоносного горизонта.

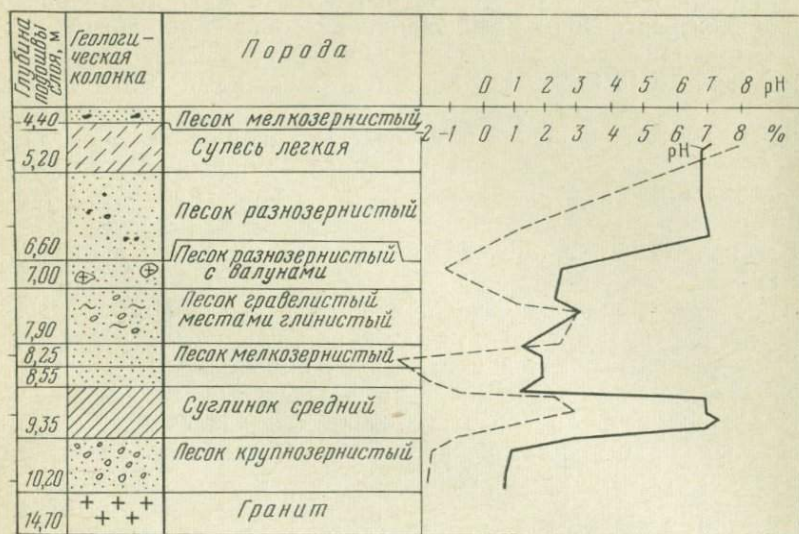


Рис. 53. Колонка контрольной скважины с эпюрой кислотности (в %) и рН поровых растворов

Изложенная методика опробования контрольных скважин позволяет установить эффективность процесса выщелачивания, выяснить причины неполного извлечения и решить вопрос о целесообразности продолжения выщелачивания или о мерах по его интенсификации.

Аналогичны задачи контрольного бурения скважин на месторождениях серы, обрабатываемых методом подземной выплавки. Так, материалы бурения на Язовском месторождении позволили выявить основные закономерности формирования зон плавления, установить приуроченность выплавленных зон к верхней части залежи, наличие непроницаемой для теплоносителя зоны серонасыщения на контакте выплавленных зон с неизменной рудой и т. д.

#### § 4. Гидрогеологические исследования эксплуатационных скважин \*

В эксплуатационной скважине проводятся гидрогеологические работы, преследующие две цели: проверку технического состояния и определение гидрогеологических параметров пласта и призабойной зоны. Наиболее простым методом исследований являются откачки с определением водопроводимости по кривой восстановления дебита.

Подготовительные работы часто ведутся в непосредственной близости от действующих участков. Поэтому их влияние может исказить результаты опытных работ. Кроме того, при наличии избыточного напора скважины изливают, что позволяет проводить определение водопроводимости путем опытных выпусков.

Рассмотрим несколько возможных вариантов опытов для определения водопроводимости. Допустим, на участке уже действуют  $n$  нагнетательных и разгрузочных скважин. Отметка напора в скважине, подлежащей исследованию, превышает поверхность земли. Положение напора определяется суммой влияния всех работающих скважин:

$$S_1 = \frac{1}{2\pi km} \sum_{i=1}^n \pm Q_i \ln r_i, \quad (VI.2)$$

где  $Q_i$  — расход каждой из скважин;  $r_i$  — расстояние от исследуемой до каждой из действующих скважин.

После начала выпуска воды из исследуемой скважины положение уровня изменится вследствие влияния этой скважины:

$$S_2 = \frac{1}{2\pi km} \left[ \sum_{i=1}^n \pm Q'_i \ln r_i - Q_0 \ln r_0 \right], \quad (VI.3)$$

где  $Q_0$  и  $r_0$  — дебит и радиус исследуемой скважины;  $Q'_i$  — расход каждой скважины после выпуска воды из исследуемой.

\* Раздел написан совместно с Т. Ф. Новиковой.

Так как суммы расходов откачки и нагнетания равны, то выпуск из исследуемой скважины приведет к изменению расходов, причем сумма этих изменений будет равна дебиту самоизлива. Поэтому

$$\Delta S = \frac{1}{2\pi km} \left( - \sum_{i=1}^n \Delta Q_i \ln r_i + Q_0 \ln r_0 \right). \quad (VI.4)$$

Отсюда

$$km = \frac{0,366}{\Delta S} \left( - \sum_{i=1}^n \Delta Q_i \lg r_i + Q_0 \lg r_0 \right). \quad (VI.5)$$

В этой формуле  $\Delta S$  представляет собой избыточный напор на устье скважины до начала выпуска;  $\Delta Q$  — изменение дебита действующих скважин под влиянием опытного выпуска.

Пример расчета. До включения новой скважины дебиты ближайших изливающихся скважин составляли: соответственно 5; 4; 3 м<sup>3</sup>/ч.; рис. 54.

После включения новая скважина изливает с дебитом  $Q_0=3$  м<sup>3</sup>/ч. Избыточный напор на устье  $\Delta S$  составляет 15 м.

Дебиты ближайших самоизливающихся скважин уменьшились и стали составлять соответственно 4; 3; 2 м<sup>3</sup>/ч. При этом  $\Delta Q_1=\Delta Q_2=-\Delta Q_3=1$  м<sup>3</sup>/ч. Радиус скважины  $r_0=0,05$  м. Расстояния от новой скважины до каждой действующей соответственно  $r_1=45$  м;  $r_2=45$  м;  $r_3=70$  м. Водопроницаемость для новой скважины составляет:

$$km = \frac{0,366}{\Delta S} (Q_0 \lg r_0 - \Delta Q_1 \lg r_1 - \Delta Q_2 \lg r_2 - \Delta Q_3 \lg r_3). \quad (VI.6)$$

Подставляя значения, получим  $km$ , равное 5,45 м<sup>2</sup>/сут.

Аналогичным путем можно провести определение водопроницаемости и в том случае, если скважина не изливает, но изливают скважины, расположенные на небольшом от нее расстоянии. Тогда закрытие одной или двух соседних скважин вызовет перераспределение напоров, повышение уровня в исследуемой скважине и излив воды из нее. Данные об изменении дебитов и напора в исследуемой скважине используют для расчета водопроницаемости пласта. При наличии границ водоносного горизонта их влияние учитывают известным методом отражения [73].

В процессе эксплуатации происходит изменение гидродинамических параметров обрабатываемого участка. Это необходимо учитывать для того, чтобы по данным об этих изменениях судить о ходе технологического процесса. На участке подземной выплавки серы для этого применялась методика, широко используемая при исследовании нефтяных скважин [72] и основанная на закономерностях нестационарной фильтрации. Для этого закрывают задвижку на излива-

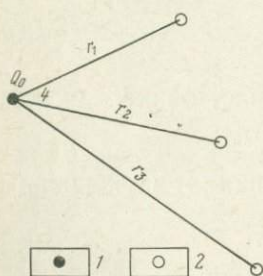


Рис. 54. Схема расчета водопроницаемости  
Скважины: 1 — исследуемая;  
2 — действующие

шей скважине и манометром замеряют давление до полного его восстановления. По результатам изменения напора строят график зависимости  $P$  от  $\lg t$  и производят расчеты водопроводимости графоаналитическим методом:

$$km = \mu^* \frac{0,18Q}{\lg \alpha}; \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{P_2 - P_1}{\lg t_2 - \lg t_1}, \quad (\text{VI.7})$$

где  $Q$  — дебит скважины до закрытия;  $P_1, P_2$  — напоры (в м), соответствующие на прямолинейном участке графика времени  $t_1$  и  $t_2$ ,  $\mu^*$  — поправка на вязкость в зависимости от температуры.

Для примера проведем расчет водопроводимости по скв. 39в участка ПВС Язовского месторождения.

Скв. 39в в момент проведения опыта изливала с дебитом 7,2 м<sup>3</sup>/ч. Температура воды 52°С. Поправка на вязкость в зависимости от температуры составляет 0,5561.

Данные восстановления напора после закрытия этой скважины приведены в табл. 16.

По результатам замера давления строим график (рис. 55) и производим расчет.

Наблюдения за восстановлением давления можно проводить и по серодобычным скважинам, прикрывая задвижку и ограничивая расход нагнетаемого теплоносителя. Систематический контроль за изменением параметров пласта по серодобычным и водоотливным скважинам дает представление о движении теплоносителя и развитии зоны плавления.

Особенно хорошие результаты достигаются в том случае, если для записи кривой восстановления давления используются автоматические самопишущие приборы. Такие работы, прове-

Таблица 16

Номера точки замера	$t$ , мин	$\lg t$	$P$ , м	Номера точки замера	$t$ , мин	$\lg t$	$P$ , м
1	0,25	0,60	3,0	12	11	1,04	7,3
2	0,75	0,12	4,0	13	12	1,08	7,5
3	2	0,30	5,0	14	13	1,11	7,6
4	3	0,48	5,4	15	14	1,15	7,7
5	4	0,60	5,8	16	15	1,18	7,8
6	5	0,70	6,1	17	16	1,20	7,9
7	6	0,78	6,5	18	17	1,23	8,0
8	7	0,84	6,7	19	18	1,25	7,0
9	8	0,90	6,9	20	44	1,64	9,0
10	9	0,95	7,1	21	45	1,65	9,1
11	10	1,00	7,2	22	46	1,66	9,2
				23	80	1,90	9,2

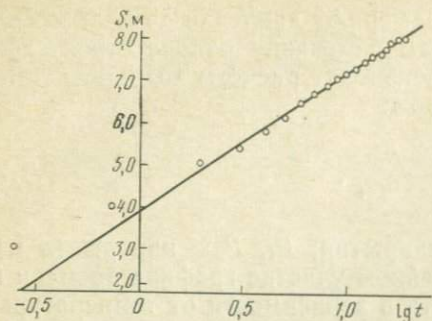


Рис. 55. График восстановления напора в скв. 39в

Датчик давления МЭД должен быть установлен после задвижки, перекрывающей подачу теплоносителя в скважину.

Включатель прибора в обычном состоянии должен находиться в положении «измерение». При этом прибор работает как обычный показывающий манометр. Перед проведением гидропрослушивания переключатель переводится в положение «запись». На ленте необходимо указать дату и время записи, а также расход подаваемого в скважину теплоносителя. Затем задвижка резко перекрывается и прибор записывает изменение давления на устье скважины. Запись целесообразно проводить в период откачки серы, начиная с отстоя.

Для определения гидравлической связи между скважинами необходимо подсоединить прибор к одной из скважин и, закрыв ее, дождаться стабилизации давления (5—10 мин). Поочередно открывая (или закрывая) соседние скважины, получаем запись понижения (или повышения) давления. По величине изменения давления можно судить о степени гидравлической связи, а по времени от момента закрытия скважины до соответствующего импульса — о характере связи.

Проверка технического состояния скважин способом гидропрослушивания возможна по скважинам, уровень воды в которых находится выше поверхности земли. Для этого проводится ступенчатый выпуск воды из скважины и устанавливается характер зависимости расхода от давления. При удовлетворительном техническом состоянии скважин эта зависимость имеет вид прямой линии, так как гидравлическое сопротивление колонн невелико. Если же скважина забита механическими осадками и продуктами коррозии, зависимость приобретает форму параболы.

денные на Язовском месторождении, позволили установить высокую информативность гидропрослушивания и рекомендовать следующую методику исследований.

Манометр типа МЭД тарируется для измерения давлений в диапазоне 0—1,6 МПа. Скорость протяжки ленты устанавливается максимальная—360 мм/ч, что обеспечивает необходимую разрешающую способность.

## § 5. Сбор и обработка технологической информации

Чтобы осуществить контроль и регулирование технологического процесса, на рудниках ведут систематическую регистрацию основных параметров и наблюдения за уровнем, температурным и гидрохимическим режимом на обрабатываемом участке и за его пределами.

К технологическим параметрам относятся расход и концентрация рабочего агента, подаваемого в скважину, дебит откачиваемого из каждой скважины продуктивного раствора и отработанного рабочего агента, концентрация полезных компонентов и рабочих агентов в откачиваемых флюидах. Указанные параметры регистрируют обычно непрерывно или же периодически с небольшими интервалами. Кроме того, ведут режимные наблюдения по специальным или же временно бездействующим скважинам, расположенным на участке добычи и за его пределами. На основании записей в первичных журналах составляют сводные суточные, декадные, месячные, квартальные и годовые отчетные формы.

Затем ведут графическую обработку информации, в частности, строят графики подачи рабочих агентов и добычи продукции во времени, температурные, гидрохимические и др.

Такие графики позволяют наглядно видеть всю историю работы каждой скважины (рис. 56). Для обобщения этих данных составляют гидродинамические карты.

Для примера приведем методику составления таких карт на участках подземной выплавки серы. Исходными данными для составления гидро-термодинамических (ГТД) карт являются: замеры давлений на устье серодобычных скважин и отметок уровня воды в водоотливных и наблюдательных скважинах,

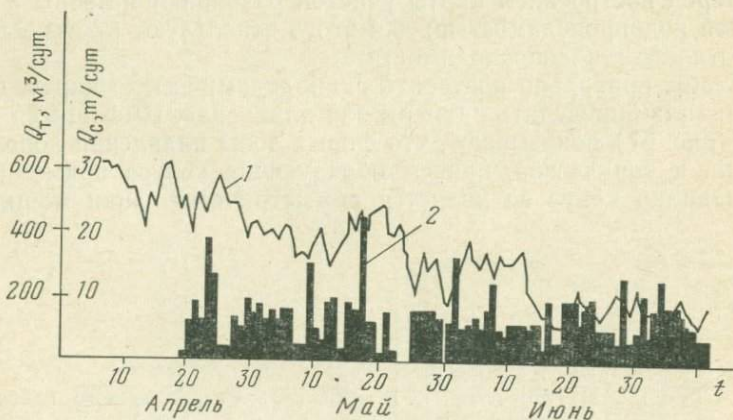


Рис. 56. График работы серодобычной скважины  
1 — вода; 2 — сера

замеры расходов теплоносителя и дебитов изливающихся скважин, данные о водопроницаемости по результатам испытаний скважин в период подготовки и описания керна, данные о добыче серы из каждой скважины, термометрические данные, результаты химического опробования.

По результатам замеров давлений, уровней и температур вычисляют приведенные напоры по каждой скважине с использованием следующих формул:

для серодобычных скважин

$$H = P + A - L(1 - \rho); \quad (VI.8)$$

для изливающихся водоотливных скважин

$$H = A - L(1 - \rho); \quad (VI.9)$$

для закрытых водоотливных скважин с избыточным напором над устьем

$$H = P + A - L(1 - \rho); \quad (VI.10)$$

для скважин с уровнем ниже устья

$$H = A - h - L(1 - \rho), \quad (VI.11)$$

где  $P$  — напор на устье;  $A$  — абс. отметка уровня излива или точка замера давления;  $L$  — глубина от устья до кровли пласта;  $\rho$  — относительная плотность теплоносителя или пластовой воды, зависящая от температуры.

Температура теплоносителя составляет  $160^\circ\text{C}$ , относительная его плотность — 0,9. Температура воды в изливающихся скважинах замеряется на устье. В неизливающихся скважинах замер температуры проводят с помощью каротажной станции, электротермометром. Расходы теплоносителя определяют по показаниям счетчика за прошедшие сутки.

Перед построением карты участок разбивают на зоны с различной водопроницаемостью; для этого используют карты макропустотности и водопроницаемости.

Чтобы правильно построить гидродинамическую карту, нужно сначала определить размеры зон плавления. Имеющиеся данные (рис. 57) показывают, что форма зоны плавления довольно близка к конической, причем образующие конуса прямолинейны. Однако конус не является симметричным. Зная мощность

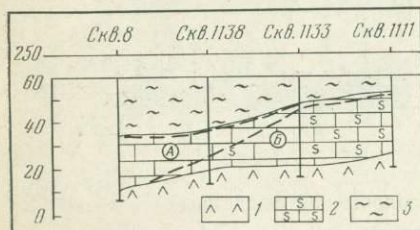


Рис. 57. Разрез по зоне плавления скв. 8д.

$A$  — выплавленная зона;  $B$  — зона неизменных руд; 1 — гипс; 2 — серная руда; 3 — покрывающие породы

и серосодержание, можно рассчитать по количеству добытой серы размеры конуса плавления.

При построении карт учитывалось, что линии напоров и тока на границах участков различной проницаемости преломляются, причем первые стремятся обойти высокопроницаемые участки, а вторые — пройти через них. В результате в зонах плавления линии тока сгущаются, а линии напора — разреживаются. По мере приближения к водоотливным скважинам линии напора сгущаются в соответствии с логарифмическим законом. После построения изопьез еще раз уточняют положение линий тока.

