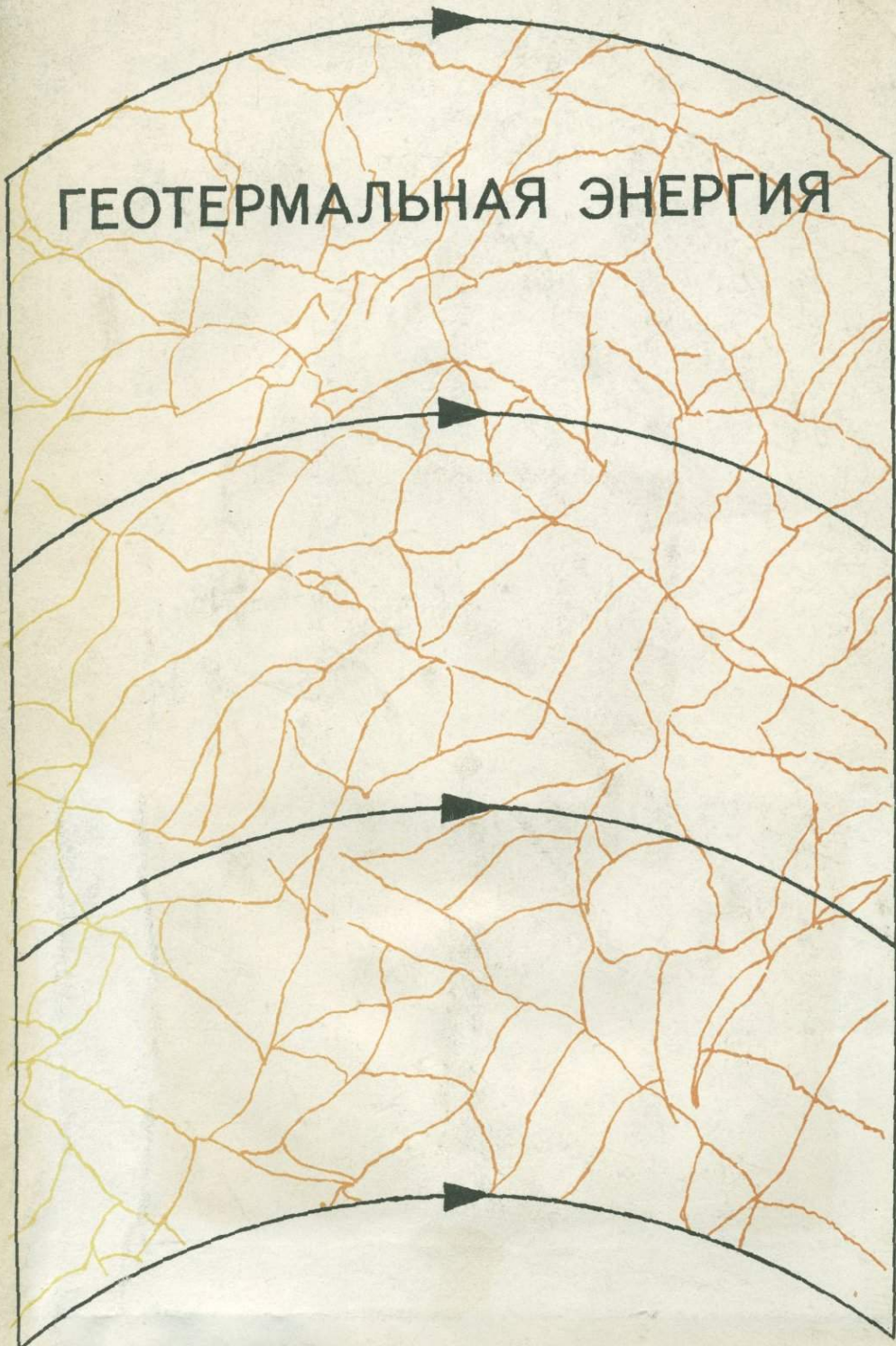


ГЕОТЕРМАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ





GEOHERMAL ENERGY

Resources, Production, Stimulation

Edited by Paul Kruger and Carel Otte

Stanford University Press

Stanford, California, 1973

ГЕОТЕРМАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ

551.23;550.35

Ресурсы, разработка, использование

Перевод с английского

Под редакцией

д-ра геол.-мин. наук

А.Е. Святловского

1743

ИЗДАТЕЛЬСТВО "МИР"

Москва 1975



В книге рассматриваются проблемы, связанные с освоением и использованием перспективного источника энергии — глубинного тепла Земли, или геотермальной энергии.

Книга состоит из трех частей: 1) обзора, характеризующего состояние разработок геотермальных месторождений во всем мире, их потенциальные запасы и методы разведки; 2) оценки ресурсов, форм использования и воздействия на окружающую среду при разработке месторождения; 3) рассмотрения потенциальных методов стимулирования месторождения: с помощью химических и ядерных взрывов, гидравлических разрывов, теплового растрескивания и закачки поверхностных вод в сухие горячие горные породы.

Книга адресована энергетикам, но в ней найдут много полезного также геологи, гидрологи, вулканологи, специалисты по охране окружающей среды и специалисты, работающие в смежных отраслях науки и техники.

Редакция литературы по новой технике

GEOTHERMAL ENERGY

Resources, Production, Stimulation

Edited by Paul Kruger and Carel Otte

Stanford University Press, Stanford, California

© 1973 by the Board of Trustees of the Leland Stanford Junior University

Эта книга – совместный труд крупных специалистов США, занятых разработкой научно-технических проблем геотермальной энергетики. В ней рассматриваются все основные аспекты программы геотермальных исследований. Общее представление о целях и содержании книги дают предисловия сенатора А. Байбла и ее редакторов, профессоров П. Кругера и К. Отте.

В настоящее время геотермальная энергетика не имеет промышленного значения – общая мощность ГеоТЭС мира составляет немногим более 1000 МВт. Однако в последние годы в этой области достигнут существенный прогресс, главным образом благодаря работам специалистов США. В Калифорнии, в Долине Больших Гейзеров, построена ГеоТЭС, общая мощность которой равна сегодня 500 МВт. Серьезное внимание уделяется в США программе научно-технических исследований по геотермальной энергетике. Цели программы разнообразны, но наиболее важные связаны с созданием ГеоТЭС на сильно минерализованных водах, магматических очагах и сухих горных породах. Если это окажется технически возможным и экономически целесообразным, то геотермальная энергетика сможет стать крупным источником электро- и теплоснабжения. Оптимистические оценки дали фантастические цифры: только для запада США – 400 000 МВт в ближайшие 20 лет. Это больше, чем современная мощность всех электростанций страны.

Советский Союз располагает колоссальными ресурсами геотермальной энергии. Использование одних лишь разведанных (попутно при разведке нефти и газов) месторождений позволит ежегодно сэкономить десятки миллионов тонн условного топлива. А ведь это только естественные парогидротермальные месторождения. При увеличении глубины и вовлечении в баланс термальных аномалий эти цифры становятся потрясающими. Нет никакого сомнения, что "игра стоит свеч".

Приводимые в книге факты, оценки и опыт США весьма полезны для специалистов нашей страны различного профиля. Представляется, что книга будет с интересом встречена энергетиками, которым она в первую очередь адресована. Редакция надеется, что книга будет содействовать выработке решений по очень важной научно-технической программе, по которой все еще имеются различные точки зрения.

Перспективы использования геотермальной энергии — это один из вопросов, входящих в мою компетенцию как члена Сенатской комиссии по внутренним делам и Объединенного комитета обеих палат по атомной энергии. Поэтому мне доставляет особое удовольствие представить читателям книгу, которая является результатом работы специальной сессии Американского ядерного общества, посвященной проблемам геотермальной энергии, которая состоялась в Лас-Вегасе (шт. Невада) в июне 1972 г.

Хотя выработка электроэнергии на основе энергии природного пара в Италии ведется с 1904 г. и в настоящее время мощность электростанции в Лардерелло достигает ~ 390 МВт, создание электростанции "Большие Гейзеры" в Калифорнии выдвигает США в число основных производителей геотермальной энергии. В настоящее время на основе природного пара этого месторождения в США вырабатывается ~ 300 МВт электроэнергии, а планируемое к концу 1975 г. увеличение мощности до 600 МВт превратит США в крупнейшего производителя электричества на основе геотермальной энергии. Растет интерес к этому источнику энергии в ряде других стран, в особенности в Новой Зеландии, Мексике, Японии, Исландии и Советском Союзе. Производится оценка потенциальных запасов геотермальной энергии в других районах земного шара. Учитывая этот все возрастающий интерес к новому источнику энергии, ООН организовала в 1970 г. международный симпозиум по разработке и использованию геотермальных ресурсов.

Известно, что геотермальные месторождения обнаружены во многих районах США и среди остальных энергетических ресурсов страны этот источник можно сравнить со спящим великаном. Я убежден, что разработка геотермальных ресурсов безопасна, вполне осуществима и может сыграть весьма важную роль в преодолении растущих энергетических проблем страны. Поскольку геотермальная энергия представляет собой относительно "чистый" вид энергии, ее роль может оказаться важной в связи с выступлениями общественности против загрязнения окружающей среды при производстве энергии. Кроме того, геотермальную энергию можно использовать и для других потребностей: отопления помещений и в промышленных процессах.

Каковы перспективы развития геотермальных ресурсов? Ответ на этот вопрос зависит от готовности Федерального правительства, частной промышленности и научной общественности произвести оцен-

ку возможности и технико-экономической целесообразности разработки геотермальных ресурсов, а также допустимости такой разработки с учетом требования охраны природы. Я готов принять участие в решении этого вопроса на уровне Федерального правительства как член Сенатской комиссии по внутренним делам и Объединенного комитета обеих палат по атомной энергии. Я надеюсь, что эта книга послужит стимулом для каждого из ее читателей внести свой посильный вклад в решение вопроса о приемлемой со всех точек зрения разработке геотермальных ресурсов на основе современных научно-технических знаний.

Хотя геотермальная энергия существует столько же, сколько и наша планета, ее разработка представляет новый рубеж науки, требующий скорейшего преодоления. Я обращаюсь к читателям с настоятельной рекомендацией — рассмотреть этот вид национальных ресурсов с позиций своей специальности. Пришла пора разбудить этого спящего великана и заставить служить его людям!

Лас-Вегас
30 ноября 1972 г.

*А. Байбл,
сенатор
шт. Невада*

Эту книгу предполагалось опубликовать как труды специальной сессии ежегодной конференции Американского ядерного общества, которая проходила в Лас-Вегасе (шт. Невада) с 9 по 20 июня 1972 г. и была посвящена проблемам геотермальной энергии. Первоначально эта сессия была организована, чтобы рассмотреть технические достижения в области стимулирования геотермальных месторождений с помощью взрывов. Ее организатором было отделение по использованию взрывов в мирных целях Американского ядерного общества. В ходе подготовки сессии выяснилось, что оценка потенциальных перспектив использования методов стимулирования возможна лишь после рассмотрения вопросов о геотермальных разработках в более широких масштабах. Так специальная сессия, посвященная проблемам геотермальной энергии, переросла в конференцию, рассмотревшую три основных направления этой новой области энергетики: разработку ресурсов, способы производства и потенциальные методы стимулирования.

Программный комитет обратился к экспертам в данной области с предложением представить на конференцию обзорные доклады, которые затем предполагалось включить в подходящую по тематике публикацию. Свидетельством огромного интереса к этому перспективному источнику энергии явилось широкое участие в конференции специалистов, большинство из которых не состояли членами ядерного общества. Учитывая явную потребность в серьезном изучении и обзоре всех проблем геотермальной энергии, Программный комитет принял решение опубликовать доклады конференции в виде научного труда в издательстве Стэнфордского университета. В соответствии с этим решением каждый из представленных на конференцию докладов был передан на рецензию соответствующему специалисту и затем возвращен автору для подготовки его к печати. После этого каждый доклад и иллюстрирующие его материалы были тщательно отредактированы в издательстве.

Хотя решение о необходимости такого специального и издательского редактирования значительно задержало опубликование трудов конференции, следует ожидать, что связанные с этим затраты времени и сил окажутся не напрасными. Существующая скудная литература по данному вопросу пополнится более ценной и полезной работой.

П. Кругер
Стэнфорд,
Калифорния
15 января 1973 г.

К. Отте
Лос-Анджелес,
Калифорния

1. ВВЕДЕНИЕ. ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОИЗВОДСТВА И ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ

К. Отте, П. Кругер¹⁾

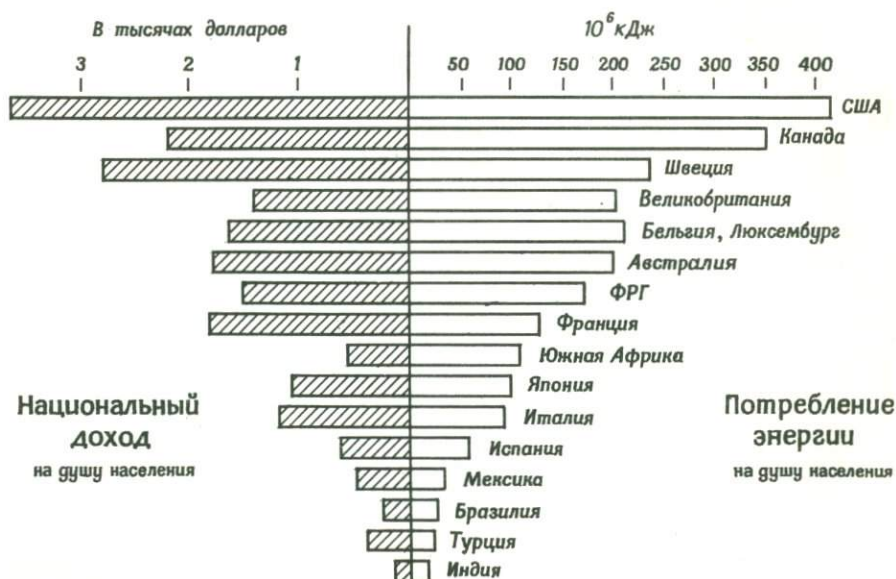
Энергия является движущей силой промышленности и по существу – всей цивилизации. Хаберт /3/ отмечал, что во времена, предшествующие последним нескольким векам, одним из факторов, ограничивающих рост населения, был постоянный уровень энергии, производимой на душу населения, который лишь немного превышал уровень производимых продуктов питания. Только после освоения ископаемого топлива общество освободилось от ограничений, задерживающих развитие сельского хозяйства и кустарной промышленности, и начался быстрый рост населения и среднего уровня жизни. Около восьми веков назад начали добывать каменный уголь; нефть, как важнейшее топливо, стали производить немногим более века назад, а к использованию природного газа в больших масштабах приступили сравнительно недавно. Для полноты следует упомянуть и другие виды энергии, образующие ее мировые запасы: энергию, производимую гидравлическими и атомными электростанциями. Однако определяющая роль в 70-е годы нашего века принадлежит органическим топливам.

За столь скромным началом последовал рост потребления энергии из органического топлива на ~4% ежегодно. При современном приросте населения Земли, достигающем ежегодно 2%, такой рост производимой энергии должен способствовать непрерывному повышению жизненного уровня фактически во всех уголках земного шара. Но средние цифры не определяют действительной картины потребления энергии. США занимают лидирующее положение в мире не только по доходу на душу населения, но и по потребляемой на душу населения энергии. При численности населения, составляющей 6% численности населения Земного шара, США в 1971 г. израсходовали 33% всей производимой в мире энергии (данные ООН 1971 г.).

¹⁾ Отте К. – вице-президент и руководитель отделения геотермальной энергии фирмы <<Юнион ойл>>, Лос-Анджелес, шт. Калифорния; Кругер П. – профессор кафедры по мирному использованию атомной энергии Стэнфордского университета, Стэнфорд, шт. Калифорния.

На долю человека в США приходится существенно менее 1% всей работы, выполняемой на фабриках, заводах и рудниках. Соотношение между доходом и потреблением энергии на душу населения в некоторых странах мира показано на фиг. 1. Очевидное несоответствие между доходом и потреблением энергии в Канаде и Швеции можно понять, если рассмотреть их специфические условия. Большее потребление энергии по сравнению с доходом в Канаде обусловлено ее обширными пространствами, суровым климатом и развитием добывающих отраслей промышленности. Противоположная картина в Швеции обусловлена более равномерным распределением населения, умеренным климатом и основным упором на легкую промышленность. Более типичными странами являются США и ФРГ, причем для США оба показателя примерно вдвое больше, чем для ФРГ.

Приведенный график отражает один важный факт. Все очевиднее, что рост населения, развитие экономики и высокий уровень жизни в США обеспечиваются путем возрастающего использования дешевой энергии, получаемой в основном из щедрой "копилки", каковой являются отечественные запасы ископаемых топлив. Но эти запасы предельны и возобновляются за периоды не менее миллионов лет. Рано или поздно запасы всех источников энергии будут исчерпаны.



Ф и г. 1. Соотношение между доходом и потреблением энергии на душу населения в 17 различных странах мира в 1968 г. [8].

В конце 60-х годов США начали импортировать нефтепродукты, а в настоящее время они импортируют ~30% потребляемых жидких нефтепродуктов. Более того, страна не подготовлена к резким изменениям потребления: в прошлом обширная система трубопроводов соответствовала повседневным требованиям и производимые излишки топлива являлись как бы топливным резервом. При значительном увеличении импорта сырой нефти стало не хватать емкостей для ее хранения. В то же время опасность загрязнения окружающей среды сдерживает увеличение мощностей атомных электростанций. В результате стало невозможным обеспечить соответствие между вводимыми мощностями и ростом потребления энергии. Ощущается нехватка энергии, особенно в периоды неблагоприятных климатических условий. В жаркое лето, когда резко возрастает потребление энергии установками для кондиционирования воздуха, многим крупным населенным пунктам грозит нехватка энергии на освещение улиц и витрин и некоторые из них уже испытали это. В морозную зиму нехватка топлива приобретает угрожающий характер, когда в более холодных районах приходится сокращать транспортные средства и снабжение.

Неограниченное производство дешевой энергии считалось в США само собой разумеющимся фактом, и долгосрочные проекты по увеличению колоссального национального дохода и улучшению жизненного уровня строились на предположениях о безграничных запасах энергии. Теперь стало очевидным фактом, что США, отступая с позиции относительного самообеспечения энергией, попадают в зависимость от других стран и должны считаться с их требованиями.

В то же время рост потребления энергии в других странах мира по-видимому, будет превышать рост потребления энергии в США. Если в 70-е годы в США планируется ежегодное увеличение потребления энергии на ~4%, то за пределами США возможно увеличение потребления более чем на 6%. Ни одна промышленно развитая страна полностью не обеспечивает себя энергией, и вместе с развивающимися странами они будут активно конкурировать с США из-за источников сырья /8/.