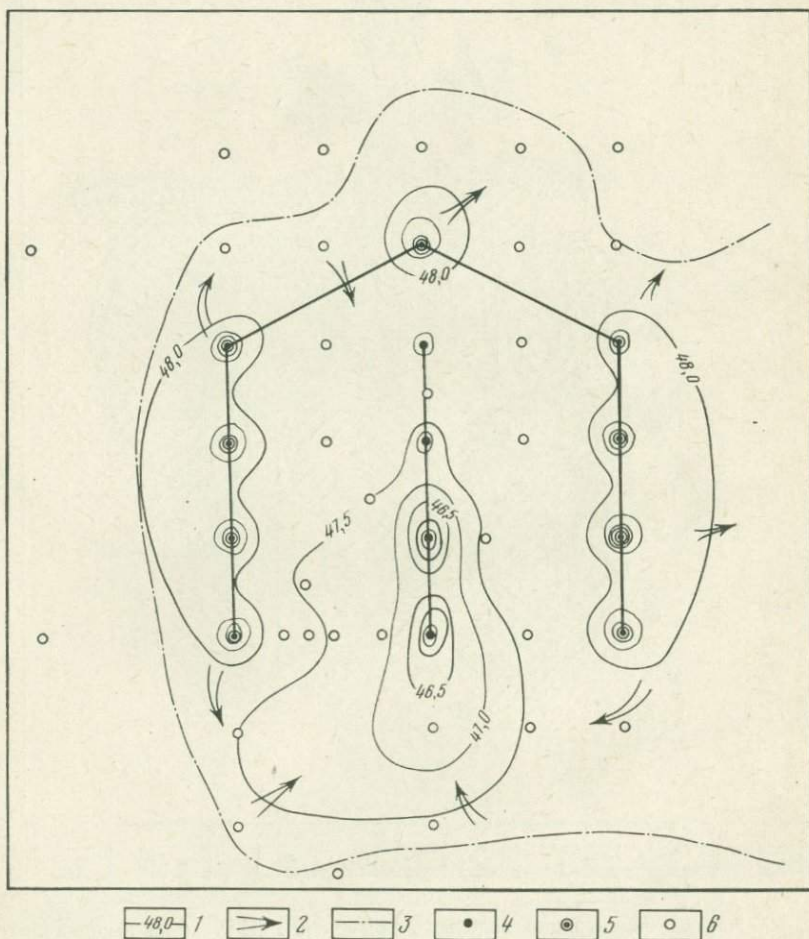


Рис. 58. Карта гидрогипс участка выщелачивания.

1 — гидрогипсы; 2 — направление фильтрации; 3 — ореол кислых растворов; 4—6 — скважины (4 — дренажные, 5 — нагнетательные, 6 — наблюдательные)

Кроме изобар, линий тока и зон плавления, на термогидродинамические карты наносят изотермы. При построении изотерм следует учитывать, что, поскольку теплоноситель находится в системе вода — жидкая сера — твердая сера, его температура у границы зоны плавления не превышает точки плавления серы (около  $119^{\circ}\text{C}$ ). Температурные и гидрохимические данные сопоставляют с гидродинамической сеткой и наносят изотермы, соответствующие границе вытеснения пластовых вод ( $16-20^{\circ}\text{C}$ )

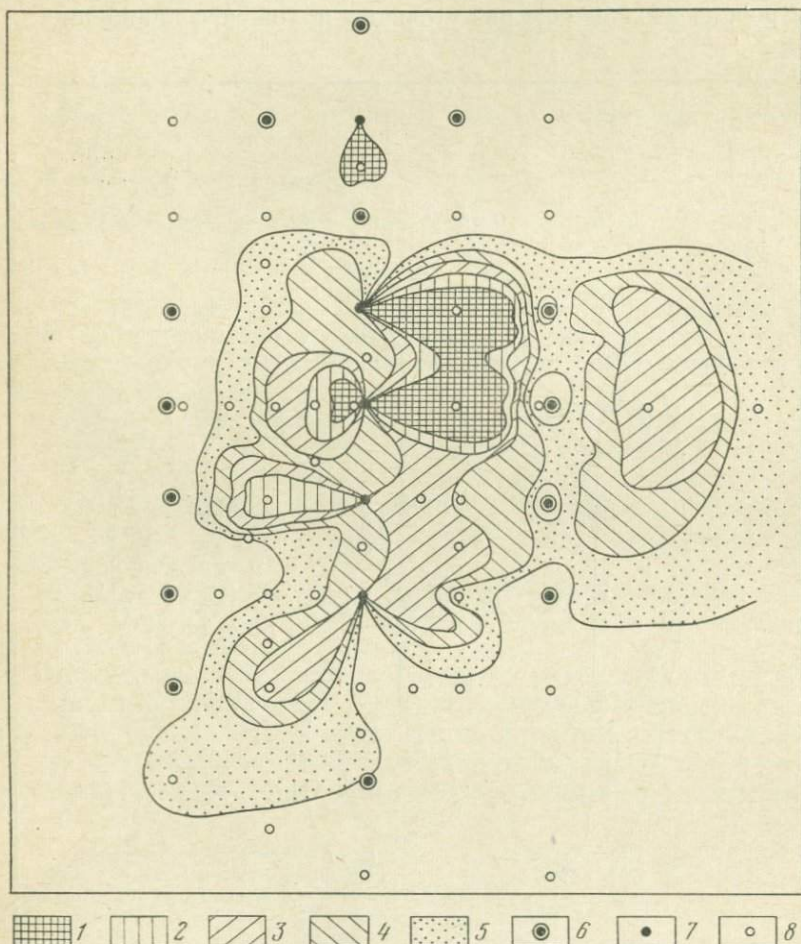


Рис. 59. Карта концентраций полезного компонента на участке выщелачивания.

Превышение концентрации над фоновой: 1 — более чем в 200 раз; 2 — от 100 до 200; 3 — от 50 до 100, 4 — от 20 до 50; 5 — от 20 до 10; 6—8 — скважины (6 — нагнетательные, 7 — дренажные, 8 — наблюдательные)

и контуру распространения теплоносителя ( $115-120^{\circ}\text{C}$ ). Наконец, еще раз уточняют положение зон плавления с учетом направления и интенсивности движения теплоносителя. Образец карты приводится на рис. 43.

Аналогично строят гидродинамические и гидрохимические карты при подземном выщелачивании металлов из проницаемых руд. Исходными данными здесь, кроме гидродинамических параметров пласта и режима подачи и откачки растворов, служат

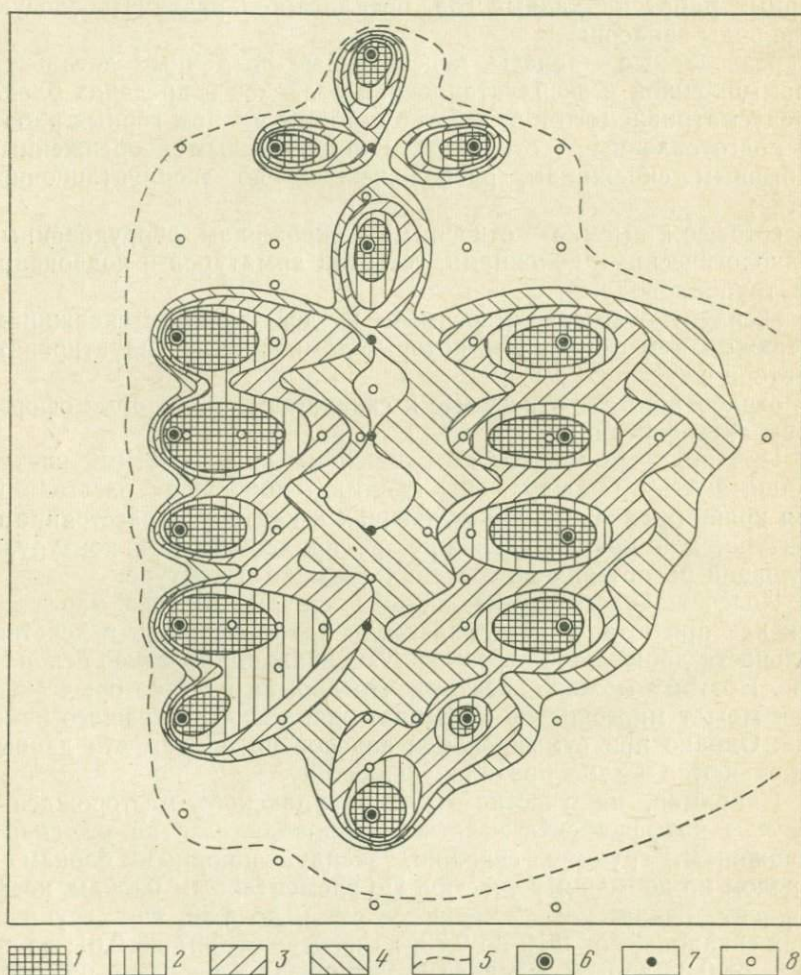


Рис. 60. Карта концентраций кислоты (в г/л) на участке выщелачивания.  
 1 —  $>20$ ; 2 — 10—20; 3 — 5—10; 4 — 1—5; 5 — граница ореола; 6—8 — скважины (6 — нагнетательные, 7 — дренажные, 8 — наблюдательные)

замеры концентрации рабочих и продуктивных флюидов. На рис. 58, 59, 60 приведены карты, полученные в результате проведения опытных работ.

## § 6. Учет движения запасов

Одной из основных задач геологической службы является постоянный учет запасов обрабатываемого месторождения. Оперативный учет запасов производится ежеквартально и ежегодно.

В пределах блока, обработка которого предусмотрена планом горных работ на данный год, предлагается различать следующие виды запасов:

разведанные — запасы, подсчитанные по данным детальной, промышленной и эксплуатационной разведок в пределах блока, предусматриваемого к обработке годовым планом горных работ;

подготовленные — относимые к пробуренным и обсаженным добычным скважинам, расположенным по эксплуатационной сетке;

готовые к выемке — относимые к скважинам, оборудованным технологическими колоннами, устьевой арматурой и подводящими трубопроводами;

эксплуатируемые — относимые к действующим скважинам, а также к тем скважинам, которые намечается эксплуатировать повторно;

отработанные — относимые к скважинам, на которые оформлены акты списания.

При подсчете запасов по скважинам за подсчетный контур принимаются: между скважинами — половина расстояния; для крайних скважин, примыкающих к контуру, — расстояние до контура, для крайних скважин, не прилегающих к контуру, — половина расстояния до соседних скважин в контуре.

Подсчет запасов по скважинам носит формальный характер, так как при этом не учитывается, с какой площади в действительности добывается через данную скважину полезное ископаемое. Поэтому может оказаться, что добыча из некоторых скважин может многократно превышать запасы «ближайшего района». Однако при суммировании запасов по блокам эти данные усредняются и дают правильную картину.

Например, на участке ПВС Гаурдакского месторождения расчеты коэффициента извлечения проводились\* по отдельным скважинам, группам скважин, эксплуатационным блокам и в целом по добычному участку. По элементарным блокам, коэффициент извлечения изменяется от 0 до 4,58, для групп из трех скважин — от 0,19 до 0,73, из пяти — от 0,27 до 0,61; из семи — от 0,33 до 0,57. Средний коэффициент извлечения по блоку

\* Расчеты проведены Г. Д. Филенко.

№ 2 составил 0,52. Аналогичные расчеты проведены по другим блокам.

Для оценки влияния морфологии рудных тел на коэффициент извлечения на участке были выделены четыре типа рудных тел: I — куполообразные, II — трубообразные, III — пластообразные и линзовидные, приуроченные к тектоническим нарушениям малых амплитуд, IV — тела, расположенные на удалении от тектонических нарушений. По каждому типу проведены подсчеты. Наибольшее (58%) извлечение достигается в куполообразных залежах, наименьшее (36%) — в пластообразных IV типа.

Очень заметно различие коэффициента извлечения по верхней и нижней залежам (по верхней он составляет в среднем 52%, а по нижней 32% при колебаниях от 25 до 50%).

ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ  
И ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА

---

§ 1. Влияние добычи  
полезных ископаемых  
на окружающую среду\*

Известно, какой громадный ущерб природе наносят «хирургические» методы добычи полезных ископаемых, в особенности открытый. По сравнению с ними геотехнологические методы — это то же, что и терапия в медицине. Продолжая эту аналогию, можно сказать, что и при геотехнологических методах возможны побочные явления и даже отравления, способные причинить вред «здоровью» природы. К таким явлениям относятся: деформации горного массива над выработанными пространствами; загрязнение поверхностных и подземных вод отработанными реагентами и побочными продуктами; загрязнение атмосферы газами.

Следует сразу сказать, что перечисленные явления вовсе не неизбежны. В подавляющем большинстве случаев они могут быть устранены или сведены к безопасному минимуму. Но для этого следует их изучать и учитывать при определении параметров технологии.

Охрана окружающей среды может быть интерпретирована как система контроля воздействий на объекты среды и регулирования уровня качества среды в пределах допустимых нагрузок. Позиция контроля включает определение характера выбросов загрязнителей во все среды, миграцию, превращение и накопление загрязнителей. Данные контроля служат основой для выработки эффективных мер по управлению качеством среды, которая может заключаться в изменении технологии, направленной на снижение или ликвидацию вредного воздействия.

В самой сущности геотехнологических методов заключено требование охраны среды. Добыча через скважины позволяет исключить отвалы, а последующая рекультивация — сохранить пахотные земли. Однако даже коренное изменение технологии добычи не исключает проблемы регулирования качества среды, а лишь изменяет характер и уровень воздействий на окружающую среду. Поэтому остаются вопросы контроля и регулирова-

---

\* Данный раздел составлен при участии Л. И. Курицыной.

ния качества среды, которые заключаются в следующем: 1) каковы характер и концентрация вредных выбросов; 2) какой уровень воздействия приемлем; 3) каким образом можно достичь и сохранить его.

Вопрос контроля качества среды включает прежде всего понятие допустимого уровня воздействия вредных веществ, т. е. предельно допустимой концентрации этих веществ в объектах внешней среды, при воздействии которой не возникает изменений состояния здоровья людей, выходящих за пределы приспособительных физиологических реакций, и нарушения восстановительной способности природной системы.

Вопросы регулирования качества среды. В общемировой проблеме охраны окружающей среды до настоящего времени нет единого критерия выбора мер по борьбе с загрязнением. В ряде стран мира ведутся попытки использовать в качестве критерия оценку затрат на мероприятия по улучшению качества среды и выгод, получаемых от сохранения чистоты среды. Однако разработка такого подхода встречает ряд трудностей. Затраты на улучшение качества среды можно оценить путем оценки мероприятий по уменьшению выбросов и изменению технологических процессов. Несравненно труднее оценить предотвращенный ущерб, так как многие из воздействий загрязнителей практически не могут быть измерены (здоровье людей, эстетика, моральный фактор и т. п.). В настоящее время нет методики всесторонней объективной оценки ущерба от загрязнения среды. Поэтому принятые решения в области управления окружающей средой базируются на оценке экономической стоимости и технологической рациональности различных вариантов регулирования для обеспечения требуемого качества среды.

Проблема регулирования качества среды включает вопросы обеспечения требуемого качества водной и воздушной сред, а также рационального использования недр и имеет ряд специфических особенностей, которые определяют подход к выбору метода регулирования.

С геолого-гидрогеологической точки зрения важнейшее значение имеет защита от загрязнения подземных и поверхностных вод, а также изучение и регулирование процессов сдвижения поверхности над выработанными пространствами.

В качестве примера рассмотрим вопрос охраны окружающей среды при ПВС. Технологія ПВС связана с различного рода выбросами, которые носят как направленный, так и неорганизованный характер. К первого рода выбросам относятся пластовые воды и отработанный теплоноситель, откачка которых из водоотливных скважин предусмотрена технологией.

Количество сточных вод направленного выброса при ПВС находится в прямой зависимости от водопотребления и обычно

Период	Единица измерения	pH	Ca <sup>2+</sup>
1973 г. (среднее)	мг/л мг-экв/л	7,2	233,8 11,69
Август 1974 г.	мг/л мг-экв/л	7,1	207,2 10,36
Июль — сентябрь 1975 г.	мг/л мг-экв/л		255,0 12,5
Февраль 1976 г.	мг/л мг-экв/л	6,8	372,4 18,62
Июнь 1976 г.	мг/л мг-экв/л	7,0	368,1 18,41

составляет около 100% от объема нагнетаемого в пласт теплоносителя. Возрастание мощности предприятия ПВС сопровождалось до настоящего времени лишь увеличением объема емкостей-накопителей откачиваемых вод и ростом потребления пресной воды на разбавление сбросов. Вместе с этим повышались капитальные затраты на сооружение объектов сбора и транспортировки воды. Однако в настоящее время ни действующие, ни тем более возрастающие проектные мощности не могут быть обеспечены необходимым количеством воды на разбавление сбросов. Это приводит к нарушению водно-солевого баланса рек, в которые осуществляется сброс, превышению концентрации в них нормируемых ингредиентов. В табл. 17 приведены данные солевого состава откачиваемых при ПВС вод в различные периоды отработки одного из месторождений. Эти воды характеризуются минерализацией 2,2—3,0 г/л при среднем содержании сульфатов 650 мг/л и хлоридов 550 мг/л.

Откачиваемые из пласта воды согласно предусмотренной проектом технологии должны подаваться на установку очистки сероводорода, затем в пруды-накопители, откуда после разбавления и обеспечения тем самым нормируемых показателей сброса сбрасываться в реки. Однако очистка от сероводорода предусмотренным методом подкисления с последующей отдувкой воздухом и окислением сероводорода нередко вызывает значительные трудности. Наиболее серьезными из них являются непостоянство содержания сероводорода в откачиваемых водах, а также необходимость использования дефицитных реагентов. Отсутствие закрытой системы водоотлива является причиной загрязнения воздуха сероводородом в районе серодобычного поля, прудов-накопителей и санитарной защитной зоны.

Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup> +Na <sup>+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Минерализация, мг/л
23,6 1,94	463,7 20,7	616,5 12,84	485,93 13,69	443,2 7,27	2266,75
20,88 1,74	423,6 18,39	494,9 10,31	427,5 12,06	495,32 8,12	2069,4
12,7 1,0	411,7 17,9	475,5 9,9	479,2 13,5	488,2 8,0	2122,3
20,30 1,69	353,7 15,38	683,7 14,24	556,4 15,67	352,8 5,78	2339,3
37,6 3,13	583,4 25,37	969,1 20,19	702,8 19,80	422,8 6,92	3083,1

Другим источником загрязнения воздуха являются неорганизованные выбросы. Точками выделения их служат грифоны, а также внутрикустовые скважины, изливающие горячий отработанный теплоноситель. Помимо загрязнения воздуха сероводородом и нарушения нормальных рабочих условий участка, это приводит к безвозвратным потерям большого количества тепла.

Неорганизованный водоотлив это, как правило, следствие несовершенства эксплуатации месторождения (нарушение порядка и режима ввода скважин в эксплуатацию, а также нарушение режима водоотлива).

Источником вредных выбросов являются также серодобычные скважины в период излива воды перед откачкой серы. Емкости сбора жидкой серы являются источниками загрязнения воздуха сероводородом, а также местом выбросов аэрозоля серы из-за попадания в них воды и разбрызгивания серы.

Данные опробования показывают, что наибольшее превышение предельно допустимых концентраций наблюдается по сероводороду в санитарной защитной зоне (в 2,5—7,5 раза) и по серной аэрозоли в период накопления серосборных емкостей (в 10 раз). При этом среднее содержание их существенно превышает установленные нормы (соответственно в 1,5—4,5 раза для указанных ингредиентов выбросов).

К вредным выбросам ПВС относятся также высокоминерализованные стоки, образующиеся при регенерации фильтров котельной и откачке продуктов реакции солянокислотной обработки при подготовке серодобычных скважин к эксплуатации. Эти рассолы сбрасываются совместно с откачиваемыми пластовыми водами.

Важным вопросом охраны среды при ПВС является рекультивация земель после отработки месторождения или отдельных его участков. Сохранение земель для последующего их использования является одним из важнейших преимуществ ПВС как метода разработки месторождения.

Наиболее распространенным приемом борьбы с загрязнением водоемов различными по происхождению, составу и концентрации сточными водами является их очистка. Этот путь, видимо, сохранит действенность и на далекую перспективу. Современные химические и физико-химические методы обработки сточных вод позволяют в значительной степени удалить загрязняющие их вещества. Однако в технологии ПВС, где объем стоков уже сегодня составляет более 1 млн. м<sup>3</sup> в год с существенным превышением концентраций нормируемых ингредиентов, очистка их до уровней, удовлетворяющих требованиям охраны среды, связана с высокими затратами.

Кроме того, при столь больших объемах стоков даже глубокая степень очистки обуславливает высокое абсолютное содержание остающихся после очистки загрязнений, возрастание их во времени и по мере увеличения производственной мощности. Наряду с этим необходимость глубокой очистки для удовлетворения нормам сброса вызывает проблему твердых отходов и является причиной загрязнения других объектов среды. Таким образом, очистка откачиваемых из пласта вод даже при условии обеспечения требований к сбросу их, как и применяемый в настоящее время способ разбавления стоков, результаты которого были показаны выше, не являются удовлетворительными решениями проблемы регулирования качества поверхностных вод при ПВС.

Наиболее радикальный путь — это максимальное использование откачиваемых вод в технологическом процессе выплавки серы, в котором формируется их состав. При этом следует исходить из того факта, что экономичнее подготовить воду для повторного использования, чем довести состав стоков до показателей, допускающих сброс их в водоем. Это объясняется не только исключением необходимости глубокой очистки стоков, экономией свежей воды, но и возможностью утилизировать тепло при повторном использовании вод, откачиваемых и изливающихся из пласта с  $t=40-90^{\circ}\text{C}$ .

Для производства теплоносителя из пластовых вод Язовского серного месторождения предложена замкнутая схема, включающая откачку пластовых вод из водоотливных скважин в общий коллектор, обработку их триполифосфатом натрия, паронинжекционный нагрев, основанный на непосредственном смешении пластовой воды с паром, транспортировку теплоносителя в серодобычную скважину.

## § 2. Проседание поверхности над выработанным пространством

Изучение горного давления и сдвижения пород при геотехнологических методах добычи полезных ископаемых требует учета ряда факторов, таких, как избирательность извлечения, влияние насыщающих пласт жидкостей, сложная динамика процесса извлечения во времени, изменение свойств руды и вмещающих пород под влиянием рабочих агентов и т. п. Поэтому готовые решения, найденные для условий отработки месторождений обычными способами, мало применимы для расчета напряжений и деформаций горных пород при геотехнологических методах. Кроме того, меняются требования к степени устойчивости горного массива, так как под землей отсутствуют люди и механизмы.

При разных способах добычи в рудной залежи в подвижное состояние переходит различное количество твердого вещества. Так, при выщелачивании радиоактивных и редких металлов пористость руды практически не изменяется, так как растворению подвержены лишь незначительные по содержанию минералы полезного ископаемого. Обработка руд с содержанием полезного компонента 15—20% и более сопровождается обычно разрушением структуры руды и ее уплотнением. Этот процесс во многом зависит от текстуры и структуры, а также от минерального и гранулометрического состава рудного скелета.

Руды прожилковые, гнездовые, вкрапленные с прочным скелетом могут сохранять целостность первоначальной структуры, в то время как землистые, дисперсные, брекчиевидные и другие разности полностью разрушаются. Следствием этого могут быть различные осложнения. Если над разрушившейся рудой залегают прочные породы, то в кровле рудного пласта образуется полость, а при пластичных покрывающих породах последние плавно оседают. Однако при этом может произойти нарушение цементных колец вокруг скважин, повреждение рабочих колонн и т. д.

В отличие от традиционных способов отработки, где определяющую роль играет давление горных пород на крепь и целики, обусловленное их массой, свойствами и формой выработок, при геотехнологических методах напряжения и деформации горного массива определяются сложным комплексом гравитационных, гидротермодинамических и физико-химических процессов. Это требует нового подхода к решению поставленной проблемы. Подобный подход впервые сформулирован Ю. П. Желтовым [41], а также В. А. Мироненко и В. М. Шестаковым [66], в работах которых сделана попытка связать проблему деформаций горных пород с фильтрацией насыщающих их жидкостей воедино, в основы гидрогеомеханики.

В общей постановке задача изучения проявлений горного давления сводится к определению напряжений и деформаций горной среды с учетом гравитационных, гидротермодинамических, поверхностных и молекулярных сил при условии, что свойства горной среды изменяются во времени и пространстве. Однако совершенно очевидно, что решение задачи в общем виде практически невозможно. Поэтому на данном этапе выделяется ряд частных задач, имеющих, с нашей точки зрения, наибольшее практическое значение.

К ним относятся: 1) расчеты устойчивости выработанных пространств; 2) определение устойчивости или динамики разрушения целиков; 3) прогноз характера сдвижения пород и поверхности над отработанным пространством; 4) исследование процессов деформации обрабатываемого рудного массива и вызываемых этой деформацией изменений в течении геотехнологического процесса и др.

Примером решения задачи о распределении напряжений в горном массиве с учетом влияния воды может служить уравнение Ю. П. Желтова для одиночной сферической камеры:

$$\sigma_r = q_r - \frac{(q_r - P_0)r_0^3}{r^3}; \quad \sigma_\tau = q_r + \frac{(q_r - P_0)r_0^3}{2r^3}, \quad (\text{VII.1})$$

где  $\sigma_r$  и  $\sigma_\tau$  — радиальное и касательное напряжение;  $q_r$  — горное давление, зависящее от массы вышележащих пород;  $P_0$  — давление жидкости в камере;  $r_0$  — радиус камеры;  $r$  — координата.

Из приведенной формулы видно, что, регулируя величину давления воды  $P_0$ , можно обеспечить сохранность выемочной камеры на любой глубине. Аналогичным образом решаются задачи для выработок другой формы. В частности, вертикальная составляющая напряжения  $\sigma_z$  в междукамерных целиках при подземном растворении каменной соли [88] системой камер радиусом  $r_0$  и высотой  $h$ , расположенных по квадратной сетке со стороной  $L$ , выражается формулой

$$\sigma_z = \frac{\gamma_1 H_0 L^2 - \pi r_0^2 (\gamma_3 H_0 + P)}{L^2 - \pi r_0^2}, \quad (\text{VII.2})$$

где  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$ ,  $\gamma_3$  — соответственно плотность пород кровли, соли и рассола;  $H_0$  — глубина до кровли камеры;  $P$  — избыточное давление рассола над устьем скважины.

Из этой формулы видно, что управление горным давлением в данном случае сводится к выбору оптимальных параметров  $L$ ,  $r$  и  $P$ .

При некоторых геотехнологических методах добычи полезных ископаемых условие устойчивости целиков необязательно, требуется только обеспечить безопасность ведения работ над выработанным пространством на поверхности. Примером может слу-

жить оценка возможной величины оседания песчаных целиков между камерами, образующимися при скважинной гидродобыче. Рассмотрим эту задачу для условий Кингисеппского месторождения фосфоритов. Рудное тело представляет собой слабосцементированный песок, мощность которого составляет 3 м.

Пески характеризуются коэффициентом сцепления 0,31 и углом внутреннего трения  $33^\circ$ . Над ними залегают известняки, мергели и суглинки мощностью 20 м. Уровень воды практически совпадает с поверхностью земли.

Принимаем для простоты, что выработки имеют полосообразную форму шириной  $2(x_2 - x_1)$  (рис. 61). Ширина целика равна  $2x_1$ . Сила давления налегающих пород на единицу длины целика определяется формулой

$$P = \frac{(\gamma_1 H_1 - \gamma_2 H_2) x_2}{x_1}, \quad (\text{VII.3})$$

где  $\gamma_1, \gamma_2$  — плотность пород и воды; остальные обозначения ясны из рисунка.

Так как давление нагрузки на целик распределяется неравномерно, вполне обосновано предположить, что края целиков обрушатся с образованием откосов под углом  $\alpha$  к горизонтالي.

Решение задачи об устойчивости откоса с пригрузкой, равной  $P_0$ , широко известно [94]. В. В. Соколовским составлены таблицы и графики для определения предельного давления из выражения

$$P_0 = \sigma_z C + C \operatorname{tg} \varphi, \quad (\text{VII.4})$$

где  $\operatorname{tg} \varphi$  и  $C$  — угол трения и сцепление;  $\sigma_z$  — безразмерный коэффициент, определяемый по таблицам, в зависимости от углов трения и откоса.

Для принятых условий  $\sigma_z = 15,7$  и  $P_0 = 0,48$  МПа. Если  $P > P_0$ , целик будет раздаваться в стороны до тех пор пока площадь опоры не увеличится так, что давление станет меньше предельного. Необходимую ширину горизонтальной площадки  $x_3$ , удерживающей давление налегающих пород, находим из выражения

$$x_3 = \frac{(\gamma_1 H_1 - \gamma_2 H_2) x_2}{P_0}. \quad (\text{VII.5})$$

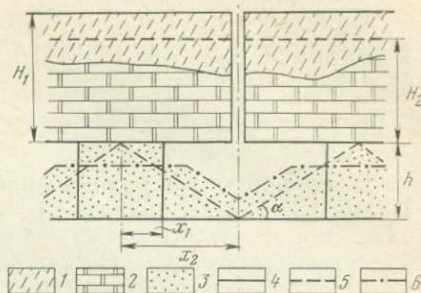


Рис. 61. Схема к расчету сдвижения покрывающей толщи при СГД.  
1 — супеси; 2 — доломиты; 3 — песок; 4—6 — последовательное изменение формы целика

Принимая материал целика несжимаемым, можем найти высоту его после оседания из условия равенства объемов до и после раздавливания.

$$hx_1 = \frac{x_3 + (x_3 + h'C \operatorname{tg} \alpha)}{2} h' \quad (\text{VII.6})$$

Если основание раздавленного целика больше суммы полуширины камеры и целика, то

$$hx_1 = h'x_2 - \frac{(x_2 - x_3) \operatorname{tg} \alpha}{2} \quad (\text{VII.7})$$

Из этих уравнений находим величину оседания при различных параметрах выемки.

Для условий с заданными свойствами руды, глубиной залегания и напором воды  $x_3 = Mx_2$ , где  $M$  — безразмерный множитель, определяемый из выражения (VII.5). Для нашего примера  $M = 0,58$ .

Учитывая, что  $x_2 = a/\eta$  и  $x_1 = (a/\eta) - a$ , где  $a$  — ширина выработки;  $\eta$  — коэффициент извлечения, получаем следующие выражения для вычисления осадки в зависимости от  $a$  и  $\eta$  при ширине целика по низу, меньшей  $2x_2$ :

$$h' = -\frac{Ma}{\eta C \operatorname{tg} \alpha} + \sqrt{\frac{M^2 a^2}{\eta^2 C \operatorname{tg} \alpha} - \frac{2ah}{C \operatorname{tg} \alpha} \left(\frac{1}{\eta} - 1\right)} \quad (\text{VII.8})$$

и при ширине по низу, больше  $2x_2$ :

$$h' = h(1 - \eta) + \frac{a}{2\eta} (1 - M)^2 \operatorname{tg} \alpha \quad (\text{VII.9})$$

Числовые расчеты для приведенного примера дают следующие величины высоты целика в зависимости от степени извлечения:

Степень извлечения . . . . .	0,22	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0
Высота целика, м . . . . .	3	2,7	2,3	1,9	1,6	0,8	0
Оседание, м . . . . .	0	0,3	0,7	1,1	1,4	2,2	3

Полученные данные хорошо аппроксимируются уравнением

$$h - h' = 3,84\eta - 0,85 \quad (\text{VII.10})$$

При извлечении 60% максимальная величина проседания составит 1,4 м. Фактически это проседание будет меньше, так как произойдет некоторое разрыхление покрывающих пород. При высоком уровне грунтовых вод оседание может привести к заболачиванию и затоплению территории, для борьбы с которыми потребуются определенные мелиоративные мероприятия.

Если залежи руд имеют большую мощность, оседания пород над выработанным пространством могут достигать значительных размеров. Так, например, на территории Карфагенского рудоупромысла на поверхности образовалась серия воронок глубиной до 10 м и диаметром до 30 м, напоминающих карстовые провалы.

В некоторых случаях оседание может создать затруднения для ведения добычных работ. В частности, авторами предложена отработка Яковлевского железорудного месторождения КМА методом скважинной гидродобычи с твердеющей закладкой камер. Это позволит избежать оседания и одновременно обеспечит высокую степень извлечения.

Очень сложные и интересные задачи возникают при подземной выплавке серы. Из опыта ПНР известно, что обычно массив выплавленных руд разрушается, что сопровождается плавным прогибанием поверхности земли. В то же время на одном из участков ПВС месторождения серы произошло поднятие поверхности на высоту до 2,6 м, что вызвало ряд технических осложнений.

Очевидно, что основными факторами, обуславливающими деформации покрывающей толщи при подземной выплавке серы, являются: 1) уменьшение прочности рудного пласта; 2) повышение температуры пласта и покрывающих пород и 3) давление теплоносителя. Как правило, выплавленные руды полностью разрушаются под массой вышележащих пород и влиянием температурных напряжений с образованием обломочной породы, имеющей пористость 20—25%. Объемное содержание серы в рудах составляет обычно 30—35%. Отсюда видно, что возможная величина осадки составляет 10—15% от мощности зоны плавления. Поднятие пород может происходить под влиянием температурного расширения пород и давления теплоносителя, причем оба фактора действуют совместно.

Давление теплоносителя на устьях серодобычных скважин в период эксплуатации участка ПВС составляло 1,2—1,5 МПа. Глубина залегания серных руд 80—90 м; покрывающая толща представлена песчаниками мощностью до 15 м, над которыми залегает однородная толща мергелистых глин. Средняя объемная масса покрывающих пород составляет 2 г/см<sup>3</sup>.

С учетом влияния воды (см. гл. II) вертикальная составляющая напряжения на уровне кровли пласта (глубина 80 м) отрицательна (растягивающее напряжение) и достигает от —0,6 до —0,9 МПа. Таким образом, на участке существовали все условия для образования трещин гидроразрыва на контакте известняков с покрывающими породами. Простейшие опыты показывают, что песчаники быстро размокают в горячей воде и образовавшиеся трещины не могут быть устойчивыми. Их поверхности дезинтегрируются, вследствие чего песчаники теряют водоупорные свойства. В результате растягивающие напряжения в породе возрастают, а их максимум перемещается выше.

Образование водопроводящих каналов в песчаниках было установлено термометрией. При бурении контрольных скважин на участке выявлено, что песчаники местами приобрели текучую консистенцию.