Экспоненциальный рост потребления энергии, быстрое истощение естественных ресурсов страны, отставание развития новых источников энергии и методов ее производства, неустойчивость курса доллара на мировых рынках, а также призыв общественности к экономному расходованию энергии и материалов, и защите окружающей среды заставили Федеральное правительство США разработать более рациональный план экономии энергии. В результате многие правительственные и частные организации приступили к широким исследованиям предполагаемого потребления энергии и возможностей ее экономии с одновременным улучшением состояния окружающей среды. Примеры таких исследований представлены в отчетах /4, 5/. На

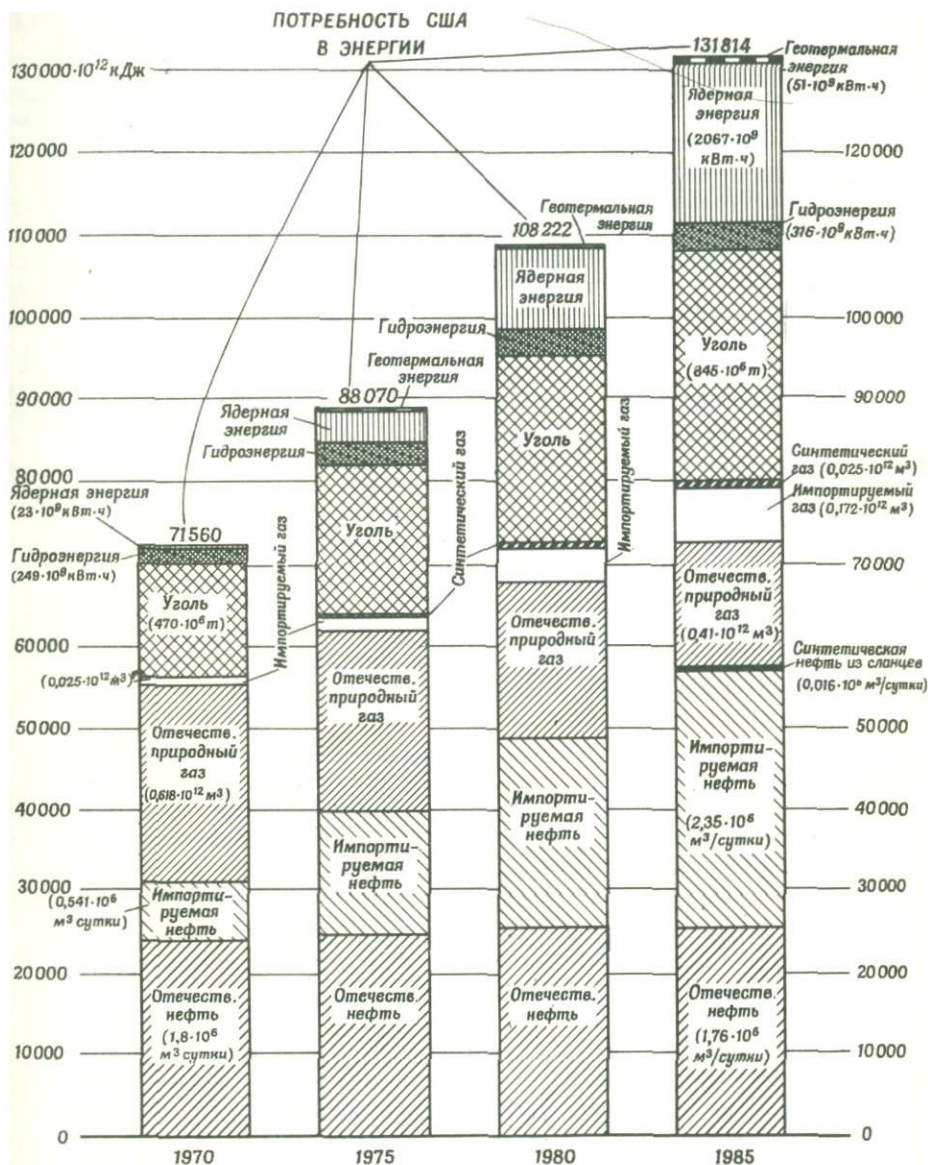
фиг. 2, заимствованной из отчета /4/, показан энергетический баланс США в период 1970–1985 гг. (в отчете /5/ сравниваемые величины приведены в разных единицах измерения). Проекты составлены с учетом современных тенденций. Оценки даются в единицах энергии (кДж), поэтому можно оценить относительный вклад каждого источника энергии. Данные по общему производству энергии на базе отечественных ресурсов, также заимствованные из отчета /4/, приведены в табл. 1. Кратко изложим выводы, сделанные в этих отчетах.

1. Потребление энергии. За период 1971–1985 гг. предполагается ежегодный рост потребления энергии в США в среднем на 4,2%. Предполагаемый рост потребления энергии по отдельным секторам: электрические установки 6,7%, обработка сырья 5,4%, транспортные средства 3,7%, бытовые услуги и торговля 2,5%, промышленность 2,2%.

2. Соотношение между производством и потреблением энергии в США. В 1970 г. производимая в США энергия удовлетворяла 88% потребности в ней. В период 1971–1985 гг. производство отечественной энергии должно возрасти ежегодно в среднем на 2,6%. Но так как рост потребности в энергии будет еще выше, страна попадет в еще большую зависимость от импорта энергетического сырья. К 1985 г. производство энергии в США будет составлять лишь 70% требуемой энергии.

3. Жидкие нефтепродукты. Добыча жидких нефтепродуктов, состоящих в основном из сырой нефти, включая газоконденсатные жидкости (бутан, пропан и др.), составляла в США в 1970 г. $1,8 \times 10^6$ м³/сут, т. е. 31% общего потребления энергии. Производство жидких нефтепродуктов в 1985 г. оценивается всего в $1,76 \times 10^6$ м³/сут. Чтобы удовлетворить возрастающие потребности в жидких нефтепродуктах, их импорт должен возрасти к 1985 г. более чем в 4 раза и достигнуть $2,35 \cdot 10^6$ м³/сут, что составит 57% всей потребляемой нефти, или 25% общего потребления энергии в стране.

4. Природный газ. При отсутствии ограничений на добычу газа (чего нельзя гарантировать) потенциальная потребность в нем за период 1970–1985-гг. приблизительно удвоится, достигнув $1,14 \cdot 10^{12}$ м³ в год. Количество импортируемого газа возрастет от 4% добываемого газа в 1970 г. более чем до 28% в 1985 г. при условии, что будет возможно транспортировать такое количество газа из-за границы. (При сохранении существующих в настоящее время тенденций следует ожидать, что добыча отечественного природного газа снизится к 1985 г. на ~40%. Однако даже если газ Аляски, импортируемый газ из Канады, отечественный синтетических газ из угля и нефти, а также импортируемые сжиженный природный газ и сжиженный нефтяной газ восполнят этот дефицит, общее



Ф и г. 2. Энергетический баланс США в 1972 г. с учетом типов источников энергии и их происхождения [4].

Таблица 1

Энергетический баланс США в период 1970–1985 гг. на базе отечественных ресурсов /4/

| Источник энергии | Годы | | | |
|--|-------|--------|-------|-------|
| | 1970 | 1975 | 1980 | 1985 |
| Нефть, 10^6 м ³ /сут | | | | |
| обычная | 1,8 | 1,76 | 1,88 | 1,76 |
| синтетическая (из сланцев) | - | - | - | 0,016 |
| В с е г о | 1,8 | 1,76 | 1,88 | 1,776 |
| Газ, 10^{12} м ³ | | | | |
| обычный | 0,618 | 0,56 | 0,494 | 0,41 |
| синтетический | - | 0,01 | 0,016 | 0,025 |
| В с е г о | 0,618 | 0,57 | 0,51 | 0,435 |
| Уголь, 10^5 т | | | | |
| для собственных нужд | 470 | 590 | 724 | 845 |
| для экспорта | 64,5 | 83,5 | 101 | 125 |
| В с е г о | 534,5 | 673,5 | 825 | 970 |
| Другие источники энергии, 10^9 кВт.ч | | | | |
| гидроэлектростанции | 249 | 271 | 29 | 316 |
| атомные электростанции | 23 | 326 | 926 | 2067 |
| геотермальные электростанции | 0,7 | 12 | 31 | 51 |
| В с е г о | 272,7 | 609 | 1256 | 2434 |
| Импорт для обеспечения баланса | | | | |
| Нефть, 10^6 м ³ /сут | 0,541 | 1,16 | 1,7 | 2,35 |
| Газ, 10^{12} м ³ | 0,025 | 0,0438 | 0,106 | 0,172 |

производство газа в 1985 г. составит $0,607 \cdot 10^{12}$ м³ в год, т. е. немного меньше, чем в 1970 г.)

5. Уголь. Добыча угля, включая его экспорт, увеличится с $534,5 \cdot 10^6$ т в 1970 г. до $970 \cdot 10^6$ т в 1985 г. Запасы угля достаточно велики и могут обеспечить даже более быстрый рост его добычи.

6. Ядерная энергия. Производство ядерной энергии возрастет с $23 \cdot 10^9$ кВт.ч в 1970 г. возможно до $2 \cdot 10^{12}$ кВт.ч в 1985 г. Недостатка в соответствующих топливах не ожидается, если цены на U_3O_8 не превысят 22 долл/кг. К 1985 г. производство ядерной энергии составит 48% всей требуемой электрической энергии.

7. Другие источники энергии. Остальные источники энергии – гидроэлектростанции, геотермальные электростанции и нефть из сланцев – к 1985 г. будут удовлетворять лишь 3% потребности в энергии. При этом не учитываются термоядерные реакторы, которые могут быть освоены к 1985 г., и использование солнечной энергии.

В отчете /5/ более подробно рассматриваются возможности использования геотермальной энергии. Приводятся четыре оценки производства геотермальной электроэнергии в 1985 г. по сравнению с ее производством в 1970 г., составившим 82 МВт. В наиболее оптимистическом варианте (19 000 МВт) предполагается максимальный технический прогресс без каких-либо задержек. Во втором варианте (9000 МВт) предполагается, что большие площади Земли будут доступны для изысканий, но возможна небольшая задержка, связанная с решением экологических проблем. Третий вариант относительно оптимистичен (7000 МВт, или ~1% требуемой в 1985 г. энергии). И, наконец, четвертый вариант наименее оптимистичен (3500 МВт).

Прогнозы относительно производства энергии содержатся также в отчетах /1, 8/. В табл. 2 приведены данные для наиболее важных источников энергии. Предполагаемое увеличение производства всей энергии от уровня, достигнутого в 1971 г., до предполагаемого уровня в 1985 г. составляет 69%. Эти прогнозы в целом совпадают с оценками, приведенными в отчете /4/.

Комиссия по атомной энергии США выпустила в 1971 г. отчет /9/, содержащий прогноз увеличения производства только электрической энергии (включая энергию, потребляемую транспортом, промышленностью и т. д.). Выводы этой комиссии (табл. 3) в основном согласуются с выводами, сделанными в отчетах /4, 5/ (табл. 4). Предполагается, что установленная мощность¹⁾ электро-

Таблица 2

Роль различных источников энергии в экономике США /8/

| Источник энергии | Действительные значения (1971 г.) | Прогнозируемые значения (1985 г.) |
|------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| | 10 ¹² кДж | 10 ¹² кДж |
| Уголь | 13,29 | 22,68 |
| Нефть | 32,18 | 53,49 |
| Природный газ | 23,95 | 29,96 |
| Атомные электростанции | 0,42 | 12,34 |
| Гидроэлектростанции | 2,95 | 4,54 |
| В с е г о | 72,79 | 123,01 |

станций США, составлявшая в конце 1970 г. 309 000 МВт, увеличится к 1985 г. до 995 000 МВт. Из этих мощностей на долю отечественных атомных электростанций приходится 5000 МВт (или 1,6% установленной мощности) в 1970 г. и 300 000 МВт (или 30% установленной мощности) в 1985 г.

¹⁾ Установленная мощность равна среднегодовой выработке электростанций, деленной на установленное число часов их работы. — *Прим. перев.*

Таблица 3

Прогнозы использования ядерной энергии в США /9/

| Вид мощности | Установленная мощность, 1970 г. | Установленная мощность, 1985 г. |
|--|---------------------------------|---------------------------------|
| Общая мощность отечественных электростанций, 10^3 МВт | 309 | 995 |
| Мощность атомных электростанций США, 10^3 МВт | 5 | 300 |
| Доля мощности атомных электростанций от общей мощности электростанций, % | 1,6 | 30 |
| Доля мощности атомных электростанций от общей мощности новых электростанций, % | 15 | 45 |

Таблица 4

Вклад отдельных источников энергии в общую энергию, производимую в США /5/

| Источник энергии | Производимая энергия, 10^{12} кДж | |
|--------------------------------------|-------------------------------------|---------|
| | 1970 г. | 1985 г. |
| Нефть | 2163 | 4 779 |
| Природный газ | 4 115 | 4 115 |
| Уголь | 8 229 | 14 664 |
| Атомные электростанции ¹⁾ | 253 | 19 742 |
| Гидроэлектростанции | 2 824 | 3 503 |
| В с е г о | 17 584 | 46 803 |

¹⁾ С учетом незначительного вклада от геотермальных электростанций ($528 \cdot 10^{12}$ кДж в 1985 г.).

Все проведенные исследования обнаруживают тенденцию к существенному увеличению потребности США в энергии к 1985 г. При сохранении приблизительно постоянного уровня производства нефтепродуктов на базе собственных ресурсов можно ожидать, что удовлетворение этой потребности будет обеспечиваться тремя источниками: импортом нефти, который будет составлять 57% всей потребляемой нефти и обеспечивать около 25% общего потребления энергии, почти удвоением количества добываемого в стране угля от $\sim 550 \cdot 10^6$

до $1000 \cdot 10^6$ т, а также постройкой, около 250 атомных электростанций мощностью 1000 МВт, которые обеспечат от 10 до 13% всего производства энергии в стране.

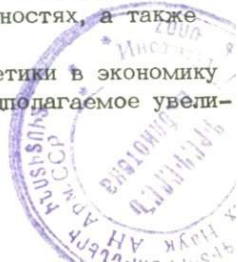
Хотя все основные рассмотренные источники энергии в состоянии обеспечить предполагаемые требования производства энергии, с каждым из них связаны свои трудности. Так, производство отечественной нефти в настоящее время сокращается, а цены на нефть неуклонно растут вследствие сокращения добычи и конкуренции с другими индустриальными странами из-за источников сырья.

Зависимость от импорта больших количеств нефтепродуктов представляет серьезную угрозу национальной безопасности и экономике страны, поскольку возрастают платежи иностранным государствам. Уже сейчас импорт нефти определяет основную часть этих платежей. В отчете Уингера и др. /10/, содержащем прогнозы относительно производства энергии до 1985 г., увеличение ежегодного дефицита платежей за нефть к 1985 г. оценивается суммой от 25 до 30 млрд. долл. Ясно, что такой дефицит вряд ли допустим.

Запасы угля в США достаточно велики: даже при современном уровне добычи их хватит на несколько веков. Но при приближении критического момента добыча угля может стать ограниченной из-за отсутствия рабочей силы, нехватки транспортных средств (географически угольные рудники концентрируются в одном месте) и из-за несоответствия требованиям охраны здоровья и безопасности шахтеров. Кроме того, введение контроля за состоянием окружающей среды при добыче угля, особенно на открытых разработках, а также за выделением таких веществ, как двуокись серы и летучая зола, при сжигании угля на электростанциях может еще более задержать рост добычи угля как источника энергии. Все эти проблемы оправдывают повышенное внимание, которое уделяется такому методу использования энергии угля, как газификация его подземных пластов (производство синтетического газа).

Запасы отечественного природного газа, как и нефти, быстро истощаются, хотя в настоящее время осваиваются несколько новых больших месторождений. Искусственное занижение цен на природный газ способствуют нерациональному его использованию, например, в качестве топлива для промышленных и коммунальных котельных установок. Для перевозки на судах и для хранения импортируемый газ должен быть сжижен, что представляет собой дорогостоящую операцию, поэтому цены, по которым он отпускается потребителю, станут выше. Таким образом, один из важнейших энергетических ресурсов страны — природный газ, — который следует преимущественно использовать в химической и легкой промышленности, а также в быту, расходуется не по назначению.

Чтобы правильно оценить вклад ядерной энергетики в экономику страны, ей следует уделять больше внимания. Предполагаемое увели-



чение мощностей атомных электростанций будет достигнуто только при условии решения проблем, связанных с безопасностью работы реактора, выбором участка для строительства, предусматривающим создание защитных зон, избавлением от радиоактивных и тепловых отходов и других воздействий на окружающую среду (особенно при добыче и выделении радиоактивных веществ). Кроме того, в прогнозах министерства внутренних дел /8/ отмечается, что существенное увеличение мощностей будет обеспечиваться вводом в действие высокотемпературных газовых реакторов и жидкометаллических МГД-установок с реакторами на быстрых нейтронах, которые находятся пока в стадии разработки. Решение важных проблем, связанных с созданием реакторов указанных типов или с вводом в действие реакторов существующих типов, приведет к соответствующему увеличению расхода ископаемых топлив. И хотя в ближайшие десятилетия ожидается быстрое развитие ядерной энергетики, ее применение будет ограничено большими центральными электростанциями, поскольку ядерные топлива не могут заменить органических топлив на транспорте и во многих других случаях использования энергии.

Что касается других источников энергии, то в отчете /1/ предполагается, что после 1980 г. источники энергии в США будут расширены не только путем увеличения импорта нефти и разработки новых месторождений, но также путем извлечения нефти из сланцев, ожигенного угля и каменноугольной смолы. Причем использование перечисленных топлив зависит от развития новых методов их производства. В этом смысле интересно отметить, что в противоположность отчету /5/ в отчете /1/, подготовленном по заказу министерства внутренних дел, совершенно не рассматривается геотермальная энергия.

Проблемы, связанные с нуждами энергетики будущего и основными источниками производства энергии, очень сложны, поскольку необходимо учитывать много взаимоисключающих факторов. Вероятно, некоторые прогнозы не оправдаются и отклонения будут обусловлены главным образом изменением структуры экономики и конъюнктурой. Тенденция к снижению потребления энергии, а также к более эффективному ее производству и использованию, по-видимому, сохранится. Такая тенденция будет способствовать понижению прогнозируемых уровней производства энергии. Снижение потребления энергии можно обеспечить путем преимущественного развития общественного транспорта, создания меньших по размерам, менее мощных автомобилей и введением таких норм строительства, которые обеспечивали бы улучшенную теплоизоляцию зданий и других сооружений, для которых требуется отопление или кондиционирование воздуха. Увеличение эффективности использования энергии можно обеспечить путем ограничения использования природного газа для котельных установок и более целесообразного его применения.

Энергия потребляется самыми различными способами, но некоторые источники энергии (гидроэлектрические, ядерные, геотермальные и, в значительной мере, уголь) могут применяться только на центральных электростанциях. Если бы эти источники энергии имели более широкое применение, то другие источники энергии, как нефть и газ, могли бы освободиться для удовлетворения нужд потребителей, которые не могут использовать энергию центральных электростанций, например для нужд транспортных средств. Учитывая большие запасы угля и нефтяных сланцев, имеющихся в стране, а также низкие цены на энергию, способствующие усиленному ее потреблению, можно заключить, что имеет место не столько энергетический кризис, сколько кризис неправильного планирования. Тем не менее в ближайшие десятилетия может наступить и кризис производства.

Начались исследования возможных способов снижения экспоненциально растущих потребностей в энергии. Эти работы проводятся на уровне Федерального правительства. В отчете /6/ предлагается снизить потребление энергии в США в 1980 г. до величины, эквивалентной $1,16 \cdot 10^6$ м³/сут. нефти. Эта цифра эквивалентна $\sim 2/3$ предпологаемого в 1980 г. импорта нефти. Ясно, что потребление энергии является важнейшим показателем планов будущего, которые составят общую программу развития энергетики страны. Ясно также, что выполнение программ по улучшению состояния окружающей среды будет связано с потреблением энергии. Все усилия такого рода заслуживают одобрения при условии, что ограничения производимой энергии будут увязаны с общими планами развития страны.