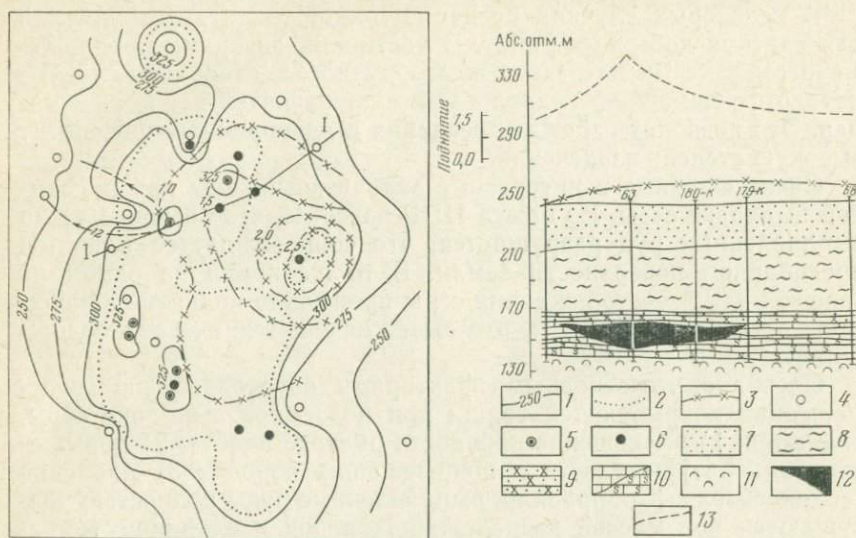


Рис. 62. Гидродинамическая карта и разрез по участку ПВС в момент максимального поднятия поверхности.

1 — изопьезы; 2 — границы зоны плавления; 3 — изолинии поднятия поверхности; 4 — скважины (4 — водоотливные, 5 — серодобычные, 6 — контрольно-разведочные); 7 — песок; 8 — глинисто-мергельная толща; 9 — песчаник; 10 — серная руда; 11 — ангидрит; 12 — зона выплавки; 13 — пьезометрическая поверхность

Наглядным подтверждением связи поднятия поверхности с давлением теплоносителя служат приведенные на рис. 62 гидротермодинамическая карта и разрез, на которых показано распределение давлений в пласте и величина поднятия поверхности. Интересно, что максимальная величина поднятия отмечается в районе, где еще отсутствует развитая зона плавления, оседание пород в которой могло бы в определенной степени компенсировать поднятие.

Важнейшими направлениями исследования в области изучения закономерностей деформации массивов горных пород при геотехнологических методах добычи полезных ископаемых являются: а) изучение изменений структуры и свойств руд и вмещающих пород в процессе эксплуатации; б) исследование распределения скоростей движения, давлений и температур насыщающих пласт жидкостей в процессе и после отработки; в) решение задач о распределении напряжений в горном массиве с учетом влияния заполняющих выработанное пространство рабочих и продуктивных флюидов и расчет результирующих деформаций; г) выбор способов управления горным давлением и определение оптимальных режимов и систем эксплуатации месторождений, в том числе с закладкой выработанных пространств.

### § 3. Баланс рабочих и продуктивных флюидов

Соотношение между подачей в недра рабочих агентов и откачкой продуктов их взаимодействия с рудами — одно из основных условий, определяющих возможность загрязнения атмосферы, поверхностных и подземных вод. Основными составляющими баланса являются: приход (рабочие агенты + подземные воды); расход (извлекаемые компоненты + отработанные рабочие агенты + полезный продукт + подземные воды). Проиллюстрируем составляющие баланса на конкретных примерах.

**Скважинная гидродобыча.** Процесс изотермический, сжимаемостью воды можно пренебречь. Технологический процесс заключается в подаче энергетической воды в добычные камеры, где вода смешивается с рудой и в виде гидросмеси выдается на поверхность. На картах намыва происходит отстой, воду собирают и снова подают в гидромонитор (рис. 63).

Очевидно, что расходы подаваемой и откачиваемой воды  $Q_B$  одинаковы, иначе неоткуда было бы взять воду для питания гидромонитора. Отсюда уравнение баланса будет иметь вид

$$\begin{aligned} Q_B + Q_{\text{подз}} &= Q_{\text{п}} + Q_B + Q_{\text{и}}; \\ Q_{\text{подз}} &= Q_{\text{п}} + Q_{\text{и}}, \end{aligned} \quad (\text{VII.11})$$

где  $Q_{\text{п}}$  — объемный расход песка;  $Q_{\text{подз}}$  — компенсирующий приток подземных вод;  $Q_{\text{и}}$  — испарение на карте намыва.

Таким образом, на участок для компенсации извлекаемых объемов твердого вещества должны поступать подземные воды с расходом, равным производительности добычного участка в объемном выражении, а также компенсирующие потери воды на испарение.

Приток подземных вод к камерам вызовет понижение уровня подземных вод, величину которого для одиночной камеры можно оценить по формуле Тейса, а для системы камер — по методу суперпозиции. Из баланса видно, что при оборотном водоснабжении СГД обеспечивается полная гарантия от загрязнения подземных вод, так как поток подземных вод всегда направлен в сторону добычного участка.

Проведенные на Кингисеппском участке СГД наблюдения показали, что химический состав подземных вод в процессе эксплуатации практически не изменяется, а уровень воды понижается на 1,5—2 м.

Подземное выщелачивание. При подземном

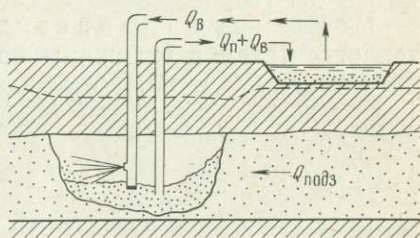


Рис. 63. Баланс воды при скважинной гидродобыче

выщелачивании урана (а попутно — молибдена и ванадия) полезные компоненты извлекают из растворов на ионообменных смолах. После этого в раствор добавляют необходимую дозу рабочих реагентов и снова направляют их в скважины [12, 13]. Баланс выглядит следующим образом:

$$Q_{\text{в}} + Q_{\text{реаг}} = Q_{\text{извл}} + Q_{\text{прод}} \pm Q_{\text{подз}}, \quad (\text{VII.12})$$

где  $Q_{\text{в}}$  — расход воды,  $Q_{\text{реаг}}$  — расход рабочих реагентов,  $Q_{\text{извл}}$  — объем извлекаемых из недр веществ;  $Q_{\text{прод}}$  — дебит откачиваемых растворов;  $Q_{\text{подз}}$  — приток или отток подземных вод.

Необходимое количество концентрированной кислоты для укрепления раствора рассчитывается по формуле

$$a = \frac{x}{\left(\frac{m}{n} - 1\right) \rho}, \quad (\text{VII.13})$$

где  $x$  — объем раствора до укрепления;  $m$  — концентрация кислоты, вес. %;  $n$  — концентрация раствора после укрепления. Техническая 75%-ная кислота имеет плотность 1,7 г/см<sup>3</sup>. Если для выщелачивания необходим 5%-ный раствор, то  $a = x/23,8$ . На 1 м<sup>3</sup> растворителя требуется добавить около 40 л концентрированной кислоты, что составляет 4% по объему. Объем веществ, переходящих в недрах из твердого состояния в раствор, пропорционален количеству подаваемого рабочего агента. При кислотном выщелачивании подавляющая часть кислоты расходуется на реакцию с карбонатами, прежде всего кальцитом. В 40 л концентрированной кислоты содержится 50 кг H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, которая прореагирует с 50 кг CaCO<sub>3</sub>. Плотность CaCO<sub>3</sub> составляет 2,7 г/см<sup>3</sup>, т. е. объем растворенного вещества равен 19 дм<sup>3</sup>.

Дебит откачиваемых растворов равен расходу раствора до его укрепления по условию. Так как  $Q_{\text{реаг}} > Q_{\text{извл}}$ , уравнение баланса принимает вид

$$Q_{\text{реаг}} = Q_{\text{извл}} - Q_{\text{подз}}. \quad (\text{VII.14})$$

Это означает, что в недра все время поступает некоторый избыточный объем; в приведенном примере он составляет около 20 л на 1 м<sup>3</sup> раствора.

Подземная выплавка серы. При выплавке серы теплоносителем в скважины подают воду температурой 160°С (плотность 0,9 г/см<sup>3</sup>); откачивают жидкую серу в количестве 1 т на каждые 15—20 м<sup>3</sup> теплоносителя. Отработанный теплоноситель свободно изливается через опережающие скважины; температура воды на изливе в среднем составляет 40°С. Уравнение баланса имеет вид

$$1,1Q_{\text{тепл}} = Q_{\text{серы}} + Q_{\text{отр}} \pm Q_{\text{подз}} + Q_{\text{раств}}, \quad (\text{VII.15})$$

где  $Q_{\text{тепл}}$  — расход теплоносителя;  $Q_{\text{серы}}$  — дебит серы;  $Q_{\text{отр}}$  — дебит водоотлива;  $Q_{\text{подз}}$  — отток теплоносителя за контур отра-

ботки;  $Q_{\text{раств}}$  — извлеченное вещество, растворенное теплоносителем;  $1,1$  — поправка на температуру.

Между составляющими баланса имеются следующие соотношения:

$$Q_{\text{серы}} = \frac{Q_{\text{тепл}}}{q}, \quad (\text{VII. 16})$$

где  $q$  — удельный расход теплоносителя, составляющий 25—50  $\text{м}^3/\text{м}^3$ .

$$Q_{\text{раств}} = Q_{\text{тепл}}c, \quad (\text{VII. 17})$$

где  $c$  — объемная концентрация растворимых в теплоносителе веществ, обычно близкая к  $1 \text{ см}^3/\text{л}$ .

Используя эти соотношения получаем

$$Q_{\text{тепл}} \left( 1,1 - \frac{1}{q} - c \right) = Q_{\text{отр}} + Q_{\text{подз}}. \quad (\text{VII. 18})$$

Выражение, заключенное в скобки, близко к единице, поэтому можно принять, что

$$Q_{\text{тепл}} \approx Q_{\text{отр}} + Q_{\text{подз}}. \quad (\text{VII. 19})$$

Соотношение между расходом изливающейся на поверхность воды  $Q_{\text{отр}}$  и частью воды, уходящей к региональным областям разгрузки, определяется гипсометрическими высотами областей местной и региональной разгрузки и фильтрационными свойствами рудовмещающего водоносного горизонта (см. гл. IV).

При выплавке в электрическом поле теплоноситель в скважины не подается, т. е. к участку эксплуатации постоянно поступают подземные воды в объеме, равном объему откачиваемой серы.

При подземном растворении процесс обычно происходит в камерах, изолированных от водоносных горизонтов целиками соли или водоупорными породами, что предотвращает утечки рассолов. Нарушение по каким-либо причинам герметичности камер ведет к утечкам, поскольку напор рассолов обычно значительно превышает естественные напоры подземных вод. Величина напора в камере может быть определена как сумма массы столба рассола и потерь напора при восходящем движении рассола в трубах.

При подземной газификации угля в очаге горения поддерживается давление, большее давления подземных вод, что предотвращает поступление последних в газогенератор. В результате вокруг участка газификации распространяется ореол загрязненных специфическими веществами подземных вод. Характеристика состава и скорости распространения ореолов приводится в работе В. И. Кононова [54] и др. Показано, что в области воздействия процесса ПГУ можно выделить зоны: а) циркулирующие парогазовой смеси; б) аномально нагретых вод; в) подземных вод с естественной температурой, но аномальным химическим составом.

При поступлении подземных вод в зону высоких температур образуется пароводяная смесь, насыщающаяся углекислотой, сернистым газом, атомарным водородом. Большая часть пара уходит вместе с газами в газоотводящие скважины, а около 30% поступает во вмещающие породы. При этом формируются воды, содержащие в больших количествах гипосульфит, гидросульфит, аммоний, ионы железа, алюминия, редкие элементы. Площадь ореола таких вод обычно невелика; они распространяются всего на несколько десятков метров от газогенератора, где постепенно сменяются водами с естественной температурой, но обогащенными углекислотой и фенолами.

Если процесс ПГУ осуществляется с осушением, то распространение загрязненных вод ограничивается контуром водопонижительных скважин, но возникает проблема сброса откачиваемой воды.

#### § 4. Потери рабочих и продуктивных флюидов в недрах

Возможность загрязнения подземных вод связана с потерями рабочих агентов и продуктов их реакции за контур отработки. Поэтому оценка потерь представляет интерес как с точки зрения охраны среды, так и с чисто экономических соображений. Из приведенных балансовых расчетов видно, что потери возникают в том случае, когда объем закачиваемых и образующихся в ходе процесса флюидов превышает объем откачки. Промежуточным является случай, когда соблюдается равенство закачки и откачки; этот случай является наиболее сложным и заслуживает более детального рассмотрения.

Расчет утечек представляет собой гидродинамическую задачу, которую необходимо рассматривать только в комплексе с расчетом эксплуатационных систем. Наиболее распространены на практике системы, состоящие из определенным образом расположенных скважин, из которых одни служат для подачи в недра рабочих агентов, а другие — для откачки продукционных флюидов или отработанных рабочих агентов. На скважинах задаются условия постоянного напора или расхода. Суммарный расход обычно постоянен и определяется производительностью установки по приготовлению рабочих агентов.

Изменение напоров в рудосодержащем однородном и неограниченном водоносном горизонте под влиянием работы нагнетательных и разгрузочных скважин описывается уравнениями, приведенными в главе IV.

При закономерном расположении скважин вычисление пьезометрических напоров легко осуществляется на цифровых ЭВМ, что позволяет построить гидродинамические сетки фильтрации.

Пример такой сетки для системы, состоящей из трех рядов скважин по пяти скважин в ряду, приведен на рис. 64. Из

анализа сетки видно, что часть жидкости из нагнетательных скважин уходит за контур отработки, причем из крайних скважин ряда потери достигают 25%. При увеличении длины рядов относительное количество потерь за контур уменьшается.

В период неустановившегося движения в самом начале работы системы скважин возникают потери вследствие формирования воронки депрессии. Их величина может быть вычислена путем определения объема депрессионной воронки. Если извест-

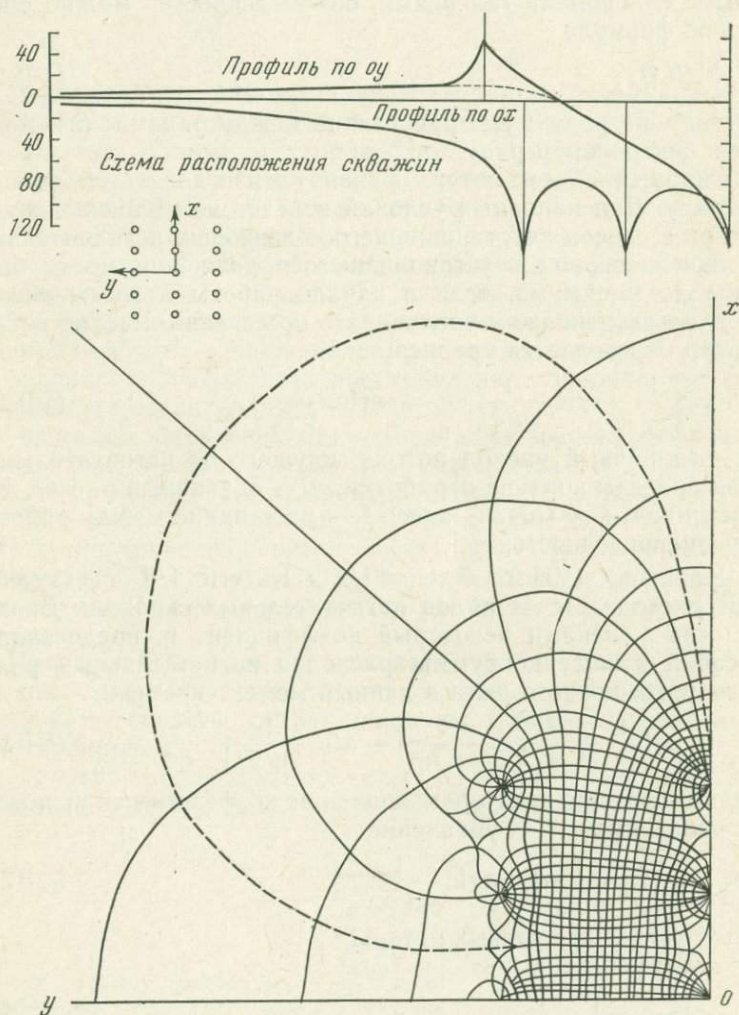


Рис. 64. Гидродинамическая сетка фильтрации при работе трех рядов скважин

на величина понижения уровня  $S(x, y)$ , то объем депрессии определяется двойным интегрированием по переменным  $x$  и  $y$ :

$$W = \iint_{xy} S(x, y) dx dy. \quad (\text{VII.20})$$

Интегрирование проще всего осуществляется численным методом, одновременно с вычислением величины  $S$ .

Для простейшей схемы, в которой два крайних ряда нагнетательных скважин и центральный ряд дренажных скважин заменяются сплошными галереями, объем депрессии можно определить по формуле

$$W = SLB, \quad (\text{VII.21})$$

где  $B$  — длина рядов;  $L$  — расстояние между рядами;  $S$  — понижение в центральном ряду.

Суммарный объем потерь равен произведению объема на водоотдачу. Для напорных условий вследствие малой водоотдачи потери в период неустановившегося движения незначительны.

Потери в период неустановившегося движения могут быть сведены до минимума, если в начале работы системы расход нагнетательных скважин увеличивать постепенно. Расход потерь за контур определяется уравнением

$$q = q_0 \left( \frac{1}{2} - \operatorname{erfc} \frac{1}{2\sqrt{F_0}} + \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \frac{1}{\sqrt{F_0}} \right), \quad (\text{VII.22})$$

где  $q$  — единичный расход потока, идущего от нагнетательного ряда за пределы контура отработки;  $q_0$  — единичный расход дренажного ряда;  $F_0 = (at)/L^2$ , здесь  $L$  — расстояние между рядами;  $a$  — уровеньпроводность.

В уравнении (VII.22) члены  $1/2$  и  $1/2 \operatorname{erfc} 1/\sqrt{F_0}$  характеризуют расход за счет рядов нагнетательных скважин. Введем перед этими членами некоторый коэффициент  $\eta$ , представляющий собой отношение суммы расходов нагнетательных рядов к расходу дренажного ряда в данный момент времени:

$$q = q_0 \left[ \eta \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \frac{1}{\sqrt{F_0}} \right) - \operatorname{erfc} \frac{1}{2\sqrt{F_0}} \right]. \quad (\text{VII.23})$$

Очевидно, что при некотором значении коэффициента  $\eta$  потери будут равны нулю, т. е. уравнение

$$\frac{\eta}{2} \left( 1 - \operatorname{erfc} \frac{1}{\sqrt{F_0}} \right) = \operatorname{erfc} \frac{1}{2\sqrt{F_0}} \quad (\text{VII.24})$$

является условием нулевых потерь.

Из этого уравнения

$$\eta = \frac{2 \operatorname{erfc} \frac{1}{2\sqrt{F_0}}}{1 + \operatorname{erfc} \frac{1}{\sqrt{F_0}}}. \quad (\text{VII.25})$$

Пользуясь этой формулой, рассчитаем значение коэффициента  $\eta$  в зависимости от времени, задаваясь следующими числовыми значениями:  $L=40$  м;  $a=450$  м<sup>3</sup>/сут. Результаты расчетов приводятся ниже.

$t$ , сут	$\eta$	Суммарный расход нагнетательных скважин, м <sup>3</sup> /ч
0,25	0	0
0,5	0,015	0,75
1,25	0,52	26,0
2,5	0,79	39,0
5,0	0,92	46,0
10,0	0,98	49,0
25,0	1,00	50,00

Изменение расхода наглядно показано на графике (рис. 65).

В период неустановившегося движения в системе не будет соблюдаться баланс растворов. Однако поскольку этот период меньше, чем время движения кислоты от нагнетательных до разгрузочных скважин, к этим скважинам будет поступать чистая вода, и сброс ее не представляет опасности.

Значительный интерес представляет также оценка влияния остановок в работе системы. После остановки начинается сначала быстрое, а потом все замедляющееся выполаживание депрессионной воронки — понижение у дренажных скважин уменьшается вследствие площадного роста воронки. Воронка постепенно заполняется законтурными водами.

После возобновления откачки-закачки воронка формируется заново, и поступившая вода, уже смешанная с кислотой, снова уходит за контур. По графику зависимости объема потерь от времени можно определить, что остановка системы всего на одни сутки приводит к потере около 600 м<sup>3</sup> раствора, или, в пересчете на 5%-ную кислоту, — 30 т кислоты. Если контур скважин совпадает с контуром рудного тела, то эта кислота нейтрализуется.

Проведенный анализ показывает, что во избежание значительных потерь кислоты следует стремиться обеспечить стабильную работу средств откачки-закачки, добиваясь непрерывной работы системы.

Потери вследствие естественных колебаний уровня грунтовых вод. Высота уровня воды за контур-



Рис. 65. График расхода нагнетательных скважин, при котором исключаются потери за контур.

1 — расход нагнетательных скважин; 2 — объем поданной в пласт кислоты

ром замкнутой системы обработки остается равной естественному уровню. Повышение последнего приводит к такому же повышению уровней внутри контура, происходящему в результате прорыва воды к дренажным скважинам в промежутках между нагнетательными. Наоборот, снижение естественного уровня ведет к утечке растворов из нагнетательных скважин. Из условий баланса видно, что суммарная величина потерь при этом будет равна произведению площади контура на амплитуду колебаний уровня и водоотдачу.

Потери, вызванные естественным потоком подземных вод. В приведенном выше анализе закономерностей движения рабочих и продуктивных флюидов предпологалось, что естественная поверхность подземных вод горизонтальна. При наличии естественного потока подземных вод возникают дополнительные потери, которые целесообразно рассмотреть более подробно.

*Ряды скважин неограниченной длины.* При работе трех бесконечных рядов скважин, из которых два внешних являются нагнетательными, потери жидкости за контур установки характеризуются графиком, представленным на рис. 66 (кривая 1). Используя метод суперпозиции, легко построить аналогичный график при наличии естественного потока подземных вод с единичным расходом  $q_e$ , направленного перпендикулярно к рядам скважин. Выразив  $q_e$  в долях от дебита центрального ряда, изобразим его величину в виде прямой линии, параллельной оси абсцисс. Результирующий расход утечек для нагнетательного ряда, верхнего по потоку, будет представлять собой разность расходов и изобразится на графике кривой 3. Для нижнего по потоку ряда результирующий расход представляет собой сумму расходов  $q+q_e$  (кривая 4). Производя аналогичные сложения графиков функций суммарных потерь, получим кривые 4 и 5, характеризующие суммарные потери. Из графика наглядно видно, что жидкость, первоначально ушедшая вверх по потоку, с некоторого момента времени (точка А) начинает возвращаться в пределы участка. После того как возвратится потерянный объем (точка В), начнется поступление в нагнетательный ряд естественной пластовой жидкости.

Как видно из построенных графиков, после наступления установившегося движения влияние естественного потока будет сказываться в поступлении дополнительного расхода, равного  $q_e$ , в верхний по потоку нагнетательный ряд и в утечке такого же расхода из нижнего по потоку ряда. Иными словами, работа установки после наступления установившегося движения не нарушает естественного режима; наблюдается как бы транзит естественного потока.

Отмеченные особенности фильтрации полностью сохраняются и при переходе от сплошных дрен к реальным скважинам. При этом естественный поток поступает в пределы контура по про-

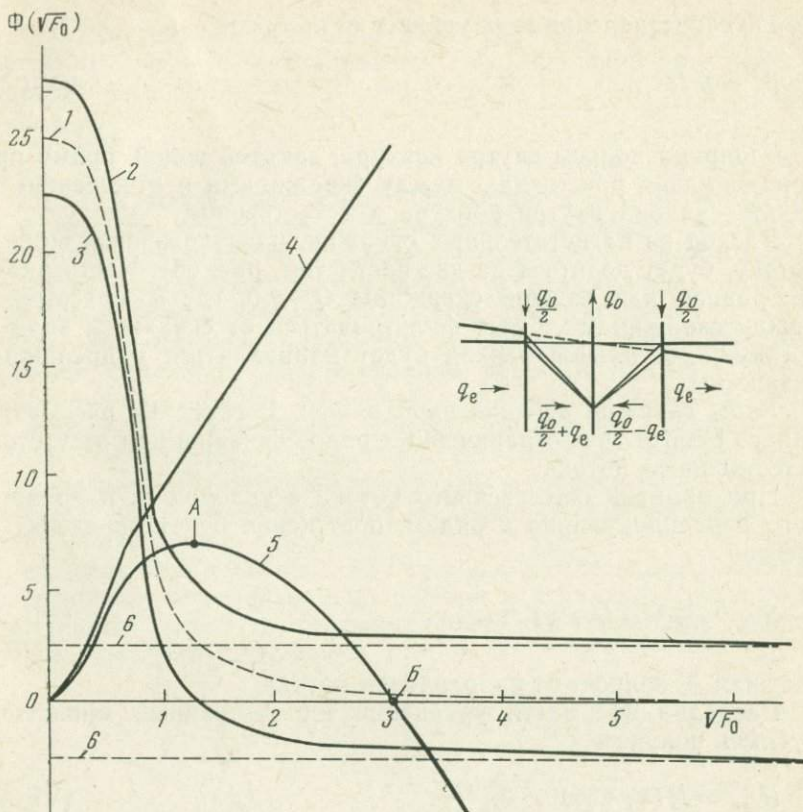


Рис. 66. Графики зависимости потерь растворов от времени при наличии естественного потока (в долях от дебита центрального ряда)

1 — единичный расход при отсутствии естественного потока; 2 — расход потерь вниз по потоку; 3 — расход потерь вверх по потоку; 4 — суммарные потери вниз по потоку; 5 — то же вверх по потоку; 6 — расход естественного потока

межуткам между скважинами. Сливаясь с движущейся в контуре жидкостью, этот расход приобретает уклон  $i$ , обусловленный работой системы.

Очевидно, что для полосы внутри контура, занятой разбавляющей пластовой водой, будет справедливо уравнение

$$Q_e = km i_e b_0, \quad (\text{VII.26})$$

где  $b_0$  — ширина полосы, занятой пластовой водой.

За пределами блока естественный расход на полосе шириной  $b$ , равной расстоянию между скважинами в ряду, составит

$$Q_e = km i_e b, \quad (\text{VII.27})$$

где  $i_e$  — естественный уклон.

Из сопоставления этих уравнений получим

$$b_0 = b \frac{i_e}{i}, \quad (\text{VII.28})$$

т. е. ширина полосы внутри контура, занятой водой, прямо пропорциональна расстоянию между скважинами и отношению величин уклона внутри контура к естественному уклону.

Расход из нагнетательных скважин, расположенных вниз по потоку, будет делиться на две части (см. рис. 66). Часть расхода, равная для каждой скважины  $Q = q_e b$ , где  $b$  — расстояние между скважинами, будет фильтроваться от скважины вниз по потоку, а остальной расход будет направляться в дренажные скважины.

*Ряды скважин ограниченной длины.* В главе IV рассматривалась работа трех ограниченных рядов скважин при отсутствии естественного потока.

При наличии естественного потока с уклоном  $i_e$ , направленного перпендикулярно к рядам, понижение будет определяться суммой

$$S = \frac{Q}{4\pi km} R(x, y) \pm i_e y, \quad (\text{VII.29})$$

где знак  $\pm$  зависит от направления потока.

Разделив обе части уравнения на постоянный множитель  $Q/4\pi km$ , получим

$$R_{\text{сум}} = R(x, y) \pm \frac{4\pi k m i_e y}{Q}. \quad (\text{VII.30})$$

Так как произведение  $km i_e$  — расход естественного потока, то формула примет вид

$$R_{\text{сум}} = R(x, y) \pm 4\pi y \frac{q_e}{Q}, \quad (\text{VII.31})$$

где  $q_e$  — единичный расход естественного потока.

Введем безразмерную координату

$$\bar{y} = \frac{y}{L}. \quad (\text{VII.32})$$

тогда

$$R_{\text{сум}} = R(x, y) \pm \frac{4\pi q_e L}{Q} \cdot \bar{y}. \quad (\text{VII.33})$$

Из этой формулы видно, что влияние естественного потока прямо пропорционально расходу естественного потока и обратно пропорционально дебитам дренажных скважин.

Зная значение множителя  $(4\pi q_e L)/Q$ , можно с помощью ЭВМ вычислить после фильтрационных сопротивлений при наличии естественного потока. Нами произведено такое вычисление при

$$\frac{4\pi q_e L}{Q} = 1. \quad (\text{VII.34})$$

Анализ полученной гидродинамической сетки (рис. 67) показывает, что естественный поток, огибая верхний нагнетательный ряд, устремляется к крайней дренажной скважине; разбавляющий приток составляет 25% от дебита скважины. Компенсирующая утечка происходит из всех нагнетательных скважин, расположенных вниз по потоку; наибольшая наблюдается из крайней скважины. Депрессионная воронка, как и в случае неограниченных рядов, становится асимметричной; более крутой от верхнего ряда и более пологой от нижнего. Проведенный анализ показывает, что наличие естественного потока может значительно нарушить режим работы установки. В исследованном частном случае суммарная величина утечки составляет 1/2 дебита центральной скважины.

Наибольший практический интерес в рассматриваемой задаче представляет определение положения нейтральной линии тока. Эта задача решается графоаналитическим способом, дающим вполне достаточную точность.

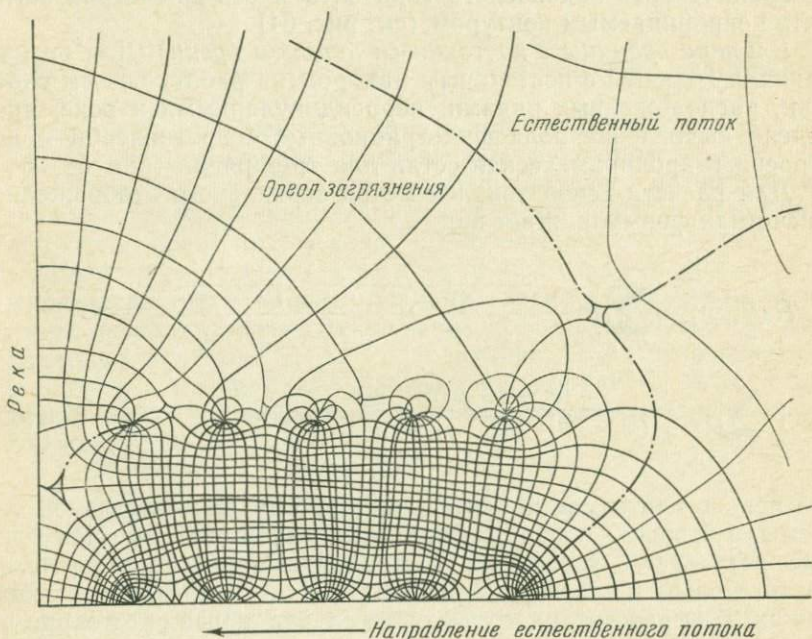


Рис. 67. Гидродинамическая сетка системы скважин, расположенной вблизи границы I рода, при наличии естественного потока

Влияние граничных условий. Месторождения, обрабатываемые способом подземного выщелачивания, имеют самые разнообразные гидрогеологические условия, которые при расчетах можно схематизировать как пласты неограниченной протяженности, пласты-полосы с непроницаемыми контурами, пласты-полосы с границами I и II родов. Рассмотрим некоторые простейшие схемы.

*Пласт-полоса с непроницаемыми границами.* В этих граничных условиях чередующиеся ряды скважин, ориентированные перпендикулярно к границам, работают как ряды безграничной протяженности и к ним можно применить все выявленные выше закономерности. При расположении рядов бесконечно большой длины вдоль пласта-полосы закономерности движения определяются теми же уравнениями, что и для бесконечного числа бесконечных рядов в неограниченном пласте. При этом фактическая ограниченность протяженности рядов сказывается только на работе крайних скважин, что является весьма благоприятным обстоятельством.

*Полуограниченный пласт с непроницаемым контуром.* Работа систем скважин в этих условиях мало отличается от работы в условиях неограниченного пласта. Чтобы получить гидродинамические сетки для этих условий, достаточно взять сетку для неограниченного водоносного горизонта и ось симметрии заменить непроницаемым контуром (см. рис. 64).

*Влияние границы с постоянным напором (реки).* Для оценки влияния границы с постоянным напором на работу систем скважин, расположенных рядами, перпендикулярными к реке, проведено вычисление поля фильтрационных сопротивлений и построена гидродинамическая сетка для трех рядов (рис. 68).

Для расчета использовался метод зеркального отображения. Расчетная формула имеет вид:

$$R(x, y) = \sum_{i=1}^n \ln \frac{\sqrt{(ib-x)^2 + (4b-y)^2} \sqrt{(ib-x)^2 + y^2}}{(ib-x)^2 - (2b-y)^2} + \\ + \sum_{i=1}^n \ln \frac{(ib-x)^2 + (2b-y)^2}{\sqrt{(ib-x)^2 + (4b-y)^2} \sqrt{(ib-x)^2 + y^2}}, \quad (\text{VII.35})$$

где первое слагаемое характеризует работу действительной системы, а второе — воображаемой отраженной системы. Полученные результаты указывают на наличие утечки растворов из нагнетательных скважин и разбавления их в дренажных скважинах. Для рассчитанного частного случая, когда расстояние до реки равно расстоянию между скважинами в ряду, крайняя дренажная скважина получает из реки 3/4 своего расхода. Утечка происходит из всех нагнетательных скважин, тем интен-

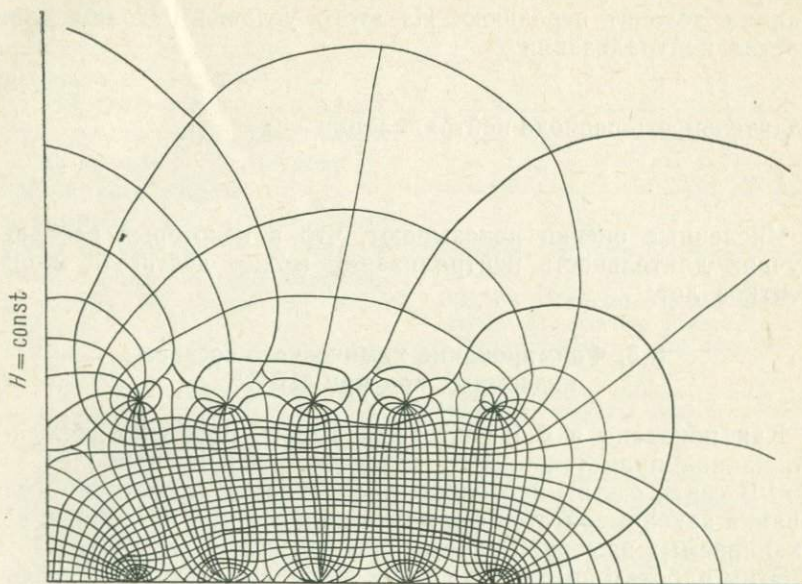


Рис. 68. Гидродинамическая сетка системы скважин при наличии границы I рода

сивнее, чем они ближе к реке. При уменьшении расстояния до реки степень разбавления возрастает.