В связи с тем что к 1985 г. в США может возникнуть существенная нехватка энергии, имеет смысл попытаться использовать все собственные запасы энергии, которые можно освоить с помощью современных и перспективных методов производства. Из разнообразных источников энергии вероятным кандидатом для интенсивной разработки в ближайшем будущем является геотермальная энергия. В данной книге делается попытка оценить потенциальные возможности геотермальной энергии с учетом возрастающих потребностей США в энергии в ближайшие десятилетия, а также тенденции к экономии органических топлив. В соответствии с задачами, поставленными специальным симпозиумом Американского общества по ядерным исследованиям, посвященным вопросам использования геотермальной энергии и состоявшимся в июне 1972 г., книга состоит из трех основных частей: 1) обзора, характеризующего состояние разработок геотермальных месторождений в мире, их расположения, потенциальных запасов и методов разведки; 2) рассмотрения организации добычи, форм использования и воздействия на окружающую среду при разработке месторождений; 3) исследования потенциальных

методов стимулирования месторождений: ядерного, химического и механического.

Уже во время работы симпозиума были сделаны некоторые очевидные выводы, в том числе следующие:

1. Геотермальная энергия будет в основном использоваться для получения электроэнергии. Извлечение минеральных солей, получение пресной воды и теплоснабжение хотя и возможны, но будут применяться только на отдельных месторождениях и при особых обстоятельствах.

2. Запасы геотермальной энергии в США потенциально велики, особенно те из них, которые могут быть освоены с помощью глубокого бурения.

3. Большая часть месторождений принадлежит к типу месторождений с преобладанием жидкой фазы. Примером месторождения с преобладанием паровой фазы является Долина Больших Гейзеров в Калифорнии.

4. Усовершенствование паротурбинного цикла позволит использовать месторождения с преобладанием жидкой фазы (температура более 93°C), что значительно увеличит число разрабатываемых геотермальных месторождений.

5. Электроэнергия, вырабатываемая на базе геотермальных месторождений, экономически конкурентоспособна с энергией, вырабатываемой электростанциями на базе обычных органических топлив.

6. С точки зрения воздействия на окружающую среду геотермальные электростанции имеют преимущества по сравнению с обычными или атомными электростанциями.

7. Успешная разработка любого из методов стимулирования геотермальных месторождений существенно увеличит число экономически выгодных месторождений геотермальной энергии. Методы стимулирования, позволяющие использовать глубинные горячие сухие горные породы, умножат число таких месторождений.

Делаются также и другие оценки потенциальных возможностей использования геотермальной энергии. Например, Национальный научный фонд подготовил обзор с целью оценить целесообразность поддержания соответствующих исследовательских работ. В отчете, подготовленном Хиккелем /2/, предполагается, что в 1985 г. США смогут получить с помощью геотермальных электростанций по крайней мере 132 000 МВт энергии. Но сможет ли к тому времени геотермальная энергия обеспечить 13% потребностей страны в энергии, пока неизвестно. После усовершенствования методов использования и устранения общественных барьеров (официальных и непрерывно действующих административных и местных) геотермальные месторождения смогут почти полностью обеспечивать энергией центральные электростанции. Таким путем будет компенсирован недостаточно бы-

стрый рост других источников производства энергии, уменьшена потребность в дополнительном импорте нефтепродуктов, а нефть и природный газ освободятся для более целесообразного их использования. Если рекомендации, предложенные в данной книге, будут выполняться, то перспективы использования геотермальной энергии станут реальными, а прогнозы, содержащиеся в отчетах /4, 5/, возможно, будут даже превзойдены.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dupree W.G., West J.A., United States energy through the year 2000, U.S. Department of the Interior, 1972.
2. Hickel W.J., Geothermal energy, A special report, University of Alaska, Fairbanks, 1972.
3. Hubbert M.K., Resources and man, San Francisco, Freeman, 1969.
4. National Petroleum Council, U.S. energy outlook, An interim report, November 1971.
5. National Petroleum Council, U.S. energy outlook, A summary report, December 1972.
6. Office of Emergency Preparedness, Executive Office of the President, The potential for energy conservation, a staff study. Washington, D.C., U.S. Government Printing Office, 1972.
7. United Nations, World energy statistics, 1971.
8. U.S. Department of the Interior, United States energy: A summary review, 1972.
9. U.S. Atomic Energy Commission, Forecast of growth of nuclear power, WASH-1139, 1971.
10. Winger J.G., Emerson J.D., Gunning G.D., Sparling R.C., Zrally A.J., Outlook for energy in the United States to 1985, New York: Chase Manhattan Bank, 1972.

2. СОСТОЯНИЕ РАЗРАБОТОК ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В МИРЕ

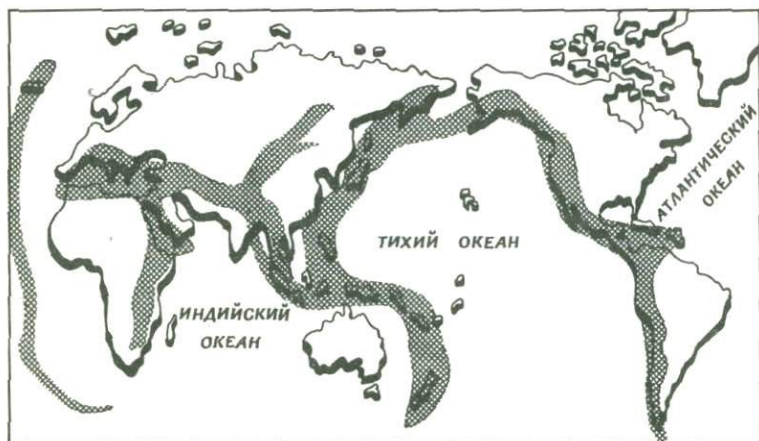
Дж. Б. Кениг¹⁾

Земля является огромным хранилищем тепловой энергии, но большая часть этого тепла скрыта столь глубоко или столь рассредоточена, что его невозможно ощутить на поверхности, особенно вследствие маскирующего действия падающего солнечного излучения. О том, что Земля является огромной тепловой машиной, мы узнаем во время вулканических извержений, когда на поверхность изливается лава с температурой более 800°C. Горячие источники, гейзеры и фумаролы также относятся к проявлениям внутреннего тепла Земли.

Тепло, извлеченное из глубин Земли, можно использовать для получения полезной работы, но эффективность этого использования зависит от энтальпии (теплосодержания), физического состояния и химического состава теплоносителя. Несмотря на очень высокую энтальпию, горячая лава не может быть непосредственно рабочим телом. Это же относится к горячим сухим горным породам, которые находят очень ограниченное местное применение. Водные растворы с высоким теплосодержанием (более 840 кДж/кг) можно использовать для выработки электроэнергии и в промышленных процессах, но только после удаления из них солей. Растворы с более низким теплосодержанием могут применяться в промышленности для теплоснабжения, но также лишь после удаления солей. Жидкости с низким теплосодержанием (более 420 кДж/кг) широко используются для отопления помещений и в сельском хозяйстве. Кроме того, насыщенные минеральными солями воды могут быть источником ценных промышленных химикалий, являющихся побочным продуктом процессов извлечения тепла или удаления солей. В ближайшие десятилетия возможности использования жидкостей с низким теплосодержанием могут существенно расширяться.

Геотермальные месторождения с высоким теплосодержанием существуют лишь в районах новейшей вулканической деятельности, крупных разломов земной коры и альпийского горообразования. Ос-

¹⁾ Кениг Дж.Б. — сотрудник Калифорнийского отделения горнорудной промышленности и геологии, Сакраменто, шт. Калифорния.



Ф и г. 1. Области со значительными запасами геотермальной энергии, в основном совпадающие с районами новейшей вулканической деятельности и горообразования.

новными зонами вулканической активности и геотермальных месторождений являются Тихоокеанский пояс, тянущийся вдоль побережья Тихого океана, группа островов, расположенных в районе Срединно-Атлантического Хребта, рифтовая зона восточной Африки и Среднего Востока, а также пояс горообразования, простирающийся от Средиземноморского бассейна Европы через Азию к Тихому океану (фиг. 1).

Жидкости с более низким теплосодержанием чаще встречаются в зонах вулканической деятельности и других местах и могут содержать полезной энергии выше на порядок или более. Значительные площади таких геотермальных месторождений находятся на побережье Мексиканского залива США, в обширной области Западной Сибири, в северной части Альп и в Карпатах. Впадины, расположенные у подножия складчатых гор, содержат воду, присутствие которой во время нефтегазодобывочных работ обычно считается помехой. Но в будущем такие горячие воды с относительно низким теплосодержанием могут стать столь же ценным и, возможно, столь же широко распространенным источником энергии, как нефть. Воды с низким теплосодержанием встречаются при бурении скважин и проходке шахт или в виде теплых источников, выходящих в складчатых горах и редко в районах древних континентальных щитов.

В данной главе рассматривается распределение геотермальных месторождений во всем мире, уровень их освоения, состояние исследовательских работ и оцениваются перспективы освоения в ближайшее десятилетие.

Пределы использования геотермальной энергии

Поскольку при передаче на расстояние тепло быстро рассеивается, геотермальные жидкости невозможно транспортировать далеко от места их извлечения без существенных потерь теплосодержания. Максимальное расстояние транспортировки зависит от начальной энтальпии (теплосодержания) геотермальной жидкости и от области ее применения. Пар, используемый для производства электроэнергии, можно транспортировать на расстояние не более ~ 2–3 км. Горячая вода, используемая в сельском хозяйстве или для обогрева помещений, может транспортироваться на большие расстояния. Например, в Исландии, где горячая вода используется для коммунальных целей, она транспортируется на расстояние до 20 км.

Если тепловая энергия преобразуется в электрическую, энергия может передаваться по линиям электропередач. Преобразование в электрическую энергию является практическим способом передачи тепловой энергии из удаленных геотермальных месторождений к крупным населенным пунктам. Однако преобразование энергии связано с существенными ее потерями. Дальнейшие потери происходят при передаче и последующем использовании электроэнергии для теплоснабжения и выполнения механической работы. Кроме того, электроэнергию нельзя эффективно аккумулировать. Вследствие этого при сооружении энергосистем приходится отдельно предусматривать покрытие пиковых нагрузок, что требует крупных капиталовложений. Из-за таких неблагоприятных факторов, вероятно, следует расширять область применения непреобразованной геотермальной энергии для отопления помещений, сельского хозяйства, теплоснабжения промышленных предприятий и, вероятно, получения солей, особенно в условиях роста цен на другие виды топлива. Если стоимость энергии в ближайшие десятилетия существенно возрастет, то вблизи геотермальных месторождений могут возникнуть поселения людей, подобно тому как когда-то на берегах рек, где строились мельницы, возникали города. Эта идея широко обсуждается в Венгрии.

Страны, в которых к настоящему времени уже построены и интенсивно строятся геотермальные электростанции, являются наиболее богатыми и промышленно развитыми странами мира. Это США, Италия, Япония, Советский Союз, Новая Зеландия, Исландия, Мексика, где в начале 1973 г. начато строительство геотермальной электростанции, также относится к сравнительно более развитым странам. Отсюда следует, что для таких работ необходима соответствующая экономическая и техническая база. Однако большинство стран, где проводятся исследовательские работы и где весьма велики возможности для будущего развития геотермальной энергетики, как правило, относятся к наименее развитым странам, в которых такая база отсутствует. Даже в наиболее развитых странах имеются районы, где отсутствуют обычные энергетические источники, мало населе-

ния и вследствие удаленности от промышленных центров стоимость электрической энергии намного выше. Примерами являются северный остров Японии Хоккайдо, полуостров Камчатка в Советском Союзе, область Большого Бассейна в Соединенных Штатах. Причем каждый из этих районов располагает запасами геотермальной энергии.

Многие из промышленно развитых стран бедны запасами органических топлив. Некоторые из них часто не имеют иностранной валюты, как, например, в настоящее время США. Не обладают достаточными природными запасами топлив Италия, Япония и, до недавнего времени, Новая Зеландия. В Японии 75% всей энергии импортируется, а в ближайшие десятилетия эта доля превысит 85%. Но даже такая богатая страна как Япония, не в состоянии импортировать 4/5 необходимой ей энергии. Кроме того, в промышленно развитых странах ограничивается развитие других способов преобразования энергии из-за их влияния на окружающую среду. Что касается атомных электростанций, то хотя их сооружение и не представляет особых технических трудностей, они еще не достигли запланированного уровня мощности как по экономическим причинам, так и вследствие их влияния на окружающую среду, вызывающего активный протест общественности.

В Новой Зеландии, где разведка геотермальных месторождений началась после окончания второй мировой войны, открытие крупных месторождений природного газа приостановило строительство геотермальных электростанций. Однако правительство Новой Зеландии намерено поддерживать работы по непосредственному использованию геотермальной энергии в промышленности, сельском хозяйстве и для отопления помещений. Если потребность в электрической энергии будет продолжать расти или природный газ страны найдет спрос на мировом рынке, то это решение будет пересмотрено. Итак, развитие геотермальной энергетики находится в сложной зависимости от местных политических, экономических и технических условий.

В заключение отметим, что можно ожидать расширения использования геотермальной энергии, особенно в ее непосредственном виде. Удвоение потребности в электрической энергии каждые 7 – 12 лет и рост потребности в других видах энергии во всем мире заставят нас осваивать геотермальные месторождения, несмотря на указанные выше недостатки использования геотермальной энергии. Особенно целесообразно осваивать местные энергетические ресурсы странам, которые испытывают нехватку запасов органических топлив или имеют отрицательный денежный баланс.

Стоимость производства

Очень трудно сравнивать стоимость вырабатываемой энергии при различных методах ее производства. Имеющиеся данные (табл. 1) не всегда являются точными и могут отражать различные процент-

Таблица 1

Сравнительные данные по стоимости геотермальной энергии

| Месторождение | Стоимость геотермальной энергии | Средняя местная стоимость энергии, получаемой из других топлив |
|--|---------------------------------|--|
| <i>Электроэнергия, 10⁻³ долл. США/кВт ч</i> | | |
| Намафьядль, Исландия | 2,5-3,5 | - |
| Лардерелло, Италия | 4,8-6,0 | ~ 7,5 |
| Мацукава, Япония | 4,6 | ~ 6,0 |
| Серро-Прието, Мексика | 4,1-4,9 | ~ 8,0 |
| Паужетка, СССР | 7,2 | ~ 10,0 |
| Долина Больших Гейзеров, США | 5,0 | 7,0 |
| <i>Теплоснабжение, долл.США/Дж</i> | | |
| Рейкьявик, Исландия | 0,96 | 1,6 |
| Сегед, Венгрия | 0,72 | 2,63 |
| <i>Замораживание, долл.США/Дж</i> | | |
| Роторуа, Новая Зеландия | 0,03 | 0,57 |
| <i>Сушка диатомита, долл.США/т</i> | | |
| Намафьядль, Исландия | - 2,0 | - 12,0 |

ные ставки и нормы налогообложения, сроки погашения долга по частям, специальные затраты и другие скрытые составляющие. Тем не менее, и это уже показано в Венгрии, Исландии, Новой Зеландии и СССР, непосредственное использование геотермальной энергии в промышленности, сельском хозяйстве и для отопления помещений обходится значительно дешевле использования для тех же целей сырой нефти, газа или дизельного топлива. Наиболее конкурентоспособными оказываются природный газ (там, где он добывается) и уголь, однако и их использование для теплоснабжения дороже использования горячей воды.

При производстве электроэнергии только гидроэлектроэнергия оказывается дешевле, и то лишь в отдельных случаях. В Исландии, например, в большинстве случаев гидроэлектроэнергия дороже энергии, вырабатываемой на геотермальных электростанциях. Лишь после совершенствования производства гидроэлектроэнергии стоимости этих двух видов энергии станут сопоставимыми. Кроме того, непосредственное использование горячей воды в Исландии для коммунальных нужд гораздо дешевле обогрева с помощью гидроэлектроэнергии. В Долине Больших Гейзеров (США) энергия, вырабатываемая на геотермальных электростанциях, дешевле электроэнергии, вырабатываемой из других видов топлива, независимо от мощности электростанций.

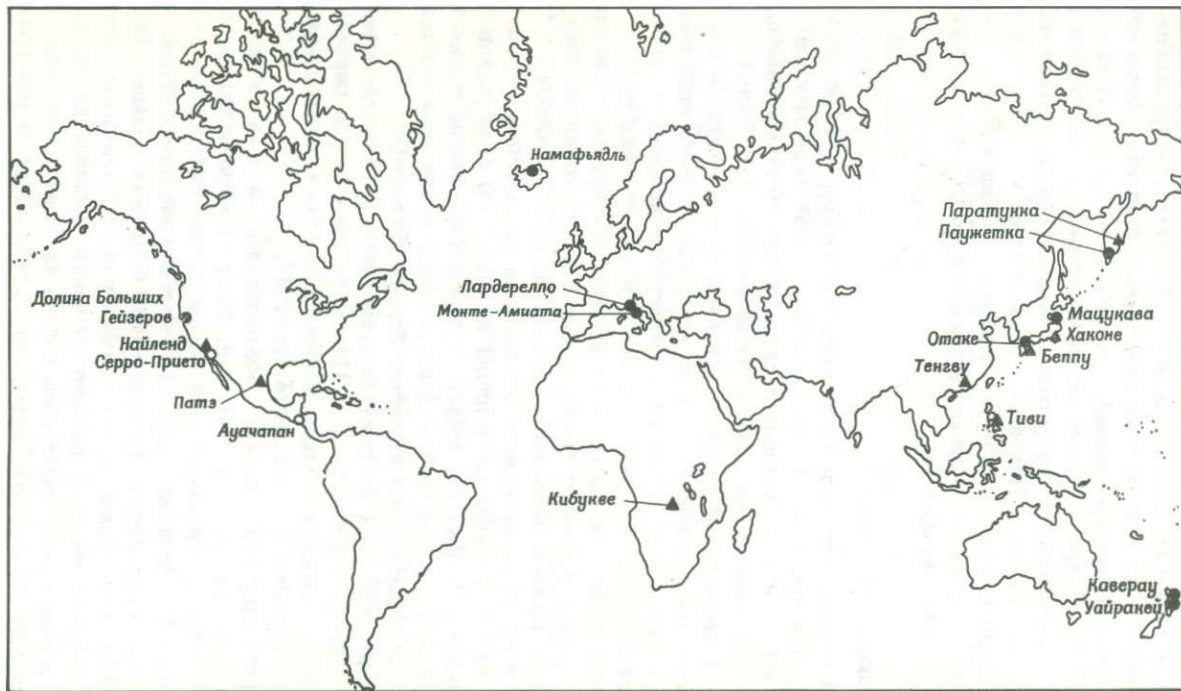
Даже в развитых странах геотермальная энергия оказывается дешевле энергии, вырабатываемой на очень больших электростанциях, которые экономически явно выгоднее малых станций. Рентабельность геотермальных электростанций при относительно малых мощностях (25–50 МВт) представляет особый интерес для развивающихся стран, где энергетические нагрузки и их рост обычно невысоки. Конъюнктурные соображения Новой Зеландии должны напоминать нам, что при наличии политических или экономических предпосылок для развития других источников энергии освоение геотермальных месторождений может быть замедлено.