Наличие естественного потока, направленного к реке, приводит к дополнительному разбавлению растворов за счет естественного потока. Растворы, теряющиеся из нагнетательных скважин, целиком направляются в реку, причем скорости их движения возрастают в связи с укорочением линий тока.

Нейтрализация кислых растворов. В результате взаимодействия с горными породами кислотные растворы постепенно нейтрализуются. Закономерности этого процесса рассматриваются в статье В. А. Грабовникова [35]. Основываясь на аналогии с необратимой равновесной сорбцией, автор вводит коэффициент распределения  $\beta$ , связанный с кислотоемкостью  $k$  соотношением:

$$\beta = \frac{c}{10k\gamma}, \quad (\text{VII.36})$$

где  $c$  — концентрация кислоты в растворе, г/л;  $\gamma$  — объемная масса пород.

Рассмотрим участок потока длиной  $l_1$ , в котором подземные воды замещены кислыми растворами. Передняя граница участка движется со скоростью  $V/(1 + \frac{1}{\beta})$ , а задняя — со скоростью  $V_0$ .

Нейтрализация растворов закончится в момент, когда задняя граница догонит переднюю. Из этого условия находим длину участка нейтрализации

$$x = \beta l \quad (\text{VII.37})$$

и длительность периода нейтрализации

$$t = \frac{l(1 + \beta)}{V}. \quad (\text{VII.38})$$

Численные оценки показывают, что в некоторых реальных случаях длительность нейтрализации может достигать многих десятков лет.

### § 5. Формирование химического состава подземных вод при ПВС \*

Как показано в § 1 настоящей главы, проблема сброса и утилизация промстоков ПВС является одной из наиболее острых. В связи с этим проведены лабораторные и полевые исследования закономерностей формирования состава подземных вод, откачиваемых из серной залежи при подземной выплавке.

Этим работам предшествовал гидродинамический анализ движения теплоносителя, в основу которого положены приведенные в главе IV зависимости.

Если напор воды в изливающей скважине ниже, чем естественный напор на контуре питания, то к водоотливным скважинам постоянно поступают, с одной стороны, естественные пластовые воды и, с другой, теплоноситель (рис. 69). При разгрузке самоизливом напор в водоотливных скважинах выше, чем естественный уровень пластовых вод, и водоотливные скважины целиком питаются водами внутренней зоны. Часть воды уходит из контура отработки, т. е. суммарный дебит водоотлива меньше, чем расход теплоносителя, подаваемого в добычные скважины.

Неоднородность воды по плотности и вязкости обуславливает существенное влияние конструктивных особенностей водоотливных скважин на структуру потока. Приток в совершенную по степени вскрытия скважину происходит только из верхней части пласта. Если же скважина оборудована фильтром в нижней части пласта (т. е. водоотлив ведется через серную колонну), то в скважину поступают пластовые воды. Граница раздела пластовых вод и теплоносителя при этом смещается вниз, образуя воронку, аналогичную «бугру» подошвенных вод при откачке нефти.

В условиях Язовского месторождения напоры воды в районе ПВС выше, чем в области региональной разгрузки (водоотлив-

\* В обработке материалов для составления данного раздела принимал участие С. Е. Каменев.

ные скважины карьера), на 30—40 м. Поэтому часть теплоносителя постоянно уходит за пределы участка ПВС.

Так, для всего периода работы участка ПВС-1808 характерен дебаланс нагнетаемой и откачиваемой воды, причем коэффициент водоотлива изменялся от 0,6 до 0,8, в соответствии с колебаниями давлений на устьях скважин от 2 до 1 МПа.

За период с XII. 1972 г. по VI. 1975 г. за контур эксплуатации ушло 1 783 239 м<sup>3</sup> теплоносителя. Учитывая, что разгрузка происходила практически в одном направлении, можно рассчитать размер зоны вытеснения, используя данные о пористости сероносных известняков.

Объем воды, заключенный в блоке, определяется формулой

$$W = BLMn, \quad (\text{VII.39})$$

где  $W$  — объем воды;  $B$  — ширина блока,  $L$  — длина блока;  $M$  — мощность пласта;  $n$  — пористость.

Из этой формулы длина зоны вытеснения равна

$$L = \frac{W}{BMn}.$$

Приняв  $B=1000$  м;  $Mn=0,53$  (по фактическим данным), получим

$$L = \frac{1\,783\,239}{1000 \times 0,53} = 3\,364 \text{ м.}$$

Исходя из предпосылки поршневого вытеснения, можно сделать вывод о том, что естественные пластовые воды вытеснены не только на участке ПВС, но и далеко за его пределами.

Таким образом, из гидродинамических данных видно, что изливающаяся из скважин вода представляет преимущественно остывший теплоноситель, обогащенный минеральными компонентами вследствие взаимодействия с рудой и вмещающими породами.

Характерный пример изменения химического состава подземных вод, изливающихся из скважин на участке ПВС-1808 в период 1973—1974 гг., представлен на графике (рис. 70).

Наибольшие изменения концентраций характерны для ионов натрия, хлора и сульфатов; концентрации кальция и гидрокарбоната изменяются в меньших пределах. На графиках видно,

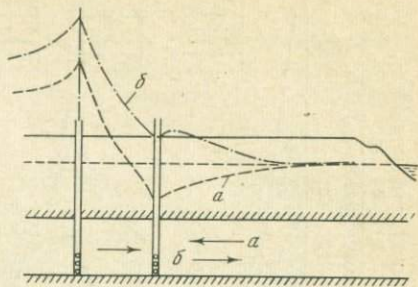


Рис. 69. Пьезометрические поверхности и направления движения воды к водоотливным скважинам при ПВС:

уровень воды в скважинах ниже (а) и выше (б) уровня в области разгрузки

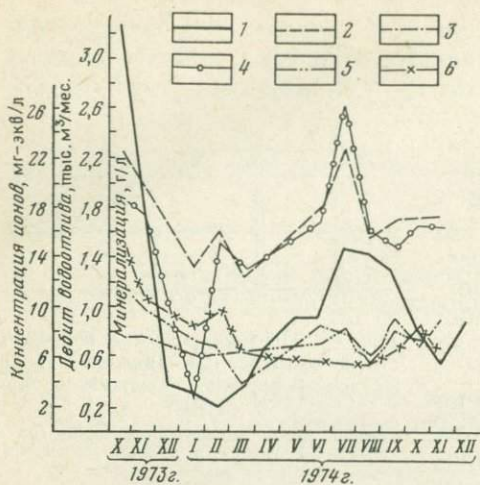
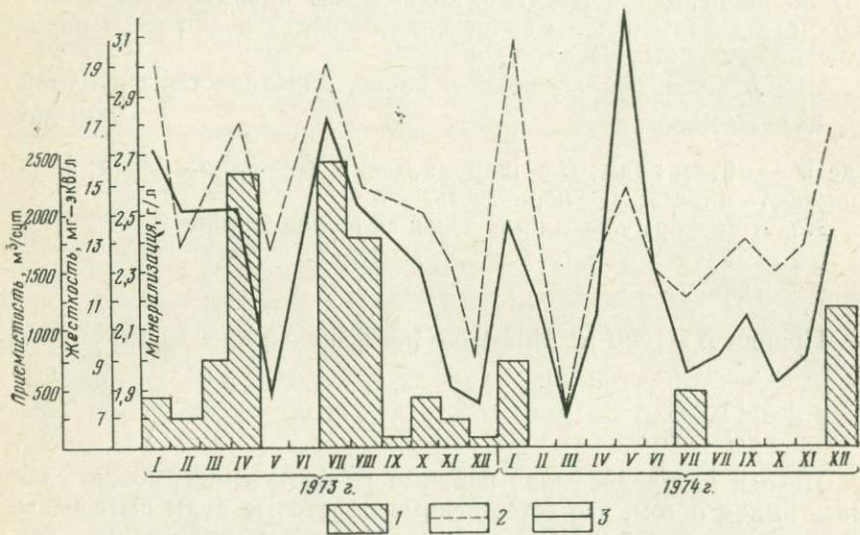


Рис. 70. График изменения содержания химических компонентов в изливающейся воде (сква. 96 Язовского месторождения).

1 — дебит; 2 — минерализация; 3 — концентрация (Ca<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> соответственно)

Рис. 71. График изменения во времени средневзвешенного состава техногенных вод на участке ПВС.

1 — суммарная приемистость включенных в данном месяце новых скважин; 2 — общая жесткость; 3 — общая минерализация



что увеличение дебита скважин обычно ведет к некоторому возрастанию минерализации. При этом рост дебита обычно связан с включением новых скважин.

Средняя минерализация и жесткость для участка ПВС-1808 показана на графике (рис. 71).

Для изучения процесса формирования химического состава технологических вод в 1975 г. (в период пусковых работ на участке ПВС-500) было проведено опробование по профилям скважин на северо-западном и юго-восточном флангах участка. Гидрохимические профили представлены на рис. 72—73. В нача-

ле пути фильтрации происходит интенсивное увеличение минерализации. Затем теплоноситель насыщается солями и приходит в равновесие с породами. На северо-западном фланге (см. рис. 72), где водопроницаемость пласта составляет  $10\text{--}20\text{ м}^2/\text{сут}$ , длина пути насыщения составляет  $160\text{--}170\text{ м}$ ; общая минерализация возрастает до  $3,2\text{ г/л}$ .

На юго-восточном фланге (см. рис. 73), где водопроницаемость превышает  $20\text{ м}^2/\text{сут}$ , длина пути насыщения больше  $200\text{ м}$ , а общая минерализация не превышает  $2\text{ г/л}$ .

По результатам обработки анализов установлена корреляционная зависимость между относительными концентрациями

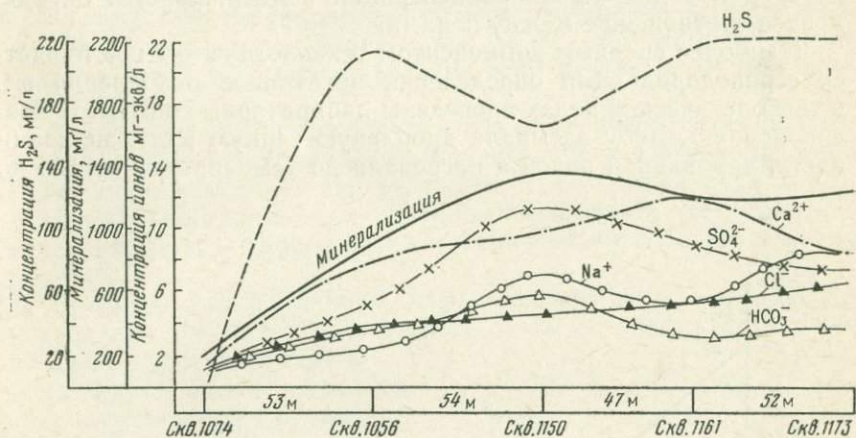


Рис. 72. Гидрохимический профиль по участку ПВС. Теплоноситель подается в скв. 1074 и изливается из скв. 1173

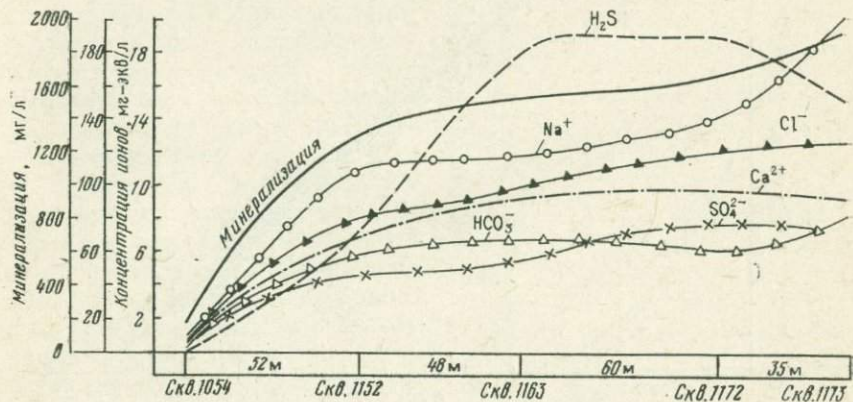


Рис. 73. Гидрохимический профиль по участку ПВС. Теплоноситель подается в скв. 1054 и изливается из скв. 1173

ионов натрия и кальция. На графиках (рис. 74) нанесены результаты более 700 анализов воды. Зависимость между относительными концентрациями имеет вид прямой линии:

$$\frac{\text{Ca}}{M} = 0,28 - 0,85 \frac{\text{Na}}{M},$$

где  $M$  — общая минерализация;  $\text{Ca}$ ,  $\text{Na}$  — содержание соответствующих ионов, г/л.

Это свидетельствует о наличии обратимой реакции катионного обмена между водами и глинистыми породами, благодаря которой в водах любой концентрации поддерживается определенное соотношение между ионами.

Наиболее вредным компонентом технологических вод является сероводород. Для определения источников накопления его в технологических водах проведены лабораторные опыты. В эмалированную трубу засыпали дробленую серную руду, заливали дистиллированной водой и нагревали до температуры от 125 до

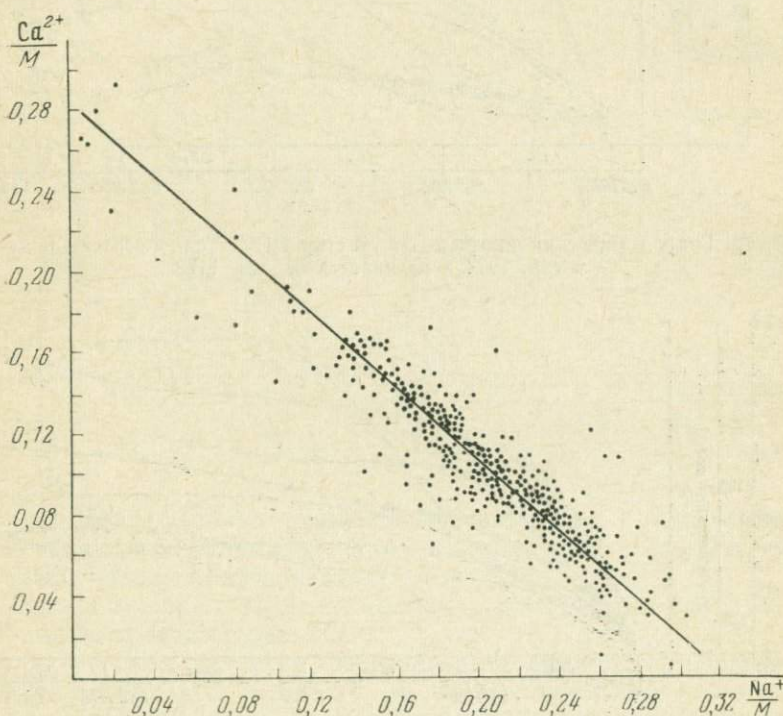


Рис. 74. Зависимость между относительными концентрациями  $\text{Na}^+$  и  $\text{Ca}^{2+}$  в подземных водах на участке ПВС

170°С в течение 4—5 ч. Затем труба охлаждалась, а в воде определяли содержание сероводорода. По результатам 17 опытов установлено, что в исследованном интервале температур руда реагирует с водой с образованием сероводорода. Зависимость концентрации сероводорода от температуры имеет форму параболы, рис. 75.

Лабораторные данные подтверждены исследованиями в период предпусковых нагнетаний воды с температурой 80—90°С на Ярошевском участке в 1975 г.

В процессе нагнетания воды проводили отбор проб на химический анализ из ближайших скважин. Анализами установлено, что содержание сероводорода по мере вытеснения естественных пластовых вод уменьшилось с 400 до 50—100 мг/л, т. е. при температуре ниже точки плавления серы сероводород практически не образуется.

Таким образом, установлено, что естественный состав пластовых вод месторождения имеет значение для решения проблемы сброса промышленных стоков только в начальный период эксплуатации месторождения. Период вытеснения естественных пластовых вод непродолжителен, всего от нескольких дней до недель.

Средняя минерализация сбрасываемой воды колеблется в пределах 1,8—3,2 г/л, жесткость 7—20 мг-экв/л. Повышение минерализации связано с включением новых скважин, что свидетельствует о наличии на участке застойных зон и подтверждает представление о языкообразном характере движения теплоносителя вне зон плавления. Максимальная минерализация теплоносителя соответствует составу воды, находящейся в химическом равновесии с рудой и вмещающими породами.

В процессе формирования химического состава технологических вод принимают участие растворение, катионный обмен и реакции с расплавленной серой, ведущие к образованию сероводорода.

Установлена химическая природа образования сероводорода; концентрация его в техногенных водах достигает 200 г/л.

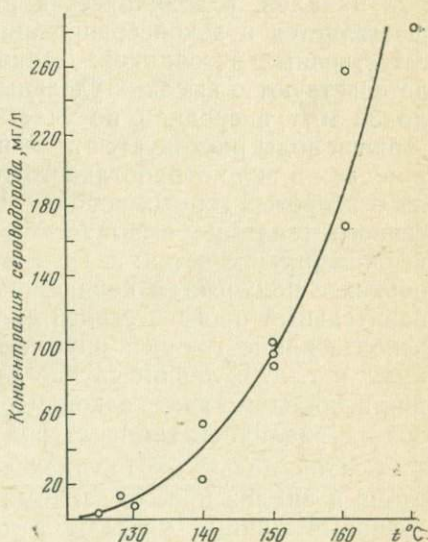


Рис. 75. Зависимость концентрации сероводорода от температуры нагрева системы серная руда — вода

Полученные результаты позволили дать прогноз изменения минерализации во времени для проектирования очистных сооружений на Язовском и Немировском рудниках. Большое значение имеют выявленные закономерности для проектирования отработки Загайпольского и Сырейско-Каменнодольского месторождений, где естественная минерализация воды достигает 15—20 г/л. Проведенные расчеты показали незначительность статических запасов этих вод, что позволило сократить расходы на сооружения для накопления и сброса воды.

На Загайпольском месторождении для ориентировочного подсчета статических запасов подземных вод была выбрана площадь 876 000 м<sup>2</sup>, разведанная по категории В. По данным описания керна выделены пористые и кавернозные интервалы, подсчитаны значения макропустотности в метропроцентах и составлена соответствующая карта в изолиниях. Подсчет объема пустот проводился определением площади, заключенной между изолиниями. На рассматриваемой площади объем пустот составил 254 000 м<sup>3</sup>. При сроке отработки 15 лет расход сбрасываемых естественных вод составит всего 17 000 м<sup>3</sup>/год, или 46 м<sup>3</sup>/сут, остальная доля промышленных стоков будет приходиться на теплоноситель, обогащенный солями в результате взаимодействия с породами.

В условиях Гаурдака, где серные залежи выходят на поверхность и повсеместно пронизаны обширной сетью крупных карстовых каналов, гидравлическая разгрузка пласта при ПВС осуществляется в законсервированный карьер «Южный» и в виде естественных источников. Данные работы установки ПВС свидетельствуют о высоких удельных расходах теплоносителя (около 30 м<sup>3</sup>/т в среднем по участку), т. е. только 8—10% тепла горячей воды расходуется полезно, большие его запасы остаются в недрах в виде отработанного теплоносителя, а также заключены в нагретых горных породах. Необходимость утилизации остаточного тепла не вызывает сомнения. Возможными методами утилизации являются: догрев воды в пароинжекционных установках с получением кондиционного теплоносителя ПВС; предварительный прогрев серной залежи до температуры 80—90°С; использование горячей опресненной воды для технологических нужд и т. д. В любом случае для решения технологии утилизации необходимо знать закономерности распространения в недрах воды с различной температурой и минерализацией.

С этой целью на Гаурдакском месторождении организован отбор и анализ проб подземных вод из скважин и карьера; полученные данные увязаны с температурными наблюдениями. В пределах обрабатываемого II участка химический состав подземных вод изменяется от естественного хлоридно-натриевого рассола до слабосоленого отработанного теплоносителя. Типичные анализы приводятся ниже (г/л)

Рис. 76. График-квадрат химического состава подземных вод на участке ПВС в Гаурдаке

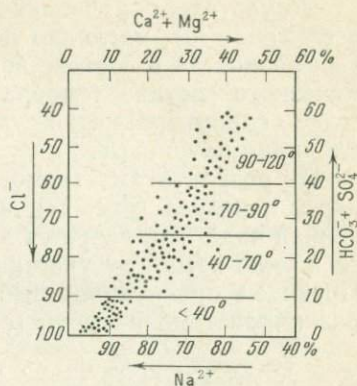
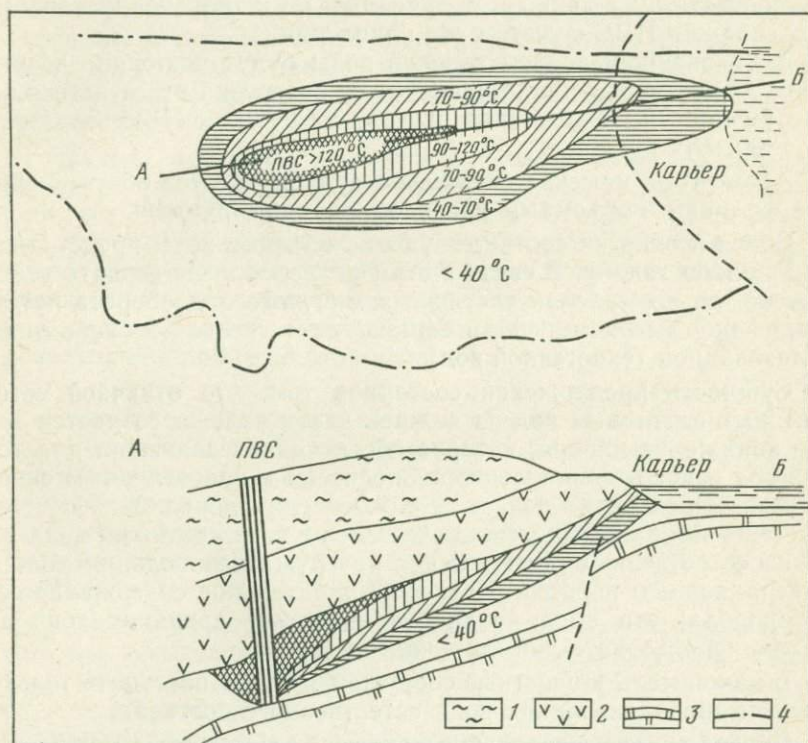


Рис. 77. Схематический план и разрез по участку Гаурдакского месторождения.

1 — четвертичные и меловые песчаники и глины; 2 — ангидрит; 3 — известняк; 4 — контур оруденения. Штриховкой показаны зоны распространения воды с различной температурой



	Na	Ca	Mg	Cl	SO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>	pH	Общая минерализация
Отработанный теплоноситель . . . . .	1,26	0,53	0,02	1,42	2,02	0,16	7,2	5,44
Естественные воды . . . . .	58,62	3,74	0,91	97,27	3,12	0,14	6,6	164,07

Результаты опробования нанесены на график-квадрат Шукарева (рис. 76), наглядно показывающий наличие всех переходных разностей в составе воды. Здесь же видно соответствие химического состава температуре: наиболее горячие воды по составу гидрокарбонатно-сульфатно-кальциевые, а холодные — хлоридно-натриевые.

По результатам термокаротажа построены схематическая карта и разрез (рис. 77), из которых видно, что горячая опресненная вода локализуется в верхней части разреза и вытягивается в виде языка от участка ПВС к месту разгрузки (карьеру). Проведен ориентировочный подсчет запасов подземных вод с различной температурой (состояние на сентябрь 1976 г.).

Температура, °С . . . . .	40—70	70—90	90—120	120
Объем воды, тыс. м <sup>3</sup> . . . . .	355	250	85	134

Коэффициент пустотности при подсчете принят равным 19%, что соответствует данным, полученным по керну эксплуатационных скважин ПВС с учетом зон плавления.

В дальнейшем запасы горячей воды будут постоянно возрастать до тех пор, пока не начнется ее разгрузка через источник.

Суммарный расход теплоносителя на руднике ПВС возрастет до 1200 м<sup>3</sup>/ч.

Кроме того, намечается закачка пульпы хвостов обогатительной фабрики с объемным расходом порядка 500 м<sup>3</sup>/ч.

Сброс и очистка соответствующих объемов воды представляют трудную задачу. В связи с этим целесообразно создать условия для осуществления частично замкнутого водооборота путем разделения высокоминерализованной естественной и слабоминерализованной техногенной вод.

Сущность предложения состоит в том, что откачкой естественных пластовых вод из нижней части залежи создается такое понижение напора, которое обеспечивает движения пластовых вод и некоторой части теплоносителя к водоотливным скважинам. Остальная часть теплоносителя движется к очагам естественной разгрузки, не смешиваясь с естественными водами. Тогда естественным путем будет разгружаться вода, имеющая минерализацию порядка 5 г/л и незначительное содержание сероводорода; эта вода не требует очистки; принципиально ее можно использовать для вторичного нагрева.

В накопитель и очистные сооружения будет поступать только высокоминерализованная вода естественного состава.

Проведенные исследования показывают, что этого можно добиться при откачке воды из нижних частей серных залежей с расходом, составляющим порядка 50% от расхода заканчиваемого теплоносителя, т. е. около 600 м<sup>3</sup>/ч. При этом отбор воды должен производиться более или менее равномерно по всей площади месторождения.

Обобщенные в книге различные материалы по физико-геологическим аспектам геотехнологии, с нашей точки зрения, для читателя имеют двойное значение. Во-первых, это просмотренные под определенным углом зрения накопленные знания и, во-вторых, что более важно, это ориентация на прогнозирование и развитие геолого-гидрогеологических работ и исследований в области геотехнологии.

В книге показаны тенденции развития геолого-гидрогеологических работ при исследовании месторождения геотехнологическими методами, освещены имеющиеся ресурсы (геологическая база) их развития, движущие силы (факторы), определяющие возможность и целесообразность отработки месторождений этими методами.

Предмет и задачи геолого-гидрогеологических исследований определяются стадией работ (поиск, разведка, подготовка, разработка) на месторождении. В то же время можно сказать, что для выполнения этих работ необходима научная база, на основе которой возможно решение задач практического плана — определение фактических геолого-гидрогеологических параметров месторождений, а также прогнозирование и управление их поведением в процессе отработки месторождения.

Описанные в работе требования различных геотехнологических методов к месторождениям, особенности комплексной методики их исследований, при разведке и эксплуатации, обоснования требований к качеству руды и горно-геологическим условиям их залегания не исчерпывают всех проблем разработки геолого-гидрогеологических основ геотехнологии. Более того они выдвигают необходимость постановки дальнейших работ в этом направлении.

В целях расширения минеральной базы геотехнологических методов необходимо выполнить паспортизацию месторождений, перспективных для отработки этими методами, их экономическую переоценку с учетом достижений геотехнологии, выделить первоочередные объекты для освоения, усовершенствовать методику разведки перспективных месторождений, а также разработать типовые схемы проведения опытных работ для опробования различных вариантов технологии.

Содержание и методика геолого-гидрогеологических исследований имеют общие черты при самых различных геотехнологиче-

ских методах добычи полезных ископаемых. В то же время они имеют специфические особенности, отличающие их от геолого-гидрогеологических исследований для обычных методов добычи полезных ископаемых.

Можно предположить, что эта общность и специфика приведут к формированию самостоятельного раздела прикладной геологии, «геотехнологической геологии», или короче «техногеологии», имеющей своей целью получение и обобщение геологических знаний, обеспечивающих развитие геотехнологических методов добычи полезных ископаемых.

1. Аксельруд Г. А. Теория диффузионного извлечения вещества из пористых тел. Львов, Изд-во ЛГУ, 1959. 250 с.
2. Альбов М. Н. Опробование месторождений полезных ископаемых. Изд. 5-е. М., «Недра», 1975. 232 с.
3. Альбов М. Н., Быбочкин А. М. Рудничная геология. М., «Недра», 1973. 432 с.
4. Аренс В. Ж. Геотехнологические методы добычи полезных ископаемых. М., «Недра», 1975. 264 с.
5. Аренс В. Ж. Разработка месторождений самородной серы методом подземной выплавки. М., «Недра», 1973. 264 с.
6. Аренс В. Ж., Полкунов В. Ф., Курапов Ю. Ф. Плотность скважин при детальной и эксплуатационной разведке Предкарпатских серных месторождений под их разработку методом ПВС. — «Труды ГИГХС», 1969, вып. 19, с. 23—35.
7. Аренс В. Ж., Семененко Д. К. Физико-химические методы разработки месторождений каустобиолитов. М., Изд. ГИГХС, 1971. 130 с.
8. Аренс В. Ж., Хчян Г. Х. Моделирование процесса подземной выплавки серы. — «Труды ГИГХС», 1968, вып. 17, с. 65—78.
9. Бабушкин В. Д., Плотников И. И., Чуйко В. М. Методы изучения фильтрационных свойств неоднородных пород. М., «Недра», 1974. 208 с.
10. Бахуров В. Г., Белецкий В. И., Садыков А. Х. Об изменении фильтрационных свойств пород при подземном выщелачивании урана раствором серной кислоты. — «Атомная энергия», 1971, № 5, с. 518—520.
11. Белый Л. Д. Теоретические основы инженерно-геологического картирования. М., «Наука», 1964. 178 с.
12. Бахуров В. Г., Вечеркин С. Г., Луценко И. К. Подземное выщелачивание урановых руд. М., «Атомиздат», 1969. 150 с.
13. Бахуров В. Г., Руднева И. К. Химическая добыча полезных ископаемых. М., «Недра», 1972. 134 с.
14. Лунев Л. И., Рудаков И. Е. Бесшахтные системы выщелачивания металлов. М., Цветметинформация, 1974. 59 с.
15. Богацкий В. В. Математический анализ разведочной сети. М., «Недра», 1963. 196 с.
16. Бойко Г. Е., Орлов Н. В. Подземная выплавка озокерита. — В кн.: Тезисы докл. II Всесоюзной конференции по геотехнологическим методам разработки месторождений полезных ископаемых. М., 1976, с. 430—433.
17. Бондарик Г. К. Основы теории изменчивости инженерно-геологических свойств горных пород. М., «Недра», 1971. 272 с.
18. Боровский Б. В., Самсонов Б. С., Язвин Л. С. Методика определения параметров водоносных горизонтов по данным откачек. М., «Недра», 1973. 304 с.
19. Бочевер Ф. М. Оценка эксплуатационных запасов подземных вод. М., «Недра», 1968. 328 с.
20. Бочевер Ф. М., Веригин Н. Н. Методическое пособие по расчетам эксплуатационных запасов подземных вод для водоснабжения. М., Госстройиздат, 1961. 200 с.
21. Бузинов С. Н., Умрихин И. Д. Гидродинамические методы исследования скважин и пластов. М., «Недра», 1973. 246 с.
22. Бэр Я., Заславски Д., Ирмей С. Физико-математические основы фильтрации воды. М., «Мир», 1971. 452 с.

23. *Веригин Н. Н., Саркисян В. С., Шибанов А. В.* О захоронении проток в глубокие водоносные горизонты. — «Водные ресурсы», 1976, № 1.
24. *Веригин Н. Н., Шибанов А. В.* О разработке рудных месторождений методом подземного выщелачивания. — В кн.: Тезисы докладов II Всесоюзной конференции по геотехнологическим методам добычи полезных ископаемых. М., 1976, с. 117—123.
25. *Вогман Д. А.* Железородная база и геотехнологические методы добычи. — В кн.: Тезисы докладов II Всесоюзной конференции по геотехнологическим методам добычи полезных ископаемых. М., 1976, с. 39—42.
26. *Гайдин А. М., Скворцова Т. Г.* К методике выделения обводненных зон в трещиноватых песчаниках. — «Изв. вузов, Геология и разведка», 1971, № 3, с. 36—39.
27. *Гаррелс Р. М., Крайст Ч. Л.* Растворы, минералы, равновесия. М., «Мир», 1968. 368 с.
28. *Геология и полезные ископаемые Гаурдак-Кугитангского района Туркменской ССР.* Изд. Ростов. ун-та, 1974. 264 с.
29. *Геология месторождений фосфоритов.* М., Госгортехиздат, 1962. 304 с.
30. *Геотехнологические способы добычи полезных ископаемых.* — В кн.: Технология разработки месторождений твердых полезных ископаемых. Т. 11. М., 1973, с. 373—435. (ВИНИТИ). Авт.: В. Ж. Аренс и др.
31. *Гольдберг В. М.* Гидрогеологические прогнозы движения загрязненных подземных вод. М., «Недра», 1973. 170 с.
32. *Головкин Э. А., Егоров В. И.* Полупромышленные испытания бактериального выщелачивания меди, никеля и других компонентов из забалансовых руд Кольского полуострова. — В кн.: Тезисы докладов II Всесоюзной конференции по геотехнологическим методам добычи полезных ископаемых. М., 1976, с. 382—388.
33. *Гольдштейн М. Н.* Механические свойства грунтов. Изд. 2-е. М., Стройиздат, 1971. 368 с.
34. *Горькова И. М.* Теоретические основы оценки осадочных пород. М., «Наука», 1966. 136 с.
35. *Гравовников В. А.* Прогноз нейтрализации кислых растворов в пласте после подземного выщелачивания. — В кн.: Тезисы докладов II Всесоюзной конференции по геотехнологическим методам добычи полезных ископаемых. М., 1976, с. 78—80.
36. *Гринбаум И. И.* Расходомерия гидрогеологических и инженерно-геологических скважин. М., «Недра», 1975. 271 с.
37. *Губкин Н. В.* Преимущества применения метода подземного выщелачивания. — «Атомная энергия», 1968, № 6.
38. *Дахнов В. Н.* Геофизические методы определения коллекторских свойств и нефтегазонасыщенности горных пород. М., «Недра», 1975. 344 с.
39. *Дудко П. М.* Подземное выщелачивание солей. М., «Недра», 1972. 160 с.
40. *Евсеева Л. С., Перельман А. И.* Геохимия урана в зоне гипергенеза. М., Госатомиздат, 1962. 160 с.
41. *Желтов Ю. П.* Механика нефтегазонасыщенного пласта. «Недра», 1975. 216 с.
42. *Заярнюк В. М., Бевза Ю. В., Резниченко Л. Б.* О влиянии рудного карста на условия движения теплоносителя при ПВС. — «Труды ГИГХС», 1976, вып. 33, с. 25—29.
43. *Зеленухин Л. П., Полкунов В. Ф.* Вулканогенные месторождения серы и перспективы их освоения геотехнологическими методами. — В кн.: Тезисы докладов II Всесоюзной конференции по геотехнологическим методам добычи полезных ископаемых. М., 1975, с. 63—67.
44. *Ильин В. П., Ермоленко В. А., Рожков В. И.* Перспективы разработки месторождений калийных солей Белоруссии подземным выщелачиванием. Минск, Изд. БелНИИИТИ, 1976. 62 с.
45. *Каждан А. Б.* Методологические основы разведки полезных ископаемых. М., «Недра», 1975. 272 с.