История разведки и освоения

На первой стадии освоения геотермальных месторождений термальные источники применялись для лечебных целей (ванны и минеральные воды) и лишь в отдельных случаях для обогрева помещений. Первобытные люди использовали тепло фумарол для приготовления пищи, а в засушливых районах конденсированную воду — для питья. В течение многих веков человек использовал отложения серы из пара фумарол и в меньшей степени ртуть и квасцы, а также каолиновые глины из пород, разрушающихся в окрестности выхода фумарол. Получение борной кислоты из фумарол в Лардерелло в Италии положило начало освоению геотермальных месторождений. Начиная с 1812 г. минерализованные горячие воды из источников выпаривались в котлах с дровяным отоплением до получения борной кислоты. В 1827 г. в качестве топлива вместо дров стал использоваться пар фумарол. Некоторое время спустя в Лардерелло были пробурены первые скважины для получения пара, используемого как топливо и как дополнительный источник борной кислоты.

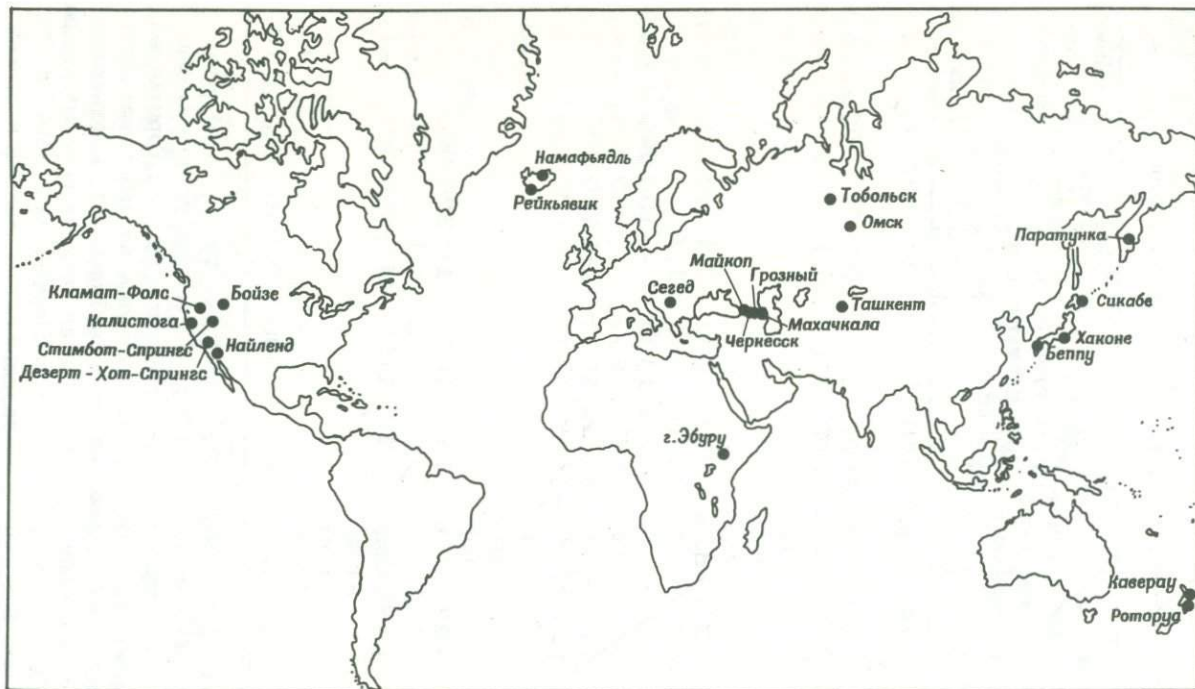
Впервые электрическая энергия из природного пара была выработана в Лардерелло в 1904 г. В 1913 г. вошла в строй первая действующая электрическая станция мощностью 250 кВт, положившая начало геотермальной энергетике (фиг. 2).

После первой мировой войны о геотермальной энергии стало известно во всех частях света. В 1919 г. были пробурены разведочные скважины в Бешпу (Япония), а в 1924 г. был установлен генератор мощностью 1 кВт и началась его опытная эксплуатация. В США разведочные скважины были пробурены в Долине Больших Гейзеров и Найленде (шт. Калифорния) в 20-х годах. Хотя было получено большое количество пара низкого давления, проекты не были претворены в жизнь из-за отсутствия спроса на электроэнергию. В 20-х и в начале 30-х годов скважины были пробурены и в других местах выхода из земли фумарол на территории США, главным образом в Йеллоустонском национальном парке. Разведочная скважина на Яве была пробурена в 1928 г. без последующего освоения.



Ф и г. 2. Геотермальные электростанции.

● действующие; ○ сооружаемые; ▲ опытные или недействующие.



Ф и г. 3. Районы непосредственного использования теплоносителей геотермальной энергии.

Таблица 2

Характеристики некоторых геотермальных месторождений

| Месторождение | Температура в бассейне, °С | Теплоноситель | Энтальпия, кДж/кг | Средняя глубина скважин, м | Соержание солей, % | Производительность скважины, кг/ч | Содержание неконденсирующихся газов, % |
|-------------------------|----------------------------|-----------------|-------------------|----------------------------|--------------------|-----------------------------------|--|
| Лардерелло | 245 | Пар | 2880 | 1000 | <0,1 | 23 000 | 5 |
| Долина Больших Гейзеров | 245 | " | 2800 | 2500 | <0,1 | 70 000 | 1 |
| Мацукава | 230 | В ос-новном пар | 2300 | 1100 | <0,1 | 50 000 | <1 |
| Отаке | 200+ | Вода | 1670 | 500 | 0,4 | 100 000 | <1 |
| Уайракей | 270 | " | 1170 | 1000 | 1,2 | - | <1 |
| Бродлендс | 280 | " | 1670+ | 1300 | - | 150 000 | ~ 6 |
| Паужетка | 200 | " | 815 | 600 | 0,3 | 60 000 | - |
| Серро-Прието | 300+ | " | 1100 | 1500 | 1,5 | 230 000 | ~ 1 |
| Найленд | 300+ | Соляной раствор | 1000 | 1300 | 26 | 200 000 | <1 |
| Ауачапан | 230 | Вода | 935 | 1000 | 1 | 320 000 | ~ 1 |
| Хверагерди | 260 | " | 920 | 800 | 0,1 | 250 000 | ~ 1 |
| Рейкьянес | 280 | Соляной раствор | 1150 | 1750 | 4 | 400 000 | ~ 1 |
| Намафьядль | 280 | Вода | 1090 | 900 | 0,4 | 400 000 | 6 |

В Исландии были обнаружены водоносные слои горячей воды в 1928 г. в Рейкьявике и в 1933 г. в Рейкире, расположенном на несколько километров восточнее столицы (фиг. 3). Горячая вода из этих геотермальных систем распределялась потребителям муниципальными властями, ведающими теплоснабжением г. Рейкьявика. Перед 1940 г. подземная горячая вода из скважин использовалась для теплоснабжения в Роторуа в Новой Зеландии. А в 1940 г. было пробурено уже большое число скважин в Роторуа и в городках южнее озера Таупо.

При восстановлении нарушенной второй мировой войной экономики вновь было обращено внимание на геотермальную энергию,

Таблица 3

Состояние разведки и освоения геотермальных месторождений в 1972 г.

| Страна | Сооруженные электростанции | Опытные электростанции | Непосредственное использование геотермальной энергии | Другие открытия геотермальных месторождений | Разведка новых месторождений ³⁾ |
|----------------|----------------------------|------------------------|--|---|--|
| Венгрия | | | x | | |
| Гваделупа | | | | x | |
| Заир | | x ²⁾ | | | |
| Индонезия | | | | | x |
| Исландия | x | | x | x | |
| Италия | x | | | | x |
| Кения | | | x | | x |
| Китай | | x | | | |
| Мексика | x ¹⁾ | x | x | x | x |
| Никарагуа | | | | x | |
| Новая Зеландия | x | | x | x | |
| Сальвадор | x ¹⁾ | | | x | |
| СССР | x | x | x | x | x |
| США | x | x ²⁾ | x | x | x |
| Тайвань | | | | x | |
| Турция | | | | x | |
| Филиппины | | x | | x | |
| Чили | | | | x | |
| Эфиопия | | | | | x |
| Япония | x | x ²⁾ | x | x | x |

1) В процессе строительства.

2) Недействующие.

3) Интерес к разведке и использованию геотермальных месторождений также проявляют Алжир, Аргентина, Болгария, Бурунди, Венесуэла, Гватемала, Греция, Замбия, Израиль, Индия, Испания (Канарские острова), Колумбия, Коста-Рика, Малави, Мали, Марокко, Новая Британия, Новые Гебриды, Перу, Польша, Португалия (Азорские острова), Руанда, Сомалийская Демократическая республика, Танзания, Тунис, Уганда, острова Фиджи, Чехословакия, Эквадор, Югославия.

особенно в Италии, Японии и Новой Зеландии, где ощутима нехватка природных топлив для производства электроэнергии; причем в Италии и Японии средства производства и передачи энергии были сильно разрушены во время войны.

Для ряда стран ниже будет описана история разведки и эксплуатации геотермальных месторождений с целью производства электрической энергии, теплоснабжения промышленных предприятий, обогрева помещений, получения химикалий и т. д. В табл. 2 приведены основные характеристики тринадцати наиболее крупных геотермальных месторождений восьми стран. В табл. 3 отражено современное состояние разведки и освоения геотермальных месторождений в пятидесяти странах.

Италия

Общая мощность установок, работающих на геотермальных месторождениях, возросла в Италии от 250 кВт (т. е. мощности первого генератора в 1913 г.) более чем до 390 000 кВт и является в настоящее время наибольшей в мире. Получение борной кислоты, начатое в 1812 г., прекращено в 1969 г. из-за неспособности экономически конкурировать с другими способами производства бора. Более 365 МВт электроэнергии вырабатывают тринадцать электростанций, расположенных в области Лардерелло. Около 25 МВт вырабатывают четыре электростанции, расположенные на 75 км южнее, в Монте-Амиата. Мощность отдельных турбин невелика и составляет от 900 кВт (установка без конденсатора в Сан-Ипполито) до 26 МВт (установки в Кастельнуово и Лардерелло). Около 43 МВт вырабатывают ряд аналогичных турбин в Лардерелло и Монте-Амиата. Турбины такого типа были выбраны благодаря их простоте, низкой стоимости и облегченной конструкции. Однако они потребляют приблизительно вдвое больше пара на 1 кВт·ч вырабатываемой электроэнергии, чем конденсационные турбины (20 кг по сравнению с 10 кг соответственно). Если пара много, а средства и время ограничены, то турбины без конденсатора предпочтительнее. Однако при дальнейшем развитии комплекса в Лардерелло, когда, по оценкам геологов, будет достигнута максимальная производительность месторождения, эффективность использования пара станет более важным показателем. Переход к конденсационным турбинам позволит тогда дополнительно увеличить мощность электрической энергии, вырабатываемой в Монте-Амиата и Лардерелло, на ~40 МВт без увеличения добычи пара.

Продуктивные месторождения в области Лардерелло расположены в Каприола, Кастельнуово, Габбро, Лаго, Лагони-Росси, Лардерелло, Монтесерболи, Монтеротондо, Сан-Ипполито, Сассо-Пизано и Серразано. От Монтеротондо на юг до северной границы геотермального поля в Габбро расстояние составляет ~20 км. Общая площадь поля превышает, по-видимому, 250 км². Кроме этого, открыты месторождения пара в Травале, Боччегьяно и Роккастрада, восточнее и юго-восточнее основного поля Лардерелло. Роккастрада

расположена почти на половине пути между центром поля Лардерелло и месторождениями в Баньоре и Пьянкастаньяйо, расположенными в районе поля Монте-Амиата. Радикофани можно считать продолжением поля Монте-Амиата в восточном направлении. В областях Лардерелло и Монте-Амиата пробурено ~500 скважин, из которых в 1971 г. эксплуатировались 200. Теплоносителем является пар с переменным содержанием неконденсирующихся газов, в среднем составляющим ~5% (табл. 2), хотя начальное содержание газов в скважинах гораздо больше. Так, содержание газов в Пьянкастаньяйо понизилось от 90 до 20% в 1970 г., а в дальнейшем уменьшилось еще более. Температуры пара в бассейнах достигают ~ 250°C.

Средняя производительность скважин составляет ~23 т/ч пара в Лардерелло и ~36 т/ч пара в Монте-Амиата. Более высокая средняя производительность в Монте-Амиата обусловлена меньшим сроком эксплуатации этого месторождения; со временем запасы и давление в месторождениях понижаются. Показатели отдельных скважин могут существенно отличаться от средних значений. Так, производительность одной из скважин составляет 270 т/ч. Средняя глубина скважин в Лардерелло достигает немногим более 1000 м. Скважины укрепляются обсадными трубами диаметром 34 см. Это самый большой диаметр для действующих в настоящее время продуктивных геотермальных скважин.

Отмечается взаимное влияние скважин в отдельных бассейнах и сообщается, что в некоторых из них достигнут максимально возможный расход. Это выражается в низкой средней производительности одной скважины и ее уменьшении со временем, в связи с чем многие геологи пришли к выводу о том, что достигнута максимальная производительность всего месторождения. Однако успешные разведка и освоение продолжаются в прежних границах поля, что особенно характерно для Травале, где начиная с 1951 г. после успешного бурения пяти скважин геотермальное поле осваивалось на месте ранее налаженного производства борной кислоты. Начиная с 1952 г. здесь работали две турбины мощностью 3500 кВт каждая. Лишь в 1962 г., когда производительность скважин стала ниже требуемой, станция была демонтирована. В феврале 1972 г. было сделано сообщение о бурении нескольких новых скважин производительностью не менее 100 т/ч сухого пара каждая, что, по-видимому, существенно увеличит производительность месторождения.

В настоящее время область Лардерелло - Монте-Амиата исследуется различными методами, включая инфракрасное излучение, позволяющее выявить значительные запасы тепла. В некоторых бассейнах в Лардерелло и Травале продолжается бурение. Изучаются также районы вулканической активности в Раккострада и Радикофани.

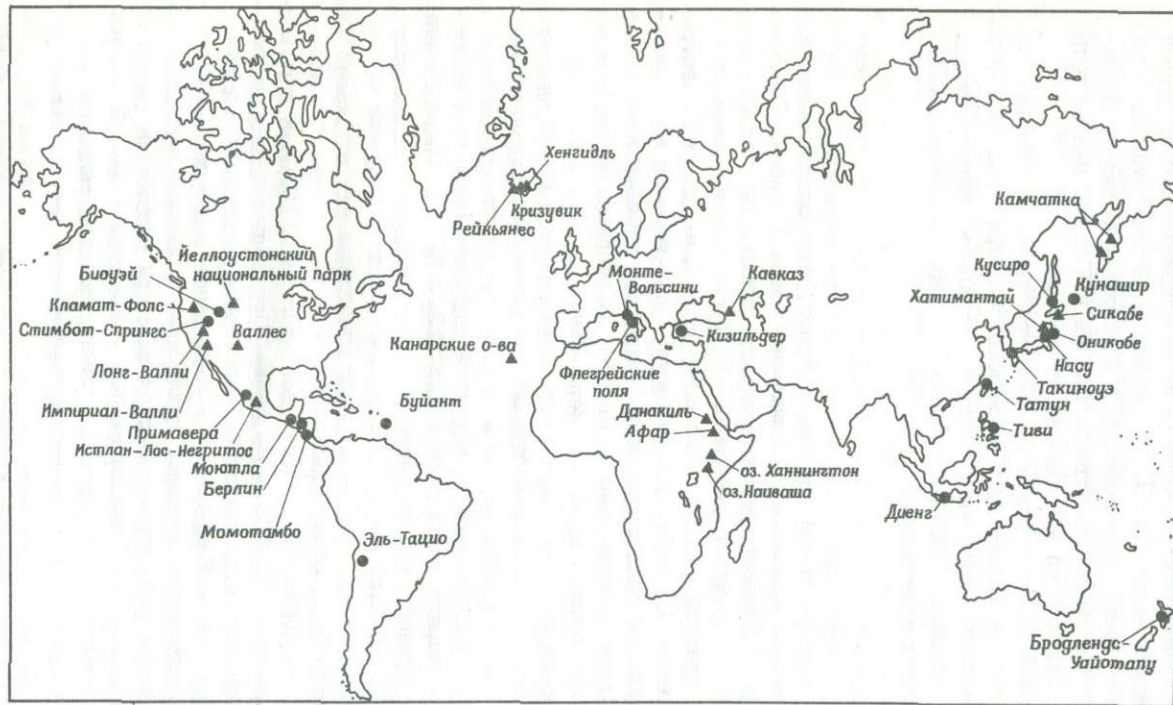
Проводятся геохимические исследования, бурение с целью определения градиента температур, составление геологических карт и бурение разведочных скважин. Вследствие продолжения разведочных работ и освоения месторождений стоимость пара вопреки первоначальным предположениям не понижается. Более того, в ближайшее десятилетие ожидается увеличение стоимости 1 кВт·ч электроэнергии, связанное с капитальными затратами на замену турбин без конденсатора конденсационными турбинами.

С увеличением числа конденсационных турбин растет расход сбросовой воды. В связи с прекращением производства борной кислоты в 1969 г. воды, содержащие соли борной кислоты, стали сбрасывать в реку. До сих пор не сообщалось об отрицательном влиянии сбросовых вод на сельское хозяйство.

Пар в Лардерелло извлекается из пористого доломитизированного известняка и гипса, относящегося к позднему триасовому и позднему юрскому периодам. Глубина месторождения определяется по уменьшению проницаемости при углублении через карбонатные слои к кристаллическому фундаменту. Бассейн находится под надвиговым пластом, состоящим из непроницаемых карбонатов, аргиллитов и офиолитов юрского и эоценового периодов. Утечки пара на поверхность земли могут происходить вдоль разломов, достигающих карбонатно-ангидритной породы, расположенной ниже надвигового пласта. Источник тепла предполагается на большой глубине. Граниты третичного периода имеются на острове Эльба, расположенном в 80 км юго-восточнее, а ближайшие вулканические породы позднего третичного периода находятся в Роккастрада.

Месторождение в Монте-Амиата образовано кислыми и щелочными вулканическими породами плиоценового и плейстоценового возраста, прорвавшими слои сланцев, известковых глин, известняков и песчаников, аналогичных имеющимся в Лардерелло. Бассейн пара также находится под непроницаемым надвиговым пластом. Предполагается, что послевулканическое обрушение привело к дроблению бассейна по разломам, определившим пути минерализации ртути и выхода небольших горячих ключей. Основные вулканические породы расположены южнее в Радикофани и в Монте-Вольсини. Следует отметить, что наличие кислых и щелочных вулканических пород, а также послевулканическое опускание, ртутная минерализация и горячие ключи характерны для многих геотермальных месторождений в мире.

Для дальнейшей разведки геотермальных месторождений в Апеннинских горах была выбрана группа из семи районов (фиг. 4). Южнее Монте-Амиата расположены: Монте-Вольсини; Монте-Симини, включая область Витербо; Монте-Сабатини; Колли-Альбани (юго-восточнее Рима); район около Неаполя, включая классические сольфатаровые области Поццуоли и Флегрейские поля, а также Монте-



Ф и г. 4. Перспективные геотермальные поля и разведываемые районы.
 ● перспективные геотермальные поля; ▲ разведываемые районы.

Вултуре на юге центральной части Италии. Другие области в северной Италии уже были исследованы ранее и признаны непригодными. Это Монте-Беричи около Падуи, где имеются кислые вулканические породы позднего третичного периода, и Монтекатини между Лардерелло и Пизой. Скважины пробурены так же в Тольфа, центре вулканической деятельности на юго-западе от Витербо.

В 20 - 30-х годах бурение проводилось также на острове Искья и вблизи города Поццуоли. Сообщалось, что при этом был обнаружен пар низкого давления. Однако остались неизученными возможности создания на Флегрейских полях электростанции с фреоновым теплообменником.

Новая Зеландия

Освоение геотермальной энергии в Новой Зеландии ограничено в основном районом вулканической впадины озера Таупо на Северном острове. В Уайракей работает электростанция мощностью 160 МВт; в Каверау пар с расходом ~180 т/ч используется для производства газетной бумаги, пиломатериалов и выработки электроэнергии мощностью 10 МВт, а в Роторуа пар и горячая вода широко используются для теплоснабжения. Природная горячая вода используется в небольших количествах в Нгауаха (Северный остров) и в некоторых других местах впадины озера Таупо.

Вулканическая впадина озера Таупо простирается более чем на 200 км в северном и северо-восточном направлениях параллельно структурному горному обрамлению и доходит на севере в заливе Пленти до острова Уайт, района активной вулканической деятельности. Наибольшая ширина зоны составляет 25 - 30 км. Центральная часть впадины длиной ~100 км изобилует фумаролами и термальными источниками. По крайней мере в 12 районах были пробурены разведочные скважины.

В результате была обнаружена горячая вода, содержащая поваренную соль, с температурой, обычно достигающей 270°C, и с максимальной температурой 306°C в Ротокава. При подъеме воды в скважине образуется пар, а на выходе - пароводяная смесь. Паросодержание различно: так, в Уайракей оно составляет в среднем 20%. Очень редко из скважины выходит сухой пар. Полагают, что это связано со вскипанием жидкости, происходящем при понижении ее давления у забоя скважины. Газосодержание в различных частях месторождения неодинаково. В Роторуа из перегретых вод выделяется сероводород, что создает потенциальную опасность для здоровья людей.

В скважинах геотермальных полей в Уайракей и Каверау обычно происходит снижение расхода и давления, в связи с чем приходится перебуривать или углублять отдельные скважины. Из-за сни-

жения давления в скважинах на входе в турбины оно оказывается меньшим первоначально предполагаемого. Кроме того, в Уайракей происходит оседание почвы. Отложение кальцитов и кремнезема и коррозия металлов минеральными водами создают дополнительные проблемы при эксплуатации месторождения. Рассол, состоящий на 80% из первичной геотермальной жидкости, спускается в реки, однако вредного его влияния не отмечено.

Несмотря на указанные трудности, в конце 40-х годов резко повысился интерес к освоению геотермальных месторождений, и в результате была построена первая электростанция мощностью 160 кВт в Уайракей. Однако эта опытная станция, проработав всего год, была остановлена в 1964 г. из-за недостаточного дебита скважин. Следующая электростанция имела разветвленную сеть паропроводов и использовала для охлаждения воды местной реки. Было запланировано увеличение мощности к 1976 г. до 250 МВт в Уайракей и до 90–120 МВт в месторождении Бродленд, расположенном северо-восточнее. Однако открытие в Новой Зеландии природного газа нарушило эти планы и в 70-е годы вообще не планируется дальнейшего освоения геотермальной энергии. Тем не менее правительство поощряет непосредственное использование термальных вод для теплоснабжения гражданских и промышленных объектов.

Наилучшие примеры такого использования имеются в Каверау и Роторуа. Департамент по научным и промышленным исследованиям и министерство труда Новой Зеландии совместно с целлюлозно-бумажной фирмой "Тасман" начали разведку в Каверау в 1952 г. С тех пор пробурено более 12 скважин. Пар из этих скважин используется для подогрева бойлерной воды с целью получения маловлажного пара для дробильных агрегатов. Кроме того, природный пар используется для сушки древесины, для привода машин, транспортирующих бревна, и для выработки электроэнергии мощностью 10 МВт. В городе Роторуа с населением 30 тыс. горячая вода более чем из 1000 скважин обогревает частные дома, школы, больницы, отели, коммерческие и промышленные предприятия. В гостинице, имеющей 100 номеров, работает геотермальная система кондиционирования воздуха. Стоимость ее сооружения оказалась не выше стоимости обычно применяемых систем, а стоимость эксплуатации лишь на 5% выше. В Роторуа средняя глубина скважин составляет 100–150 м, и лишь несколько скважин имеют глубину 250 м. Температура воды на таких малых глубинах превышает 120°, достигая 175°C. На выходе из скважин получается пароводяная смесь с температурой выше 100°C и неконденсирующиеся газы. Из-за коррозии и загрязнения, связанных с использованием такой жидкости, ее часто используют для обогрева обычной водопроводной воды, которая затем поступает к потребителям. В отличие от Исландии, где тепло-

снабжение осуществляется муниципальными властями, в Новой Зеландии оно производится частным порядком, но находится под наблюдением властей. Это особенно касается коррозии, выпеления сернистого водорода, сбросовых вод и загрязнений, а также влияния на соседние скважины.

Горячая вода из многих скважин в окрестности озера Таупо используется для теплоснабжения ферм. Примерами такого использования являются приготовление корма для свиней из пищевых отходов, обогрев скотных дворов, чистка лотков и стерилизация различного оборудования. Кроме того, экспериментальное лесничество использует пар для сушки семян и пиломатериалов, а также для обогрева грядок и парников.

В целом непосредственное использование геотермальной жидкости в Новой Зеландии, вероятно, превалирует над ее использованием для производства электроэнергии в Уайракей.

Соединенные Штаты Америки

Создание геотермальных электростанций продолжается в Долине Больших Гейзеров в Калифорнии, где первая турбина мощностью 12,5 МВт была установлена в 1960 г. Тихоокеанская фирма "Гэз энд электрик" покупает пар у фирм-производителей и преобразует его тепловую энергию в электрическую с помощью конденсационных турбин при расходе пара 9 кг/кВт·ч. В конце 1972 г. расход сухого пара составлял 2750 т/ч, что позволяло вырабатывать 302 МВт электроэнергии. Другая электростанция мощностью 110 МВт должна была дать ток в конце 1973 г. Сооружение еще одной электростанции такой же мощности должно быть закончено в 1974 г. Предполагается, что в 70-е годы ежегодный прирост мощности будет составлять 110 МВт, что позволит к 1980 г. вырабатывать 1180 МВт. К тому времени это будет самый большой в мире комплекс геотермальных электростанций.

Запасы месторождения в Долине Больших Гейзеров точно не известны. На основе различных оценок размеров месторождения, производительности скважин, их количества, а также общего запаса месторождения максимально достижимая вырабатываемая мощность геотермальных электростанций предполагается равной 1200–4800 МВт и более. К моменту написания настоящей книги было пробурено около 110 скважин на участке длиной 12 км при его максимальной ширине ~3 км. Примерно в 85 из них получен сухой пар. Границы месторождения известны лишь приблизительно: разведка продолжается на расстоянии многих километров от эксплуатационных скважин.

Были открыты неглубокая и более глубокая части бассейна, причем в первую пар, очевидно, поступает из второй вдоль разломов. Средняя производительность более глубокой части бассейна (глубина

более 500 м) составляет ~70 т/ч. Недавно было установлено, что снижение производительности, ранее обнаруженное в скважинах неглубокой части бассейна, происходит также и в скважинах более глубокой части бассейна (гл. 6).

Бассейн состоит из трещиноватых малоизмененных осадочных пород и вулканических пород позднего юрского и мелового периодов. Наибольшая глубина скважин превышает 2500 м без заметного снижения проницаемости пород. Источник питания месторождения неизвестен и изучается в настоящее время. Низкотемпературный метаморфизм, включающий отложение кремнезема и кальцита, может способствовать снижению проницаемости пород, но явных подтверждений этого нет. Температура в месторождении достигает ~250°C. Источником тепла, по-видимому, является магма на глубине ~5-8 км, которая при выходе на поверхность образовала ряд щелочных и кислотных вулканических пород. Эти породы по возрасту скорее всего относятся к плейстоценовому периоду, а по площади занимают район от 300 до 400 км².

В нескольких непродуктивных глубоких скважинах почти во всех случаях наблюдались высокие температуры. Относительно проницаемости пород до сих пор не выяснен вопрос, определяется ли она местными или региональными трещиноватыми структурами, минерализацией или осадкообразованием. Если месторождение в Долине Больших Гейзеров является системой с дефицитом воды, то продолжающаяся его эксплуатация может с течением времени привести к росту энтальпии жидкости.

Возможным препятствием этому является закачка в ограниченном количестве конденсата, отводимого от конденсационных турбин. В результате потерь связанных с испарением при охлаждении, остается лишь ~20% жидкости, которая сбрасывается. Высокое содержание бора и аммиака в конденсате делает невозможным его сброс в местные водостоки, расход воды в которых в течение года резко меняется. Закачка охлажденного конденсата в подземный бассейн на глубину ~2000 м, обеспечивающая питание грунтового горизонта, позволяет осуществлять повторное извлечение тепла месторождения. Однако это может привести к местному снижению энтальпии, а следовательно, к преобладанию жидкой фазы. Некоторые расчеты энтальпии для глубинных скважин показывают, что в бассейне содержится пароводяная смесь. В связи с этим крайне необходимы долгосрочные данные по изменениям энтальпии, расхода и давления в месторождении.

Значительные запасы геотермальной энергии были открыты в шести местах на западе Соединенных Штатов. В настоящее время наибольшее внимание уделяется месторождению в долине Импириал-Валли в Калифорнии, где действуют несколько фирм и правительствен-

ных учреждений. Бюро разработок полезных ископаемых США и Ведомство опреснения вод составили совместную программу разведки месторождений с целью выработки электрической энергии и опреснения воды для сельскохозяйственных нужд. Фирма "Магма энерджи" и ее партнеры также проводят бурение в этой долине с целью отыскания геотермальных вод для производства электроэнергии (с помощью теплообменников). Рассматривается полностью замкнутая система, в которой сбрасываемая жидкость закачивается в месторождение. Подписано соглашение с фирмой "Гэз энд электрик" в Сан-Диего о сооружении и обслуживании первой такой электростанции в Найленде в долине Импириал-Валли, которую предполагалось ввести в эксплуатацию в 1974 г.

В 1963 г. калифорнийская фирма "Стандард ойл" пробурила разведочную скважину западнее Броули. При бурении натолкнулись на рассол хлористого натрия с температурой $\sim 260^{\circ}\text{C}$. Этот рассол во многом сходен с рассолом месторождения Серро-Прието (Мексика) и, по-видимому, характерен для всего месторождения в долине Импириал-Валли.

При проведении разведочных работ в Найленде обнаружен высокотемпературный (до 370°C) и очень концентрированный рассол (до 26%). Найленд является наиболее северным и наиболее "солевым" месторождением в геотермальном районе длиной 150 км, простирающемся на север от Калифорнийского залива в Мексике. Данные измерений удельного электрического сопротивления подтверждают наличие градиента концентрации соли вдоль долины, возрастающего в северо-западном направлении. Экспериментальный генератор, введенный в действие в Найленде в начале 60-х годов, никогда не достигал установленной мощности, равной 3 МВт. В настоящее время он бездействует. В Найленде была сделана попытка извлечения различных хлоридов, особенно KCl. Конъюнктурные соображения, а также проблемы, связанные с коррозией, объемом производства и удалением сбросовых вод, помешали коммерческому развитию производства энергии и указанных химикалий. Однако в течение нескольких лет в конце 60-х годов был спрос на раствор хлорида кальция. Кроме того, более 30 лет из неглубоких скважин в северо-восточной части месторождения в Найленде получали двуокись углерода. Было пробурено более 65 скважин, и с 1933 по 1954 г. было получено $\sim 10^8$ м³ газа. Средний срок службы одной скважины составлял ~ 2 года, а средняя глубина скважин 150 м. Температура добываемого газа заключена в интервале от 50 до 75°C . Весь полученный газ был превращен в сухой лед для автомобильных или железнодорожных рефрижераторов.

Геотермальная жидкость наиболее успешно используется для отопления помещений на юге центральной части шт. Орегон. В Кла-

мат-Фолс около 350 скважин обеспечивают обогрев зданий с помощью теплообменников, в которых вторичной жидкостью является водопроводная вода. В других населенных пунктах шт. Орегон с помощью геотермальных вод обогреваются теплицы, лечебницы, бассейны, фермы и школы. Аналогично используется геотермальная энергия в шт. Калифорния (Калистога и Дезерт-Хот-Спрингс) и в шт. Айдахо (Бойзе), а также на фермах и в деревнях на западе США. Некоторые национальные парки и парки штатов, такие, как Йеллоустонский, Лассен-Волканик и Катмай, расположены вокруг основных геотермальных месторождений. В некоторых пустынных местностях пар из фумарол конденсируют для получения воды. Необычно применение горячей воды из скважин в Стимбот-Спрингс (шт. Невада): здесь геотермальная энергия используется для получения пластической взрывчатки.

С 1967 по 1969 г. в Йеллоустонском национальном парке Американское управление по геологической разведке пробурило тринадцать опытных скважин с наибольшей глубиной, несколько большей 300 м. Максимальная температура составляла -240°C . Одна скважина давала преимущественно сухой пар, а другие — пароводяную смесь с различным содержанием пара. Так как этот район, известный своими гейзерами, а также фумаролами и горячими источниками, является национальным парком, он не подлежит освоению.

Фирма "Юнион ойл" последней проводила разведку Валлес-Кальдеры на севере центральной части шт. Нью-Мексико. Было пробурено пять разведочных скважин, наименьшая глубина которых составляла 1600 м, а температура -250° . Скважина, пробуренная в 1970 г., дает в основном сухой пар, а другие скважины — пароводяную смесь с различным содержанием пара, образующегося после вскипания.

В скважинах в Брэдис-Хот-Спрингс и Беоваве (шт. Невада) температура пород составляет более 200°C , а в скважинах в Клир-Лейк (шт. Калифорния), Стимбот-Спрингс (шт. Невада), Каса-Дьябло (Лонг-Валли, шт. Калифорния), в Серпрайз-Валли (шт. Калифорния) не менее 175°C .

При разведке нефти на побережье Мексиканского залива были открыты гидрогеологические системы с высокой температурой и давлением. Максимальная температура, равная 273°C , была измерена на глубине 5859 м. Столь большая глубина продуктивных бассейнов (минимальная глубина составляет 2500 м при температуре 120°C) и проблемы, связанные с выработкой энергии, использованием и сбросом вод, явились препятствием для коммерческого освоения месторождения.

В общей сложности разведочные скважины пробурены более чем в 35 районах. Однако во многих случаях результаты неубедительны

либо из-за недостаточного объема работы, либо из-за ее недостаточной целенаправленности. Работы по разведке месторождений продолжаются, как и в прошлые годы, в шт. Калифорния, Невада и Орегон, а также в шт. Айдахо, Юта, Нью-Мексико, Аризона и в прилегающих к ним районах.

Исландия

Исландия была первой страной, применившей в 30-е годы геотермальную воду для коммунального теплоснабжения. Около 50% населения страны, составляющего 200 тыс., используют тепло, извлеченное из глубин земли, причем в настоящем десятилетии эта цифра должна возрасти до 60%. Девять из десяти домов Рейкьявика получают геотермальную воду для обогрева помещений, распределяемую муниципальными властями, ведающими теплоснабжением. Геотермальная вода с низкой энтальпией в Рейкюре и в самом Рейкьявике (месторождение Лойгарнесс) имеет температуру 98 - 146°C. Всего здесь пробурено более 100 скважин. Наибольшая глубина одной из скважин в Рейкьявике достигает 2200 м. Осваивается еще одно месторождение Эдлидаар, содержащее воду с низкой энтальпией и расположенное в 3 км от Рейкьявика. Предполагается, что его энергия будет использована для расширения системы теплоснабжения в Рейкьявике. Бетонированный трубопровод, состоящий из двух стальных параллельных труб диаметром 35 см, обеспечивает передачу горячей воды на расстоянии более 18 км с понижением температуры не более чем на -5°C. Потребитель получает воду при температуре - 80°C. Так как содержание солей в воде из этих геотермальных месторождений необычайно низко (менее 0,04%), то требуется только сепарация содержащихся газов.

Системы теплоснабжения, которые действуют или сооружаются в настоящее время в остальной части Исландии, должны удовлетворить потребности в энергии еще дополнительно 25 000 человек, проживающих в основном в маленьких городах и деревнях на юго-западном побережье и на севере центральной части острова. Геотермальные теплицы, расположенные в юго-западной части Исландии, снабжают Рейкьявик свежими овощами. Кроме того, повсюду в западной и северной частях страны созданы теплые купальни и бассейны для плавания.

Богатые пласты диатомита, залегающие под озерными отложениями, высушиваются паром, получаемым из геотермального месторождения в Намафьядль вблизи озера Миватн на севере Исландии. Там же с 1969 г. работает геотермальная электростанция мощностью 3 МВт. Разведочные работы начались в Намафьядле в 1947 г. в связи с попытками извлечения серы из фумарольного поля. При бурении были обнаружены подземные воды с высокой энтальпией и тем-

пературой более 260°C ; максимальная температура равна 286°C . Было пробурено семь скважин средней глубиной ~ 700 м и наибольшей глубиной более 1380 м. Четыре из этих скважин действующие, их производительность составляет 1800 т/ч перегретой воды. Пар с расходом ~ 240 т/ч сепарируется от воды и используется на электростанции и диатомитовой фабрике. Вода, содержащая в основном бикарбонат натрия и кремнезем, не очень минерализована. Содержание газа такое же, как и в месторождении Лардерелло (Италия). Ряд неглубоких скважин дают почти сухой пар.

В 1967 г. корпорация "Джонс Мэнвилл" совместно с исландской фирмой "Кизиладельн" начала добычу диатомита в Намафьядль. Пар покупается у правительства Исландии. К 1970 г. производство обработанного диатомита было удвоено по сравнению с первоначальным его объемом и составило 24 000 т/год. Одновременно фирма "Лакса пауэр уокс", которая вырабатывает электроэнергию мощностью 22 МВт в основном с помощью гидроэлектростанций, построила геотермальную электростанцию с турбиной без конденсатора мощностью 2,5 МВт. Вскоре мощность этой турбины должна быть доведена до 3,4 МВт. Для использования тепла сбросовых вод сооружается система районного теплоснабжения.

В Исландии рассматриваются и другие возможности использования геотермальной жидкости. По экономическим причинам прекращена работа экспериментальной установки по производству соли. Проводятся опытные работы по высушиванию морских водорослей с использованием геотермального тепла (вода при 100°C) для получения солей алгиновой кислоты. Геотермальные воды, по составу близкие к морской воде, изучаются с целью получения из них различных химикалий, включая окись магния, столовую соль и бром. Рассматривается также вопрос замораживания рыбы, основного продукта экспорта Исландии. В 50-х годах, когда разрабатывались современные ядерные реакторы, оценивалась возможность получения из геотермальных жидкостей тяжелой воды D_2O . Процесс оказался рентабельным, однако в те времена отсутствовал спрос на D_2O .