46. *Калабин А. И.* Добыча полезных ископаемых подземным выщелачиванием. М., Атомиздат, 1969. 376 с.
47. *Каменский Г. Н.* Основы динамики подземных вод. М., Госгеолтехиздат, 1943. 312 с.
48. *Каравайко Г. И., Авакян Э. А.* Использование микроорганизмов при геотехнологических методах добычи полезных ископаемых. — В кн.: Тезисы докладов II Всесоюзной конференции по геотехнологическим методам добычи полезных ископаемых. М., 1976, с. 364—373.
49. *Карцев А. А.* Гидрогеология нефтяных и газовых месторождений. М., Госгеолтехиздат, 1955. 310 с.
50. *Керкис Е. Е.* Методы изучения фильтрационных свойств горных пород. Л., «Недра», 1975. 231 с.
51. *Кириченко А. И.* Химические способы добычи полезных ископаемых. М., Изд-во АН СССР, 1958.
52. *Климентов П. П.* Методика гидрогеологических исследований. М., Госгеолтехиздат, 1967. 420 с.
53. *Коломенский Н. В.* Общая методика инженерно-геологических исследований. М., «Недра», 1968. 341 с.
54. *Кононов В. И.* Влияние естественных и искусственных очагов тепла на формирование химического состава подземных вод. М., «Наука», 1965. 146 с.
55. *Копелиович А. В.* Эпигенез древних толщ юго-запада Русской платформы. М., «Наука», 1965. 310 с.
56. *К проектированию* установки для безкрышной добычи погребенных россыпей месторождений полезных ископаемых. Новосибирск, Изд. Ин-та гидродинамики СО АН СССР, 1961.
57. *Курс месторождений твердых полезных ископаемых.* Под ред. П. М. Тараринова. М., «Недра», 1975. 630 с.
58. *Кулле П. А.* Разработка месторождений соли подземным выщелачиванием. М., Госхимиздат, 1949. 194 с.
59. *Лобанов Д. П., Пучков Н. В.* Перспективы развития и применения методов геотехнологической добычи твердых полезных ископаемых. — Изв. вузов, Геология и разведка», 1970, № 12, с. 119—130.
60. *Лобанов Д. П., Смолдырев А. Е.* Гидромеханизация геологоразведочных и горных работ. М., «Недра», 1974. 269 с.
61. *Малахов Г. М., Беспрозванный В. Д., Мусин Н. Г.* Отработка забалансовых марганцевых руд методом подземного выщелачивания. — В кн.: Тезисы докладов Всесоюзной конференции «Научно-технические проблемы комплексного использования месторождений полезных ископаемых». М., «Наука», 1976, с. 65—67.
62. *Марголин А. М.* Оценка запасов минерального сырья. Математические методы. М., «Недра», 1974. 264 с.
63. *Методическое пособие* по инженерно-геологическому изучению горных пород. Изд-во МГУ, 1968, т. 1. 348 с.
64. *Минкин Е. Л.* Гидрогеологические расчеты для выделения зон санитарной охраны водозаборов подземных вод. М., «Недра», 1967. 124 с.
65. *Минаев Г. Г., Строганов Г. А.* Разработка и полупромышленные испытания технологии кучного выщелачивания золота из забалансовых руд. — В кн.: Тезисы докладов II Всесоюзной конференции по геотехнологическим методам добычи полезных ископаемых. М., 1975, с. 433—440.
66. *Мироненко В. А., Шестаков В. М.* Основы гидрогеомеханики. М., «Недра», 1974. 296 с.
67. *Нафтулин И. С.* Пористость и проницаемость пласта в зоне плавления. — «Труды ГИГХС», 1972, вып. 21, с. 152—154.
68. *Нафтулин И. С., Хчезян Г. Х.* Гравитационное разделение жидкой серы и воды в призабойной зоне серодобычной скважины. — «Труды ГИГХС», 1969, с. 51—57.
69. *Новик-Качан В. П., Губкин Н. В.* Добыча металлов способом выщелачивания. М., Изд. Цветметинформация, 1970. 80 с.
70. *Опытно-фильтрационные работы.* Под ред. Д. Н. Башкатова, В. М. Шестакова, М., «Недра», 1974. 204 с.

71. *Орадовская А. Е.* Фильтрационное выщелачивание дисперсно распределенного гипса из песчано-глинистых пород. — В кн.: Растворение и выщелачивание горных пород. М., Госстройиздат, 1957, с. 120—128.
72. *Оркин К. Г., Юрчук А. М.* Расчеты в технологии и технике добычи нефти. М., «Недра», 1967. 380 с.
73. *Основы гидрогеологических расчетов.* М., «Недра», 1969. 368 с. Авт.: Ф. М. Боचेвер, И. В. Гармонов, В. М. Шестаков и др.
74. *Павлова Н. Н.* Деформационные и коллекторские свойства горных пород. М., «Недра», 1975. 240 с.
75. *Панюков П. Н.* Массив горных пород — основной объект инженерно-геологических исследований. — «Труды МГИ», 1959, вып. 28, с. 20—24.
76. *Перельман А. И.* Геохимия эпигенетических процессов. М., «Недра», 1968. 331 с.
77. *Перов Н. В.* Исследование процесса ПВС с использованием высокочастотного электрического поля. — «Труды ГИГХС», 1968, вып. 17, с. 139—145.
78. *Лунёв Л. И., Рудаков И. Е.* Подземные системы выщелачивания металлов. М., Изд. Цветметинформация, 1974. 80 с.
79. *Полевые* полупромышленные исследования извлечения марганца методом подземного выщелачивания. — В кн.: Тезисы докладов II Всесоюзной конференции по геотехнологическим методам добычи полезных ископаемых. М., 1975, с. 458—463. Авт.: Е. А. Попов, Л. К. Головкин, Н. В. Рыкида и др.
80. *Попова Г. Б.* Геохимические основы физико-химических методов разработки месторождений полезных ископаемых. Изд. МГИ, 1970. 160 с.
81. *Прогноз водопритков в горные выработки и водозаборы подземных вод в трещиноватых и закарстованных породах.* М., «Недра», 1972. 196 с. Авт.: В. Д. Бабушкин, З. П. Лебедевская, Б. В. Боровский и др.
82. *Пыхачев Г. Б., Исаев Р. Г.* Подземная гидравлика. М., «Недра», 1972. 360 с.
83. *Развитие исследований по теории фильтрации в СССР.* М., «Наука», 1969. 546 с.
84. *Разработка и внедрение метода ПВС в условиях Гаурдакского месторождения серы.* М., «Недра», 1977. 140 с. Авт.: В. Ж. Аренс, Л. С. Виноградов, А. М. Гайдин и др.
85. *Рац М. В.* Структурные модели в инженерной геологии. М., «Недра», 1973. 216 с.
86. *Ржевский В. В., Новик Г. Я.* Основы физики горных пород. М., «Недра», 1967. 288 с.
87. *Розовский Л. Б.* Введение в теорию геологического подобия и моделирования. М., «Недра», 1969. 127 с.
88. *Романов В. С.* Определение радиуса камер выщелачивания при разработке соляных залежей через буровые скважины. — В кн.: Гидрогеология соляных месторождений и вопросы подземного выщелачивания соляных залежей. М., «Недра», 1967, с. 233—240.
89. *Свихнушин И. М., Азаматов В. И.* Методы изучения неоднородных коллекторов при оценке кондиций и подсчете запасов. М., «Недра», 1971. 140 с.
90. *Семенов Д. К.* Дебиты скважин, расположенных рядами в неоднородном пласте, и потери газа. — «Труды ВНИИПодземгаз», 1960, вып. 3, с. 27—47.
91. *Скафа П. В.* Подземная газификация угля в СССР. М., Углетехиздат, 1960.
92. *Скворцов Г. Г.* Оценка природных факторов при прогнозах инженерно-геологических условий разработки месторождений твердых полезных ископаемых. Автореф. докт. дисс., 1963.
93. *Соколов Д. С.* Основные условия развития карста. М., Госгеолтехиздат, 1962. 322 с.
94. *Соколовский В. В.* Статика сыпучей среды. М., Изд-во АН СССР, 1960. 260 с.
95. *Справочное руководство по применению ядерных методов в гидрологии и гидрогеологии.* М., «Недра», 1971. 252 с.

96. Сыроватко М. В. Гидрогеология и инженерная геология при освоении угольных месторождений. М., Госгортехиздат, 1960. 500 с.
97. Терцаги К. Теория механики грунтов. М., Госстройиздат, 1961. 507 с.
98. Троянский С. В., Тимофеев Ю. И., Фисенко Н. Е. Определение общего притока воды в подземные газогенераторы. — «Труды ВНИИПодземгаз», 1960, вып. 3, с. 61—65.
99. Федоров А. Р. Движение границы раздела жидкостей при ПВС для Гаурдакского месторождения. — «Труды МГИ», 1974, вып. 6, с. 205—210.
100. Федоров С. А., Щербань А. Н., Малащенко Э. Н. Опыт геотехнологической добычи ртути. — «Научные труды ЦНИИ оловянной промышленности», 1971, № 2, с. 72—75.
101. Филенко Г. Д. Анализ плотности разведочной сети при разведке Гаурдакского месторождения серы. — «Труды ГИГХС», вып. 33, 1975, с. 11—18.
102. Фильчаков П. Ф., Панчишин В. И. Интеграторы ЭГДА. Киев, Изд-во АН УССР, 1961. 182 с.
103. Хчегян Г. Х., Нафтулин И. С. Применение статистических методов анализа в геотехнологии. — «Труды ГИГХС», вып. 33, с. 62—72.
104. Чарный И. А. Основы подземной гидравлики. М., Гостоптехиздат, 1956. 260 с.
105. Черныш П. А., Черныш Г. Ш. Опыт применения пятиэлектродного симметричного зонда при электрокаротаже скважин на Гаурдакском месторождении серы. — «Труды ГИГХС», 1975, вып. 33, с. 30—34.
106. Шестаков В. М. Основы гидрогеологических расчетов при фильтрации из хранилищ промстоков. М., Изд. ВОДГЕО, 1961. 260 с.
107. Шищенко Р. И., Есьман Б. И. Практическая гидравлика в бурении. М., «Недра», 1966. 318 с.
108. Шпак Д. Н. Исследования технологических свойств руд при подземной выплавке серы. — «Труды ГИГХС», 1972, вып. 21, с. 146—151.
109. Щелканов В. А., Булгаков А. В. Геотехнологический способ разработки карбонатных железных руд. — В кн.: Тезисы докладов II Всесоюзной конференции по геотехнологическим методам добычи полезных ископаемых. М., 1976, с. 168—173.
110. Щелкачев В. Н. Разработка нефтегазоносных пластов при упругом режиме. М., Гостоптехиздат, 1959. 467 с.
111. Эдигер В. Г. Оценка метода направленного фильтрационного выщелачивания по данным опытных испытаний и показателей промышленной эксплуатации Михайловского содового месторождения. — «Труды Алтайского политехнического института», 1974, вып. 28, с. 129—145.
112. Эфрос Д. Р. Исследование фильтрации неоднородных систем. М., Гостоптехиздат, 1961. 360 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ . . . . .	3
ГЛАВА I. Геология и геотехнология . . . . .	7
§ 1. Основные понятия и определения . . . . .	7
§ 2. Геотехнологические методы добычи полезных ископаемых . . . . .	9
§ 3. Месторождения полезных ископаемых как природная система . . . . .	19
§ 4. Неоднородность и изменчивость горной среды . . . . .	28
§ 5. Геотехнологические свойства полезных ископаемых и руд . . . . .	29
ГЛАВА II. Физико-геологические факторы и оценка их влияния на условия добычи полезных ископаемых . . . . .	33
§ 1. Понятие о факторах и методах их оценки . . . . .	33
§ 2. Скважинная гидродобыча . . . . .	36
§ 3. Подземное выщелачивание . . . . .	38
§ 4. Подземная выплавка . . . . .	46
§ 5. Подземная газификация . . . . .	49
§ 6. Подземное растворение . . . . .	52
ГЛАВА III. Минеральная база развития геотехнологических методов . . . . .	54
§ 1. Связь свойств руд с их генезисом . . . . .	54
§ 2. Месторождения, перспективные для скважинной гидродобычи . . . . .	58
§ 3. Месторождения, перспективные для отработки выщелачиванием и растворением . . . . .	61
§ 4. Месторождения, перспективные для отработки подземной выплавкой . . . . .	67
§ 5. Месторождения, перспективные для подземной газификации . . . . .	74
ГЛАВА IV. Динамика рабочих и продуктивных флюидов при добыче полезных ископаемых геотехнологическими методами . . . . .	77
§ 1. Задачи и особенности гидродинамических расчетов . . . . .	77
§ 2. Фильтрация однородной жидкости в однородном пласте в условиях взаимодействия систем нагнетательных и дренажных скважин . . . . .	81
§ 3. Несовершенство эксплуатационных скважин. Зависимость между устьевым давлением и расходом . . . . .	97
§ 4. Методика расчета водопроницаемости скважин с учетом их взаимодействия . . . . .	100
§ 5. Изменения гидрогеологических параметров рудовмещающего водоносного горизонта в процессе эксплуатации . . . . .	105
§ 6. Влияние разности плотностей жидкостей на условия их фильтрации . . . . .	113
ГЛАВА V. Особенности разведки месторождений, намеченных к отработке геотехнологическими методами . . . . .	124
§ 1. Задачи разведки. Оценка месторождений на стадии поисков . . . . .	124
§ 2. Общая методика разведки месторождений . . . . .	128
§ 3. Предпроектная оценка месторождений. Подсчет запасов . . . . .	135
§ 4. Подземная выплавка . . . . .	139
§ 5. Подземное выщелачивание . . . . .	151
§ 6. Скважинная гидродобыча . . . . .	155

ГЛАВА VI. Геолого-гидрогеологическое обслуживание геотехнологических рудников . . . . .	158
§ 1. Задачи и особенности геологической службы . . . . .	158
§ 2. Эксплуатационная разведка . . . . .	159
§ 3. Документация керна эксплуатационных скважин. Контрольное опробование . . . . .	160
§ 4. Гидрогеологические исследования эксплуатационных скважин . . . . .	163
§ 5. Сбор и обработка технологической информации . . . . .	167
§ 6. Учет движения запасов . . . . .	172
ГЛАВА VII. Геотехнологические методы и окружающая среда . . . . .	174
§ 1. Влияние добычи полезных ископаемых на окружающую среду . . . . .	174
§ 2. Проседание поверхности над выработанным пространством . . . . .	179
§ 3. Баланс рабочих и продуктивных флюидов . . . . .	185
§ 4. Потери рабочих и продуктивных флюидов в недрах . . . . .	188
§ 5. Формирование химического состава подземных вод при ПВС . . . . .	198
ЗАКЛЮЧЕНИЕ . . . . .	207
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ . . . . .	209

ИБ № 17890

ВИКТОР ЖАНОВИЧ АРЕНС  
АНАТОЛИЙ МАРКОВИЧ ГАЙДИН

**Геолого-гидрогеологические основы  
геотехнологических методов добычи полезных ископаемых**

Редактор издательства *С. Г. Бароянц*  
Обложка художника *С. А. Смирновой*  
Художественный редактор *В. В. Евдокимов*  
Технические редакторы *О. Н. Ласточкина, Л. Я. Голова*  
Корректор *Л. И. Окронгло*

---

Сдано в набор 13.03.78.	Подписано в печать 19.07.78.	T-11291.	
Формат 60×90 <sup>1/16</sup> .	Бумага № 2.	Гарнитура литер.	Печать высокая.
Печ. л. 13,5.	Уч.-изд. л. 14,05.	Тираж 2750 экз.	Заказ 217/6629—2
	Цена 70 коп.		

---

Издательство «Недра», 103633, Москва, К-12, Третьяковский проезд, 1/19  
Ленинградская картографическая фабрика объединения «Аэрогеология»

70 коп.

2634

НЕДРА