Наиболее благоприятны в Исландии оказались условия для использования турбин без конденсатора, так как тепловая энергия обходится дешево и ее много, а преимущества, связанные с установками больших размеров, не используются, поскольку население невелико и живет в деревнях и на фермах, разбросанных на большой территории. Наиболее эффективной является система многочисленных электростанций небольшой мощности, вырабатывающих дешевую электроэнергию. Экономия жидкого топлива благодаря геотермальному теплоснабжению Рейкьявика составляет 200 000 т/год. Кроме того, требовалось бы еще 200000 т жидкого топлива для существующих парников и теплиц. В целом это дает существенную экономию для небольшой страны. Если бы все это тепло обеспечивалось с по-

мощью электроэнергии, что само по себе является не самым дешевым и поэтому не идеальным методом для сравнения, то в часы пик потребовалось бы ~200 МВт вырабатываемой электроэнергии.

В Исландии известны четыре высокотемпературных геотермальных месторождения, три из которых находятся на юго-западе и одно — на севере центральной части страны. В последнем, около озера Миватн, температура в забое скважины равна 280°C. Территория месторождения составляет 50 км² и включает в себя геотермальное поле в Намафьядль.

На юго-западе Исландии в направлении с юго-запада на северо-запад с интервалами ~30 км расположены три больших месторождения (Рейкьянес, Кризувик и Хенгидль) с температурами, соответственно равными 280, 220 и 260°C. Месторождение в Хенгидль, занимая площадь 70 км², является самым большим и включает в южной своей части очень важное геотермальное поле Хверагерди. Здесь было пробурено не менее восьми глубоких и множество неглубоких скважин. Самая глубокая скважина в Хверагерди имеет глубину ~1200 м и дает перегретую воду. Более 25% воды после вскипания на выходе из скважины переходит в пар. Планируется сооружение электростанции мощностью от 13 до 32 МВт. В Рейкьянесе пробурено семь скважин. Максимальная глубина составляет 1750 м. Скважины дают рассол с содержанием хлоридов более 2,9%. Считается, что этот раствор образовался из морской воды путем сепарации пара при температуре 270°C. В настоящее время рассматривается вопрос о создании системы для извлечения из такой жидкости различных солей наряду с производством электроэнергии. Планируется транспортировка в столицу перегретой воды для отопления помещений из Кризувика, расположенного на 30 км южнее, в случае, если рост потребления превысит мощность геотермальных полей в Рейкюре и Рейкьявике (Лойгарнесс). В Кризувике большие расходы перегретой воды обеспечиваются более чем дюжиной скважин глубиной ~1200 м.

Эти и другие высокотемпературные геотермальные поля находятся в зонах коровых рифтов и активной вулканической деятельности в Исландии. На восток и на запад от этих зон расположены обширные покровы базальтов позднечетвертичного периода, которые изобилуют теплыми и горячими источниками. Высокотемпературные подземные бассейны тем не менее связаны с четвертичным рифтом. Многие из них залегают в дацитовых и риолитовых вулканических породах позднечетвертичного периода, а не в платобазальтах. Взаимосвязь высокотемпературных месторождений с кислыми вулканическими породами наблюдается в районах Миватн, Аскья, Гейзир, Хенгидль и по крайней мере в шести других районах. Лишь в области от Рейкьянеса до Кризувика длиной ~30 км кислый вулканизм отсутствует.

Проницаемость пород в самих месторождениях контролируется литологией и структурами. Подъем горячих вод к поверхности в основном определяется структурами.

Низкотемпературные месторождения освоены и эксплуатируются в нескольких районах юго-западного, западного и северо-западного побережий Исландии. В Хлидардалуре, расположенном в 35 км юго-восточнее Рейкьявика, скважина, пробуренная на глубину 1500 м в область с высоким градиентом температуры, оказалась непродуктивной. Измерения температуры, оказавшейся равной -15°C на глубине 700 и 800 м, показали возможность образования бассейна, который и был искусственно создан и обеспечил расход воды, представляя собой, вероятно, первый в мире опыт такого рода. Более чем в шести местах в западной и северной Исландии горячая вода добывается из скважин при температурах от 90 до 180°C . Эти скважины, которые в настоящее время не используются, являются возможными источниками горячей воды для сельского хозяйства и для отопления помещений. В большинстве случаев качество воды очень высокое. Лишь в одном или двух случаях сообщалось о геотермальном нагреве морской воды, однако менее соленой, чем вода в Рейкьянесе, и представляющей собой низкотемпературную систему. Такие месторождения с низкой энтальпией почти исключительно связаны с центрами базальтового вулканизма.

Япония

Освоение геотермальной энергии началось в Беппу (остров Кюсю) в 1919 г., а в 1924 г. здесь вырабатывалась электроэнергия мощностью 1 кВт. Несколько ранее геотермальную энергию стали использовать для обогрева теплиц. Промышленное освоение геотермальной энергии началось сразу же после второй мировой войны, разрушившей промышленную базу Японии. Агентство по науке и технике, включающее Геологическое управление, ряд частных фирм, занимающихся производством электроэнергии, а также бурильные и горнодобывающие фирмы и власти префектур независимо друг от друга и совместно начали разведку геотермальных месторождений в Японии.

В 1951 г. опытные работы в Беппу увенчались постройкой электростанции, вырабатывающей 30 кВт электроэнергии. Еще ранее фирма "Тоун боринг" начала осуществлять программу по бурению скважин в нескольких районах страны. В Юносаве, на юге центрального побережья острова Хонсю, в 1948 г. было закончено сооружение работающей на геотермальном паре опытной электростанции мощностью 8 кВт. В Хаконе, также находящемся в южной части центрального побережья острова Хонсю, в 1960 г. началась выработка электроэнергии мощностью 30 кВт с использованием пара,

извлекаемого из неглубокой скважины. Электростанция снабжает электроэнергией гостиницу. Опытное производство электроэнергии было осуществлено также на острове Хоккайдо (Атагава) и на севере острова Хонсю (Наруго).

Термальные источники Японии уже в течение нескольких веков используются в лечебных целях. Япония, вероятно, опередила другие страны мира по использованию термальных вод для ванн, водолечебниц и для лечения минеральными водами на курортах, которых в стране насчитывается тысячи. Сравнительно недавно созданы вулканические заповедники, такие, как Хатимантай. Системы теплоснабжения в Японии развиты не столь широко, как в Исландии и Советском Союзе. Четыре районные системы теплоснабжения действуют в Японии с 1969 г., причем использование термальных вод (температуры не более 70°C) позволяет сэкономить 5000 т жидкого топлива в год.

Обогрев теплиц геотермальными водами применяется на фермах и опытных сельскохозяйственных станциях, расположенных в основном на юге центральной части острова Хонсю. Несколько таких теплиц имеется в окрестности Бешу и в районе геотермальной активности в Сикабе на острове Хоккайдо. В теплицах выращивают овощи, фрукты и другие культуры. На двух фермах выращивают цыплят. В одном водоеме разводят угрей и карпов, в другом — аллигаторов.

Имеется ряд специальных промышленных производств. Так, на о. Кюсю из фумарольных отложений извлекается сера. В Бешу вода с температурой 98°C используется для обработки риса для пекарни (30 т в год). В Сикабе на острове Хоккайдо получают соль из морской воды путем испарения. Для этого используются геотермальные воды и пар, получаемые из скважины глубиной 70 м. Пока это производство дает лишь 150 т соли в год. Запланировано совместное производство геотермальной электроэнергии мощностью 7 МВт и 100 000 т соли ежегодно, а также некоторое количество опресненной воды. На производстве будет применена система многоступенчатой вакуумной дистилляции.

В 1952 г. начались разведочные работы в Мацукаве (север острова Хонсю), где были пробурены скважины для получения пара, используемого для водолечебниц. Здесь же в 1956 г. фирма "Джапан метал энд кемикэлз" начала разведку геотермальной энергии. В 1958 г. к ней присоединилась Геологическая служба, а затем и другие организации. С 1952 г. здесь было пробурено девятнадцать скважин. Из них шесть являются продуктивными, их средняя глубина - 1200 м. Расход сухого пара, добываемого из пяти скважин и предназначенного для работы электростанции, составляет в среднем 110 т/ч. Две скважины дают пароводяную смесь с соотношением

пара и воды ~4:1. Температура в бассейне составляет ~240–250°C, т. е. приблизительно такая же, как в Долине Больших Гейзеров в Калифорнии (США). Вмещающими породами месторождения являются трещиноватые сваренные дацитовые туфы и лавы (игнимбриты), вероятно, плиоценового периода. Они лежат на миоценовых песчаниках и глинистых сланцах, раннетретичных "зеленых туфах" и на палеозойских сланцах и кремнистых известняках. На поверхности залегают четвертичные андезиты и сложные образования очень молодых вулканов. Вулкан Марумори расположен в котлообразной кальдере площадью -10 км².

Сооружение электростанции в Мадукаве началось в 1961 г. Первоначальная мощность составляла 9 МВт, затем она была повышена до 20 МВт, в 70-е годы по плану должна была составить 27 МВт при дальнейшем ее увеличении до 60 МВт. Неконденсирующиеся газы, содержание которых составляет в среднем 0,5%, удаляются в атмосферу. Конденсат из конденсационной турбины сбрасывается в естественные водостоки пока без вредных последствий.

В Отаке на острове Кюсю разведка месторождения началась в 1953 г. В 1967 г. группой фирм во главе с "Кюсю электрик пауэр" здесь было завершено строительство электростанции мощностью 13 МВт. В Отаке было пробурено десять скважин и две в Хачобару, расположенном южнее. Пять скважин подсоединено к конденсационной турбине. Одна из них выдает сухой пар с расходом - 37 т/ч. Расходы через другие скважины существенно выше (>540 т/ч), однако они выдают пароводяную смесь при содержании пара от 10 до 25%. Неконденсирующиеся газы составляют менее 0,5% веса пара. Жидкость месторождения содержит 0,4% поваренной соли. Максимальная температура в бассейне равна ~200°C. Максимальная глубина скважин в Отаке составляет 900 м, а в Хачобару одна из скважин имеет глубину 785 м.

Район сложен плейстоценовыми андезитами, туфобрекчиями и редкими слоями пемзы, залегающими на голоценовых осадочных породах и вулканических пеплах. Вулканическое сооружение четвертичного периода испытало значительные сбросы, образовавшие опущенный блок. Интенсивные гидротермальные и тепловые проявления, по видимому, обусловлены хорошей проницаемостью перекрывающих пород. Широкий интервал изменений расхода и паросодержания в различных скважинах позволяет предполагать, что проницаемость и запасы жидкости в отдельных частях поля ограничены. Однако не было пробурено глубоких скважин, и возможно, что основной бассейн еще не обнаружен.

Так как месторождение в Отаке расположено на территории Национального парка Ассо, то для сооружения здесь электростанции потребовалось специальное разрешение. Чтобы не загрязнять естест-

венные водостоки, сбросовые воды перекачиваются в расположенное рядом с электростанцией водохранилище. Судя по величине и пульсациям давления, срок службы существующих скважин будет непродолжительным. Отложения кремнезема в трубопроводах для сбросовых вод явились причиной снижения выработки электроэнергии в 1968 и 1969 гг. В настоящее время изучается вопрос о возможном регулировании количества отложений. Для одной скважины определено количество кислоты, необходимое для регулирования содержания карбоната кальция. Несмотря на указанные проблемы, запланировано бурение дополнительных скважин, а мощность электростанции должна возрасти в течение ближайшего десятилетия до ~180 МВт.

Всего в Японии разведочные буровые работы были проведены в 23 районах. Признано целесообразным осваивать некоторые из них, в том числе наиболее крупные месторождения в Сикабе на о. Хоккайдо, в нескольких местах вблизи Мацукавы, в Оникобе южнее Мацукавы и в Такиноуэ и Хачобару вблизи Отаки.

В районе вулкана Хатимантай на северо-западе от Мацукавы проведены обширные геофизические работы. Пробурено девять скважин со средней глубиной ~750 м. В южной части исследованного района температура воды составила 200°C, а паросодержание превысило 30%. Разведочные работы продолжаются и рассматривается вопрос о сооружении здесь электростанции мощностью 10 МВт. Геологическая структура в Такиноками, расположенном юго-западнее от Мацукавы, аналогична. Здесь в скважине глубиной 400 м были проведены измерения температур через каждые 50 м (максимальная температура составила ~200°C). Скважина выдает пароводяную смесь.

Разведочные работы в Оникобе начались в 1962 г. Площадь этого бассейна составляет 60 км². Здесь имеется множество фумарол и термальных источников. Разведка включала составление геологических карт, проведение геофизических съемок и разведочного бурения. Из десяти таких скважин с максимальной глубиной более 700 м и температурой 190°C выбраны продуктивные, которые в настоящее время подготавливаются к эксплуатации. Производительность одной из скважин составляет ~30 000 кг/ч перегретого пара.

Исследование месторождения в Такиноуэ проводится с начала 50-х годов. В 1962 г. были пробурены две скважины глубиной ~250 м. Температура в забое скважин составляет ~200°C. Одна из скважин через некоторое время стала непродуктивной, что свидетельствует об ограниченной проницаемости бассейна. Другая скважина продолжает выдавать насыщенный пар с расходом 3 т/ч. Эта скважина усиленно изучается. В 1970 г. должно было быть проведено дополнительное бурение.

Проводятся также разведочные работы в центрах вулканической активности на острове Хоккайдо - Кусиро и Шова-Шиндзян; в районе

вулкана Насу, расположенного в центре острова Хонсю; в Хаконе и Атагава на южном побережье острова Хонсю; в Осиракаве на западе центральной части острова Хонсю и в нескольких местах на юге острова Кюсю. Многие скважины неглубокие, поэтому разведку нельзя считать окончательной. Около вулкана Насу и на юге острова Кюсю находятся бассейны с температурами, соответственно равными 194 и 170°C.

В целом для Японии характерна взаимосвязь высокотемпературных месторождений с дацитовыми или дацит-риолитандезитовыми вулканическими породами, как и для Исландии, Новой Зеландии, Соединенных Штатов. Однако японские месторождения не имеют столь высоких температур, которые свойственны месторождениям, связанным с кислыми вулканическими породами в Новой Зеландии и Исландии. Производительность скважин в японских месторождениях отличается очень сильно, и, вероятнее всего, это связано со структурой, а не междузернистой проницаемостью. В действительности ограниченная проницаемость может являться определенным препятствием для освоения. В Японии не хватает органических топлив, и поэтому изыскания активно проводятся по всем направлениям.

Советский Союз

В 1969 г. сообщалось об освоении в Советском Союзе геотермальной энергии в одиннадцати местах. К наиболее важным из них относятся геотермальная электростанция в Паужетке, опытная геотермальная электростанция с фреоновым теплообменником в Паратунке и системы отопления помещений в Махачкале. Планируется также использование термальных вод для отопления помещений на Кавказе, в Западной Сибири, Центральной Азии и в северо-восточной части Сибири.

Паужетка расположена на юге Камчатки в районе активной вулканической деятельности. Здесь имеется несколько больших термальных источников, фумарол и гейзеров. Вулкан Кошелева с выходами фумарол расположен юго-западнее. Буровые работы на Паужетке начались в 1957 г. К 1967 г. была пробурена 21 скважина. Восемнадцать из них глубиной 200–1200 м считаются продуктивными. Скважины вскрыли почти горизонтальное залегание; четвертичные дациты и андезитовые туфы и агломераты, а также перекрывающие их третичные туфогенные осадки разбиты разломами на горсты и грабены. Эта структура обрушилась с образованием кальдеры. Выходы тепла локализируются по краю кальдеры и вдоль докальдерных разломов.

Теплоносителем служит горячая вода, содержащая в значительных количествах хлориды натрия и калия. Вода не столь соленая, как геотермальные жидкости в Ауачапане (Сальвадор) или в Серро-

Прието (Мексика), но аналогична им по составу. Максимальная температура в месторождении на глубине 400 м достигает 200°C, но энтальпия даже в более глубоких скважинах не превышает 815 кДж/кг. При вскипании образуется -15 - 20% пара.

Сооружение электростанции мощностью 5 МВт началось в 1964 г. и закончилось в 1967 г. На электростанции используется пар, получаемый из 3-7 скважин. Планируется увеличение мощности электростанции в два этапа. На первом этапе должны быть переоборудованы две основные турбины; на втором должны быть установлены дополнительные турбины низкого давления, чтобы довести общую мощность станции к 1980 г. до 22-25 МВт. Электроэнергия мощностью 2-3 МВт, вырабатываемая на Паужетской электростанции, поставляется потребителям на расстояние 27 км. Стоимость ее на 30% меньше стоимости электроэнергии, вырабатываемой при использовании жидкого топлива¹⁾

Проводится эксперимент по отбору тепла от геотермальных вод в поселке Паратунка, расположенном недалеко от Петропавловска на восточном побережье Камчатки. Здесь с 1967 г. работает электростанция с фреоновым теплообменником мощностью 680 кВт. После длительных испытаний в 1970 г. началась эксплуатация электростанции, обеспечивающей энергией совхозы, расположенные около Паратунки. На станции установлены две турбины мощностью 340 кВт и используется вода из неглубоких скважин с температурой 81°C. Избыточное тепло применяется для обогрева теплиц и парников, а теплая вода используется для полива растений. Планируется использовать имеющиеся здесь термальные воды с температурой до 80°C для отопления жилых домов, для водолечебниц и плавательных бассейнов.

В целом ряде пунктов, расположенных в зоне 500 км к северу от Кавказского хребта, широко осваиваются системы теплоснабжения, использующие геотермальное тепло. В городе Махачкале, расположенном на побережье Каспийского моря, начиная с 1947 г., когда при поисках нефти были случайно обнаружены месторождения термальных вод с температурой 60-70°C эти воды используются для обогрева помещений. Население одного из районов Махачкалы численностью 15 тыс. человек получают горячую воду из городской геотермальной системы. Геотермальные воды используются в качест-

¹⁾ К юго-западу от Паужетки расположен крупный Кошелевский вулкан с молодыми дацитовыми экструзиями. На его отрогах выходят паровые струи с температурой 124°C, а на вершине - фумаролы. Бурение до глубины 1000 м вывело сухой перегретый пар с температурой 153°C. По прогнозам Института вулканологии СО АН СССР, здесь можно построить геотермальную электростанцию мощностью до 420 МВт [3*]. - *Прим. ред.*

ве питательной воды для котельной установки нефтеочистительного завода, а также для обогрева парников и работы бань. Горячие термальные воды применяются также в городе Грозном, расположенном северо-западнее, а также в Кабардино-Балкарии, в Черкесске и в окрестностях Майкопа.

Только в Кабардино-Балкарии, где осуществляется один из самых современных проектов, экономия жидкого топлива составляет 2500 т/год. Около Черкесска температура получаемой воды составляет 47°C , а под Майкопом 86°C , хотя температура в месторождениях у забоя скважин равна $100\text{--}150^{\circ}\text{C}$ ¹⁾.

Большая часть этих вод почти не минерализована, что позволяет их использовать непосредственно. Однако в ряде случаев минерализация достаточно велика, и поэтому приходится передавать тепло обычной пресной холодной воде.

Другие проекты по использованию геотермальной энергии осуществляются в Грузии на побережье Черного моря, а также около Каспийского моря вблизи границы с Ираном, в нескольких местах северо-восточной Сибири, в городах Омск и Томск в Западной Сибири, в некоторых пунктах вблизи Ташкента в Центральной Азии и на берегах озера Байкал. Автору неизвестны точные данные по общему потреблению геотермальной энергии в СССР, однако он полагает, что потребляемая энергия в указанных географических районах, по-видимому, эквивалентна энергии, получаемой при сжигании 10^6 т/год жидкого топлива.

Разведка высокотемпературных месторождений продолжается на Камчатке и на одном из Курильских островов - Кунашире. В дополнение к основным месторождениям в Паратунке и Паужетке проводится геологическое, геофизическое и геохимическое исследования и буровая разведка месторождений Больше-Банного, Узоно-Семячского, Нальчского, в Долине Больших Гейзеров и шести других районах Камчатки.²⁾ В Больше-Банном месторождении, находящемся в

¹⁾ В забое скважин на глубине $\sim 3,5$ км достигается температура $\sim 185^{\circ}\text{C}$ [5*]. Дебит фонтанирующих скважин составляет $60\text{--}100$ м³/ч термальных вод. Высокотемпературные воды и пароводяные смеси пригодны в этих районах для выработки электроэнергии без крупных затрат путем использования непродуктивных нефтяных и газовых скважин. В районе Прикумьска можно ожидать пароводяную смесь с температурой в устье скважины $130\text{--}140^{\circ}\text{C}$ из нижнемеловых отложений на глубине $3\text{--}3,5$ км. В Прасковейских скважинах на глубине $3100\text{--}3434$ м зарегистрирована температура $117\text{--}120^{\circ}\text{C}$ [2*]. - *Прим. ред.*

²⁾ Тепловая мощность этих месторождений, по оценкам Института вулканологии СО АН СССР, достаточна для постройки геотермальной электростанции мощностью до 365 МВт, а при освоении месторождения до глубины 3 км запасы мощностей возрастут до $400\text{--}800$ МВт [3*]. - *Прим. ред.*

30 км западнее Паратунки, максимальная температура в забое пробуренных скважин составляет 171°C ¹⁾.

Проводятся поиски термальных вод (с низкой энтальпией) для отопления помещений и для использования в сельском хозяйстве в Грузии, в низменных районах Западной Сибири, на северных склонах Памира, Тянь-Шаня и Алтая. В Западной Сибири обнаружены обширные подземные хранилища воды с температурой до 120°C . Широко используются бурение для определения геотермического градиента, а также геохимические и сейсмические методы разведки²⁾.

Венгрия

В юго-западной части Венгрии, вблизи границы с Югославией, обнаружен обширный бассейн термальных вод. Хотя температуры в бассейнах недостаточно высоки для производства электроэнергии при современном уровне техники, однако термальные воды широко используются для теплоснабжения. К началу 1970 г. было пробурено 80 скважин глубиной 1800–2000 м. Температура воды на таких глубинах составляет $85 - 110^{\circ}\text{C}$. Градиенты температуры равны $35 - 55$ град/км, что необычно для таких мощных осадочных толщ. Как и другие области с большим градиентом температуры, например на побережье Мексиканского залива в США, венгерский бассейн геотермальных вод не содержит вулканических пород четвертичного периода с высокотемпературными поверхностными водами. Само месторождение сложено осадочными породами третичного и четвертичного периодов (включая высокопористые песчаники) мощ-

¹⁾ Производительность этого месторождения, по данным разведочного бурения, составляют 169 кг/с пароводяной смеси при теплосодержании 710 кДж/кг, что обеспечивает строительство геотермальной станции мощностью 15 МВт. Однако за счет освоения горизонтов месторождений на глубине $1,5 - 2$ км возможно увеличение мощности станции до 25 МВт [3*].

Обсуждается идея строительства геотермальной электростанции с использованием тепла периферического вулканического очага Авачинского вулкана с предполагаемым объемом ~ 100 км³, содержащим $4 \cdot 10^{16}$ Дж возобновляемого тепла [4*]. По геологическим данным установлено, что Авачинская группа вулканов расположена в вулcano-тектонической депрессии с максимальным погружением верхнемелового фундамента до $1,2$ км ниже уровня моря. На основе геофизических данных можно предположить, что периферический вулканический очаг лежит на границе верхнемелового фундамента и вулканической толщи. Предполагается возможность стимулирования вулканического очага для повышения эффективности отбора тепла. — *Прим. ред.*

²⁾ Разрабатываются проекты использования тепла, аккумулированного горячими сухими горными породами, имеющими на глубине $6 - 8$ км температуру $150 - 250^{\circ}\text{C}$. Предполагается создание ряда опытных тепловых котлов в районах северо-востока страны для оттаивания пород вечной мерзлоты на горнодобывающих предприятиях [1*].

ностью в несколько тысяч метров. Средняя производительность скважин составляет 80–90 м³/ч. Поскольку вода содержит карбонат кальция, то ее отстаивают в резервуарах, чтобы соли не попадали в систему теплоснабжения. Скважины периодически восстанавливаются.

Правительство ВНР способствует интенсивному развитию систем теплоснабжения в области Чонград. По иронии судьбы, планы по снабжению г. Сегед природной горячей водой заброшены из-за того, что при бурении на горячие воды было открыто крупнейшее в стране месторождение нефти и газа. Тем не менее с помощью термальных вод осуществляется теплоснабжение около 1200 жилых домов, а также государственных и торговых помещений в Сегеде. Геотермальные воды используются также для обогрева теплиц, скотных дворов и других сельскохозяйственных построек, а также для сушки зерна. В целом с помощью геотермальных вод обогреваются помещения объемом более 10⁶ м³, причем стоимость такого обогрева ниже, чем при использовании обычных топлив (табл. 2). Использование термальных вод для теплоснабжения позволяет сэкономить ~80 000 т жидкого топлива ежегодно.

Ожидается, что объем геотермальных разработок в ближайшем десятилетии будет расти на 15% в год, в основном в области сельского хозяйства.

Мексика

В начале 1973 г. в Серро-Прието в Нижней Калифорнии должна вступить в строй электростанция мощностью 75 МВт. Это не первая мексиканская геотермальная электростанция. С 1960 г. в Патэ (Гидальго) действует экспериментальная установка. В Патэ было пробурено 14 скважин, и на базе одной из них генератор, рассчитанный на 3500 кВт, вырабатывает электроэнергию мощностью ~500 кВт. Патэ расположено в зоне активной вулканической деятельности, пересекающей центральную часть Мексики с востока на запад — от Тихого океана до равнины, примыкающей в Калифорнийскому заливу. Разведка геотермального бассейна в Патэ началась в 1955 г. Бассейн приурочен к мощной толще измененных и трещиноватых андезитов и базальтов третичного периода. Ниже залегают известняки мелового периода, а сверху вся толща перекрыта туфами и осадочными породами четвертичного и поздне третичного возраста. Скважины дают пар или пароводяную смесь, однако лишь четыре скважины имеют стабильный расход. Теплоноситель извлекается с различных глубин, так как проницаемость, по-видимому, определяется структурами. Низкая продуктивность каждой скважины и преобладание сухого пара свидетельствует о малой проницаемости и ограниченном содержании воды в бассейне. Полагают, что в известняках мелового периода имеется более глубоко залегающее месторождение, которое еще не обнаружено.

Геотермальное поле Серро-Прието, расположенное в 30 км к югу от г. Мехикали, находящемся на границе с США, является самой южной разведанной частью рифта, который тянется на несколько сотен километров с севера, от озера Солтон-Си в США до Калифорнийского залива. В Соединенных Штатах разведка проводится в нескольких частях этого рифта. В Серро-Прието фумаролы и грязевые вулканы, связанные с дацитобазальтовым вулканом, расположенным вдоль предполагаемого разлома Сан-Ясинто, привлекли внимание геологов в конце 50-х годов. Были пробурены 23 глубокие скважины, из которых 15 являются продуктивными. Средний расход перегретого рассола составляет ~ 230 т/ч. Около 20% жидкости при вскипании превращается в пар, что дает возможность в среднем получать от одной скважины электроэнергию мощностью ~ 5 МВт, хотя в отдельных скважинах паросодержание изменяется от 13 до 25%. Наиболее продуктивная скважина дает ~ 700 т/ч рассола, что эквивалентно мощности 15 МВт. Средняя глубина скважин составляет ~ 1500 м. Одна из скважин на глубине 2600 м достигла кристаллического фундамента. Пористые песчаники встретились на глубинах от 600 до 1200 м и более 2400 м. Будут использоваться лишь менее глубокие бассейны с температурой, превышающей 300°C. Самая высокая зарегистрированная температура равна 388°C.

Повсюду в рассматриваемом рифте осадочные породы позднекрейцбергского и четвертичного возраста мощностью в несколько тысяч метров заполняют громадный открытый ров, образовавшийся при отделении Нижней Калифорнии и примыкающей к ней Калифорнии от континента. Проявления вулканической деятельности здесь локализованы. Полагают, что источником тепла является магма из верхней мантии Земли, которая здесь находится на глубинах 15–20 км. Когда в эти осадочные породы может поступать из системы реки Колорадо.

Геотермальная жидкость в бассейне содержит от 1,3 до 2,5% растворенных твердых веществ, в основном хлоридов натрия и кальция. Хотя возможно рентабельное извлечение таких веществ, как хлорид калия, литий и бор, однако при сооружении первой электростанции не запланировано создание соответствующего производства. Сброс отработанных вод будет осуществляться по канавам в Рио-Харди – рукав реки Колорадо, а затем в Калифорнийский залив. Была высказана определенная тревога по поводу вредного влияния сброса вод на окружающую среду при продолжительной работе электростанции, и поэтому сейчас рассматриваются возможности закачки сбросовых вод в месторождение или создания специального водохранилища. Другими проблемами являются коррозионное действие соляного раствора и возможность оседания почвы, связанного с эксплуатацией месторождения.

Тем не менее начиная с 1972 г. приступили к бурению еще одной группы скважин для снабжения паром второй электростанции мощностью 75 МВт, которая должна вступить в строй к 1980 г. В Серро-Прието доставлены буровые установки, работающие на природном паре. Это должно несколько снизить стоимость бурения. Вода, получаемая при конденсации пара, используется при строительных и эксплуатационных работах в этом крайне засушливом районе. Бурение проведено лишь на небольшой части геотермального месторождения в Серро-Прието и предполагается, что потенциальные запасы энергии здесь во много раз больше тех, которые будут использованы в данном десятилетии. Работы по разведке и освоению проводятся Мексиканским национальным агентством по электроэнергетике под руководством Федеральной комиссии по электроэнергетике.

Несколько высокотемпературных фумарольных и термальных систем было разведано в зоне вулканического пояса Мексики, тянущегося с востока на запад страны. В этой зоне имеется много действующих вулканов и большое число проявлений вулканизма четвертичного периода. Была проведена тщательная разведка в пяти районах зоны (с запада на восток): Примавера в шт. Халиско; Лос-Негритос, Ислан и Лос-Адуфрес в шт. Мичоакан, Лос-Хумерос в шт. Пуэбла. Эта зона вулканов и отдельных проявлений тепловой энергии Земли тянется более чем на 700 км. Примавера занимает окраинные части низинной области, образовавшейся в кальдере четвертичного периода. Перегретый пар выходит в фумаролах через измененные риолиты при температурах до 100°C. В 1970 г. здесь были проведены геофизические и геохимические работы. Лос-Негритос является, по-видимому, наиболее известным из всех этих геотермальных полей и занимает часть кальдеры, стены которой сложены кислыми туфами, базальтовыми потоками и озерными осадочными отложениями. Температуры в фумаролах достигают здесь 95°C. Результаты интенсивных геологических, геофизических и геохимических работ указывают на существование большого высокотемпературного бассейна. Ислан, расположенный на 27 км к северо-востоку в структурной долине, тянущейся с востока на запад, известен грязевыми вулканами и фумаролами с температурами до 100°C. В 1970 г. здесь были пробурены глубокие разведочные скважины. На стадии предварительного бурения для определения геотермического градиента были обнаружены температуры до 150°C. Лос-Адуфрес также занимает часть кальдеры, образовавшейся в базальтовых и риолитовых потоках и пирокластических породах. Здесь перегретый пар выходит в виде мощных фумарол с температурой до 110°C. Проводятся геологические и геофизические изыскательские работы. В Лос-Хумеросе, самом восточном из этих геотермальных полей, температура в фумаролах достигает 90°C. Лос-Хумерос находится в кальде-

ре четвертичного возраста, сложенной риолитовыми, базальтовыми и пирокластическими породами. Здесь, а также в Сан-Марко проводятся геофизические и геохимические исследования.

Сальвадор

В 1971 г. Национальное агентство по электроэнергии (CEL) Сальвадора заказало итальянской фирме "ЛЦ-Электроконсульт" (Милан) спроектировать геотермальную электростанцию мощностью 30 МВт для сооружения в Ауачапане. Это означало успешное завершение программы разведочных работ, проводимых правительством Сальвадора и ООН. Но еще до осуществления этой программы, начатой в 1965 г., Национальная геологическая служба Сальвадора провела разведку района фумарол в Ауачапане и пробурила две неглубокие скважины. До настоящего времени на осуществление этого проекта было затрачено более 4 млн. долл. Производительная мощность должна возрасти к 1980 г, благодаря дополнительным буровым работам и сооружению электростанции.

Область Ауачапан занимает территорию в 30 км² на северных склонах ряда вулканов, состоящих из андезитов четвертичного возраста. Она включает в себя более двенадцати фумарольных полей, теплую почву и термальные источники. Самый восточный вулкан Исалько является действующим. Геологическое картирование и последующее бурение позволили обнаружить кальдеру, скрытую под более поздними вулканическими и послевулканическими обломочными породами. Фумаролы и другие проявления тепловой энергии Земли в Ауачапане определяются кольцевыми структурами, образующими стенку кальдеры, и поперечными структурами, тянущимися в северном направлении. Наиболее высокие температуры фумарол отмечены в самой южной, наиболее приподнятой части структуры и достигают 125°C. Бурение скважин в этом районе не проводилось. В целом температуры в забое скважин составляют в среднем -225-230°C, достигая максимума 235°C на глубинах 600 - 900 м. Однако согласно геохимическим данным постоянная температура в бассейне, по-видимому, на 10-20°C выше. В некоторых работах в связи с этим делается предположение, что высокотемпературные фумаролы южной части месторождения более близки по параметрам к условиям в самом бассейне.

Рассол в бассейне содержит 10% поваренной соли. Около 15% жидкости, вскипая в устье скважины, переходит в пар. Так как средняя производительность скважины составляет -320 т/ч, то для электростанции мощностью 30 МВт потребуется семь продуктивных скважин. При испытании скважин не наблюдалось падения давления. Существует проблема, связанная с удалением соленых сбросовых вод так как содержащиеся в них количества бора, хлоридов и мышьяка

опасны для сельского хозяйства. В опытах по закачиванию отработанной жидкости в месторождении использовалась одна из продуктивных скважин. Такие опыты проводились в течение полутора лет, причем влияния на режим соседних скважин не обнаружено. До сих пор не выяснен вопрос о возможных отложениях кремнезема в скважинах, используемых для закачки. Другим способом удаления отработанных вод является отстой в водоемах и сброс в море через систему естественного стока.

По самым скромным оценкам запасов месторождения в Ауачапане, они могут обеспечить выработку мощности 100 МВт в течение 50 лет. С помощью бурения разведано лишь 2 км³ из объема месторождения, оцениваемого в 40 км³. Разведочное бурение было проведено также в Берлине, расположенном в восточной части страны. В скважине, пробуренной в 1968 г. на глубину ~1500 м, температура воды превышала 225°C. Расход горячей воды не поддерживался, что свидетельствует об ограниченной проницаемости. В другой скважине, пробуренной на глубину 600 м и расположенной в 10 км северо-западнее, расход был выше и сохранялся постоянным при температуре ~100°C. Обе скважины выдают рассол умеренной солености, благодаря чему дальнейшая разведка целесообразна.

Кения

Кения, Уганда и Танзания имеют общую энергетическую систему, обслуживаемую в Кении национализированной фирмой "Ист эфрикен пауэр энд лайтинг" (EAPL).

В 1957 и 1958 гг. фирма EAPL пробурила две опытные скважины к юго-западу от озера Наиваша, в рифтовой зоне Кении. Расход в этих скважинах не постоянен, хотя температуры достигали 200°C.

В 1970 г. в этой рифтовой зоне снова начались разведочные работы, которые финансируются ООН и правительством Кении. Были выбраны два обширных района: вблизи озера Ханнингтон, где на краях наклонных блоков имеются фумаролы и кипящие источники, а также вблизи озера Наиваша. Кислые вулканические купола и экстрезии образуют около озера Наиваша дугу, тянущуюся с северо-запада на юг, а в нескольких милях южнее озера рифтовая зона пересекается широтным разломом. Вокруг озера Наиваша в пределах вулканического поля пробурены две группы скважин. Глубина скважин северной группы на склонах горы Эбуру составляет ~150 м. Скважины выдают пар низкого давления, из которого получают питьевую воду для скота, а осадок пиретрума высушивается и используется как средство против насекомых. В самом южном месторождении Олкаррия EAPL были пробурены первые скважины. В одной из этих скважин глубиной ~900 м с температурой до 230°C расход обеспечивается ис-

кусственно и испытания продолжаются. Проведены интенсивные геологические, геохимические и геофизические изыскания. Летом 1973 г. должны были быть пробурены три глубокие разведочные скважины.

Эфиопия

Изыскательские работы 1970 и 1971 гг., финансировавшиеся ООН и правительством Эфиопии, включали составление каталога всех геотермальных проявлений в рифтовой зоне Эфиопии. Было обнаружено более 500 отдельных термальных источников и фумарол. Вторая серия разведочных работ должна была начаться в 1973 г. Наибольший интерес представляют три района: Даллол, расположенный в Данакильской впадине северной рифтовой зоны, грабен Тендахо в районе Афара и кальдера Алуто, расположенная в озерном крае южной рифтовой зоны.

Данакильская впадина тянется с севера на юг и лежит в основном ниже уровня моря. На севере она называется Даллолом и образована отложениями солей мощностью более 1000 м с солеными термальными источниками при температуре более 110°C. Непосредственно с юга к ней примыкает цепь действующих вулканов, на склонах которых находятся фумаролы с температурами до 220°C. В Тендахо имеется множество кипящих источников, фумарол, голоценовых шлаковых конусов и лавовых потоков, расположенных в наклонных и кольцевых блоках. В озерном крае в нескольких центрах вулканической активности и нескольких кальдерах также имеются термальные источники и фумаролы.

Даже в Аддис-Абебе, городе с населением 600 тыс., расположенном на Эфиопском нагорье на высоте 2500 м, имеются обширные подземные запасы горячей воды, которая может использоваться для теплоснабжения. Программа разведочных работ, финансируемых правительством, включает исследование богатых залежей поташа в Даллоле и изучение потребностей в электрической энергии для ирригационных работ в районе Тендахо. Пресная вода может получаться как побочный продукт любого из этих производств. В настоящее время горячая вода и конденсат используются лишь в отдельных местах для мытья и поения скота.

Филиппины

В Тиви на острове Лусон с 1969 г. работает геотермальная электростанция мощностью 10 кВт, демонстрируя в основном потенциальные возможности данного района. Разведка месторождения проводилась Филиппинским национальным департаментом наук и Комиссией по вулканологии с 1966 г., было пробурено семь неглубоких разведочных скважин. Скважина, на базе которой работает

электростанция, выдает с глубины 220 м пар с температурой 154°C и расходом 10 000 кг/ч.

В 1971 г. фирма "Филиппин геотермал", субсидируемая фирмой "Юнион ойл", заключила контракт с Национальной энергетической корпорацией Филиппин на разведку геотермальной энергии в юго-восточной части Лусона на площади 150 км². Испытания пробуренной в 1972 г. скважины глубиной 1500 м показали, что она может быть использована для будущей электростанции, которую, возможно, здесь будут сооружать в середине 70-х годов. Планировалось пробурить две дополнительные скважины. По геологическому строению данный район состоит из андезитов и сопровождающих их пачтов четвертичного возраста.

Индонезия

Индонезия расположена на островах, являющихся областями наибольшей вулканической активности во всем мире. Остров Ява, на котором проживает более 40 млн. человек, усеян действующими вулканами. Множество вулканов расположено на островах Суматра, Бали, Флорес и Сулавеси. Еще в 1918 г. указывалось на возможность использования тепла вулканов этих островов. В 1928 г. в Кава-Камодьянг на западе острова Ява были пробурены разведочные скважины, с помощью которых были обнаружены огромные запасы пара низкого давления. Самая глубокая из этих трех скважин имела глубину 128 м. Максимальная температура была равна 140°C. Данные, полученные в этих скважинах, непрерывно регистрировались вплоть до второй мировой войны.

После посещения страны группой научных сотрудников ЮНЕСКО в 1966 г. индонезийские геологи начали собирать соответствующие данные на острове Ява и в южной части острова Сулавеси. В 1969 г. Геологическое управление США приступило к осуществлению программы помощи в области Диенг центральной Явы. Область Диенг состоит из цепи вулканов, сложенных породами, образовавшимися при взрывах и извержениях, Вулканическая цепь протянулась в северо-западном направлении, занимая около 20 км. Температура сольфатар 95°C. Пирокластические породы, лахары и озерные отложения покрывают песчаники миоценового периода, которые, возможно, вмещают предполагаемое геотермальное месторождение.

В 1972 г. в области Диенг предполагалось пробурить шесть разведочных скважин небольшого диаметра глубиной 200 м, а после испытаний углубить две из них до 600 м. Возможно, будет заключено соглашение между правительствами Новой Зеландии и Индонезией, в соответствии с которым одна из фирм Новой Зеландии проведет разведку геотермальных месторождений в других районах острова Ява, а возможно, и на других островах.

Чили

Летом 1967 г. в Чили начала осуществляться поддерживаемая ООН программа геотермальной разведки на площади 100 000 км² в зоне вулканической активности на севере страны. Эта пустынная равнина поднята над уровнем моря более чем на 4000 м, а пики четвертичных вулканов достигают почти 6000 м. На основании предварительной разведки выбраны три области, а первые работы проведены в области Эль-Ташио. После подробных геохимических, геологических и геофизических изысканий было пробурено несколько скважин малого диаметра. Самая глубокая из них достигает ~ 650 м и выдает горячую воду с температурой до 250°C. На основании данных, полученных с помощью этих скважин, должны быть выбраны районы для бурения продуктивных скважин.

Из-за большой высоты района над уровнем моря и его отдаленности разведочные работы проводятся очень медленно, а относительная недоступность района сделала практически невозможной бурение скважин малого диаметра. Вследствие безводности и засухливости района любая программа освоения месторождения должна включать производство пресной воды. По предварительным оценкам, мощность геотермальной электростанции составит 20–30 МВт, причем электроэнергия может использоваться при добыче и выплавке меди, месторождение которой находится на расстоянии ~100 км, а также при извлечении химикалий из фумарол, имеющих в этом районе.

Гваделупа

Острова Карибского моря – Гваделупа и Мартиника, а также Гвиана на северном побережье Южной Америки образуют заморский департамент Франции. Начиная с 1963 г. Французское бюро геологической разведки и разведки полезных ископаемых (B.R.G.M.) и французская компания по разведке нефти "Ерофреп" проводили геологическую, геохимическую и геофизическую разведку пара на обоих островах. На Мартинике в 1969 г. в 20 км к юго-востоку от действующего вулкана Мон-Пеле была пробурена скважина глубиной 771 м, однако безрезультатно.

После этого разведочные работы велись в Буиант на Гваделупе, вблизи фумарол вулкана Суфриер. Было пробурено три скважины с максимальной глубиной 800 м. Первая из скважин давала пульсирующий расход пара низкого давления. Вторая глубиной 338 м имела дебит перегретой воды, составляющий 300 т/ч при температуре 240°C. Около 1/3 воды (по весу) после вскипания переходило в пар. Третья скважина дала ограниченное количество сухого пара. Регион состоит из андезитовых и дацитовых потоков туфов и грязевых потоков, перерезанных многочисленными трещинами. Предполагается трещинный тип месторождения, и поэтому низкая проницаемость

пород может стать основной проблемой. В настоящее время ведется дальнейшее бурение и делаются попытки использовать влажный пар в турбине низкого давления. Для геотермальной электростанции мощностью 30 МВт, которая должна стать завершением данного проекта, потребуется по аналогии с другими станциями такой же мощности семь-восемь продуктивных скважин.

Тайвань

На Тайване разведочные работы сконцентрированы в области Татун в северной части острова, где наблюдаются проявления вулканической деятельности. Работы начались в 1965 г. и продолжаются в настоящее время. Тринадцать районов с фумаролами и термальными источниками занимают общую территорию более 50 км². В одном месте температуры в фумаролах достигают 120°C. В геологическом разрезе андезитовые и базальтовые лавы, туфы и вулканокластические породы плиоценового и плейстоценового возраста покрывают миоценовые континентальные и морские отложения. Вмещающими породами месторождения являются крупнозернистые песчаники, местами трещиноватые и смещенные по разломам.

Проведено детальное геологическое картирование, геохимические и геофизические исследования. Было пробурено 58 скважин с максимальной глубиной 160 м и температурами до 174°C для определения градиентов температур. Несколько скважин давали пар с большим содержанием кислот. Более 10 скважин было пробурено на глубины от 300 до 1500 м с максимальной температурой 293°C. Расход скважин был непостоянным и иногда превышал 35 т/ч. Содержание пара, образующегося при вскипании, составляет от 10 до 83%. Величина pH жидкости обычно менее 5,0 и достигает даже 0,5, что угрожает коррозией и требует разрешения проблемы удаления сбросовых вод. Из 18 районов области Татун наиболее перспективным считается Матсао с наиболее высоким процентом образующегося при вскипании пара, средних значениях pH и температурах, превышающих 200°C на глубинах более 500 м. Однако сравнительно низкие расходы в Макао указывают на низкую проницаемость песчаников миоценового возраста. Возможности выработки в области Татун электроэнергии оцениваются величиной 80–200 МВт. Рассматривается вопрос о сооружении в Макао опытной геотермальной электростанции мощностью 10 МВт.

Турция

В 1961 г. турецкое правительство начало детальное изучение ряда проявлений геотермальной активности Земли в западной Анатолии. С 1967 г. разведочные работы стали проводиться совместно

с ООН, а в 1968 г. после геологических, геофизических и геохимических изысканий в Кизильдере, в долине реки Менперес была пробурена первая скважина. В этом районе имеется много термальных источников с температурами до 100°C . В отдельных местах наблюдается также минерализация ртутью.

В Кизильдере было пробурено семь скважин и еще одна скважина пробурена в Текке-Хамман, в 10 км на юго-запад. В результате было открыто месторождение горячей воды, расположенное в двух горизонтах на глубинах - 350-400 м и ниже 600 м. Геологическая структура образована сильно раздробленными горстами и грабенами, первоначально расположенными в широтном направлении, а затем поворачивающимися к югу. Кристаллический фундамент сложен сланцами, гнейсами, мраморами и кварцитами, покрытыми речными и озерными отложениями миоценового и плиоценового периодов. Сильно трещиноватый известняк миоценового периода образует верхние горизонты геотермального месторождения. Проницаемые структуры в кристаллических породах образуют нижние его горизонты. Четвертичные наносы покрывают третичные породы. Молодые вулканы отсутствуют. Источником тепла считается остывающая гранитная интрузия, расположенная на глубине нескольких километров. Полагают, что именно ее внедрение образовало структуру горстов и грабенов.

Средняя глубина скважин в этом регионе - 450 м, а температуры в бассейне $180-200^{\circ}\text{C}$. Производительность скважины составляет от 25 до 300 т/ч, а в среднем - 150 т/ч, 10% жидкости вскипает и переходит в пар. Более глубокие скважины, доходящие до кристаллического фундамента, имеют более высокую производительность. Геотермальная жидкость месторождения содержит много карбонатов, и поэтому до его освоения необходимо решить проблему, связанную с отложением в трубах солей кальция. Именно из-за этих отложений не функционирует скважина в Текке-Хаммане. Рассматривается вопрос о создании электростанции мощностью 10-20 МВт, имеющей теплообменник с замкнутым контуром. При этом жидкость из месторождения будет извлекаться на поверхность, использоваться и вновь закачиваться в месторождение под давлением, вследствие чего отпадает необходимость в отделении карбоната кальция.

Разведка геотермальных месторождений в других районах

В 50-х годах была построена геотермальная электростанция мощностью 220 кВт в Кибукве в провинции Шаба (быв. Катанга) Республики Заир (Конго). Ее электроэнергия использовалась на металлургических рудниках. Эта электростанция, работавшая на влажном паре с температурой 95°C , оказалась слишком дорогой и мало-

эффективной, но удовлетворительно работала в течение ряда лет в районе, удаленном от других источников дешевой энергии. В настоящее время электростанция и рудники не работают.

В феврале 1972 г. появилось сообщение о том, что в КНР, в Тенгву (провинция Гуандун), успешно работает небольшая опытная геотермальная электростанция. В турбинах используется пар, образующийся при вскипании горячей воды.

В 1967 г. в США был разработан проект разведки геотермальных месторождений для правительства Никарагуа, причем в качестве подрядчиков выступали частные американские организации. Были проведены детальные геофизические, геохимические и геологические изыскания. На территории фумарол вблизи вулкана Момотамбо (запад центральной части Никарагуа) было пробурено несколько скважин для определения градиента температур. В более глубоких скважинах температуры достигали 230°C . Однако по истечении срока договора работы прекратились. В 1972 г. было заключено соглашение между ООН и правительством Никарагуа на выполнение второй фазы разведочных работ, которые проводятся в настоящее время.

В Мелёне (Франция), расположенном в 50 км юго-восточнее Парижа, пробурены две скважины на глубину 1800 м. Эти скважины пересекли водоносный слой артезианской воды с температурой $\sim 70^{\circ}\text{C}$, что соответствует незначительному геотермическому градиенту $\sim 3^{\circ}\text{C}$ на 100 м (табл. 2). Тем не менее была оценена возможность создания районной системы теплоснабжения, при которой одна скважина должна использоваться для получения горячей воды, а другая — для закачки использованной воды в месторождение. Получаемая по этой схеме тепловая энергия не будет дороже энергии, вырабатываемой из других видов топлива. Полагают, что площадь этого артезианского бассейна достаточно обширна.

Многие другие страны южной и восточной Европы, Латинской Америки, северной Африки и Азии начали сбор данных для проведения геотермальной разведки. Среди них прежде всего следует отметить Алжир, Венесуэлу, Гватемалу, Грецию, Израиль, Индию, Испанию (Канарские острова), Колумбию и Югославию. Перечень пятидесяти стран, занимающихся или интересующихся разведкой геотермальных месторождений, приведен в табл. 3.

Бурение по определению градиента температур в северо-восточной части Алжира определило границы района с аномальным градиентом, расположенного вблизи границы с Тунисом. Подробные геологическое и геохимическое исследования показали, что источником тепла для многочисленных термальных источников этого района являются, по-видимому, погруженные батолитовые массы.

Правительство Гватемалы выбрало для разведки геотермальный район вблизи вулкана Мюютла, недалеко от границы с Сальвадором.

Предполагалось заключить контракт на бурение в 1972 г. разведочной скважины, причем составление и осуществление программы буровых работ и освоения месторождения были предложены нескольким фирмам.

Испанское правительство финансирует разведочные работы на Канарских островах, испанской территории у побережья Марокко. На острове Лансароте обнаружены высокотемпературные фумаролы.

В Югославии и Чехословакии в настоящее время проводятся исследования геотермических градиентов и тепловых потоков, причем основное внимание уделяется поискам значительных запасов вод с низкой энтальпией, используемых для отопления помещений, в сельском хозяйстве и промышленности.

В шести развивающихся странах (Сальвадор, Чили, Турция, Кения, Эфиопия и Никарагуа) ООН совместно с правительствами этих стран проводит геотермальные разведочные работы. Группы специалистов ООН за последние годы посетили Индию, Грецию, Перу и Гватемалу для оценки возможностей разведки геотермальных месторождений. В ряде случаев были предложены планы совместного проведения такой разведки. ООН способствовала проведению разведочных работ в Никарагуа и Индонезии. Колониальные власти провели разведку на территории Афарса и Иссаса (Сомали), на островах Фиджи и в Новой Британии. В Соединенных Штатах и Японии разведочные работы осуществляются частными и правительственными организациями. Частные организации участвуют в разведочных работах на Филиппинах, в Алжире, Гваделупе и других местах. Обычно предварительные работы по сбору данных, геологической разведке, определению потребностей в энергии и составлению карт ее передачи проводятся местными геологоразведочными или энергетическими управлениями. На первой стадии работ проводится бурение неглубоких скважин. Большая часть разведочных работ финансируется и проводится государственными организациями, так как в большинстве случаев геотермальные месторождения принадлежат государству, а не частным землевладельцам. Однако в связи с тем, что в ряде стран геологическая служба слабо развита, возникает необходимость при проведении детальных разведочных работ обращаться за помощью к ООН, более развитым странам или к частным организациям.

Перспективы использования геотермальной энергии до 1980 г.

Увеличение мощности геотермальных электростанций в Лардерелло и Монте-Амиата (табл. 4) в основном обусловлено переходом от турбин без конденсатора к конденсационным турбинам. В текущем десятилетии таким путем можно увеличить мощность на 15%. Если же в Травале, Роккастрада и Радикофани будут открыты значительные запасы пара, то, вероятно, будет построена новая геотермаль-

Таблица 4

Предполагаемые мощности геотермальных электростанций в 1980 г.

| Страна | Месторождение | Установленная мощность в конце 1972 г., МВт | Ожидаемая мощность в 1980 г., МВт |
|----------------|-------------------------|---|---|
| Сальвадор | Ауачапан | - | 30 к 1975 г., 60 к 1980 г. |
| Исландия | Хенгидль (Хверагерди) | - | До 32 к 1980 г. |
| | Намафьядль | 3 | Неизвестна |
| Италия | Лардерелло | 365 | Возможно увеличение на 15% |
| | Монте-Амиата | 25 | |
| Япония | Хатимантай | - | Возможно, 10 к середине 70-х годов |
| | Мацукава - Такинноками | 20 | Возможно, 60 к 1980 г. |
| | Оникобе | - | Возможно, 10 к 1980 г. |
| | Сикабе | - | 7; в 70-х годах запланировано также производство соли |
| | Отате - Хачобару | 13 | Возможно, 60 к 1980 г. |
| Мексика | Серро-Прието | 75 | 150 к 1980 г. |
| Новая Зеландия | Каверау | 10 | Не планируется |
| | Уайракей | 160 | " " |
| СССР | Паужетская ГеоТЭС | 6 | До 25 к 1980 г. |
| | Кунаширская ГеоТЭС | - | До 13 к 1980 г. |
| США | Долина Больших Гейзеров | 302 | Ежегодное увеличение на 110 в 70-х годах, до 1180 в 1980 г. |
| | Империал-Валли | | Опытная электростанция с производством пресной воды к 1980 г. |

ная электростанция в Тосканской провинции Италии. Кроме того, если разведочные работы в других местах Италии окажутся успешными, то к 1980 г. возможно сооружение новых электростанций.

В текущем десятилетии не запланировано строительство дополнительных геотермальных электростанций в Новой Зеландии. Однако будут увеличены масштабы использования подземного тепла для промышленных и коммунальных целей. Некоторая экономия электроэнергии может быть обеспечена благодаря непосредственному использованию тепла в промышленности.

Выполняются планы по увеличению мощности электростанций в Долине Больших Гейзеров на 110 МВт ежегодно до 1975 г., когда общая установленная мощность должна достигнуть 630 МВт, что сделает данное месторождение наиболее освоенным в мире. Полагают, что к 1980 г. при условии, что освоение будет продолжаться столь же успешно, установленная мощность возрастет до 1180 МВт. В Импириал-Валли предполагается сооружение к 1980 г. опытной электростанции мощностью 10–20 МВт и производства для опреснения воды. К тому же времени в этом районе, возможно, будут сооружены одна или несколько небольших электростанций, имеющих теплообменник с замкнутым контуром. Вполне возможно, что к 1980 г. будут действовать или сооружаться еще несколько опытных или промышленных геотермальных электростанций в других местах западной части Соединенных Штатов.

В текущем десятилетии предполагается освоение нескольких геотермальных месторождений в Японии. В Мацукаве и Отаке запланировано увеличение мощности электростанций до 60 МВт, требующее дополнительного освоения геотермальных месторождений в Такинноками в окрестности Мацукавы и Хачобару в окрестности Отаке. Проблемы, связанные с размерами, сроком службы скважин и удалением сбросовых вод, могут несколько замедлить это освоение. Потенциальные условия для сооружения геотермальных электростанций имеются в Оникобе, Хатимантай, Насу на острове Хонсю и Сикабе на острове Хоккайдо. Общая установленная мощность электростанций, работающих на этих месторождениях, должна составить к 1980 г. 30 МВт.

Мощность Паужетской ГеоТЭС может быть увеличена к 1980 г. до 25 МВт. Возможно, будут сооружены электростанции мощностью 10–20 МВт на других геотермальных месторождениях Курильских островов и Камчатки. В текущем десятилетии ожидается существенное увеличение потребления геотермальной энергии для теплоснабжения на Кавказе и в ряде районов Западной и Восточной Сибири. Использование термальных вод позволит к 1980 г. экономить 2 млн. т жидкого топлива ежегодно.

Увеличение потребления термальных вод, предполагаемое в Исландии, позволит экономить более 1/3 млн. т жидкого топлива ежегодно. Некоторое увеличение производства электроэнергии ожидается в Намафьядле. Предполагается сооружение электростанции в Хвергерди в районе Хенгидль. Установленная мощность геотермальных электростанций может достигнуть к 1980 г. от 15 до 35 МВт.

В текущем десятилетии потребление термальных вод для теплоснабжения в Венгрии может быть более чем удвоено. Возможно сооружение систем теплоснабжения в Югославии, Чехословакии, Франции, а затем и в других странах Европы.

К 1980 г. может быть закончено сооружение второй геотермальной электростанции мощностью 75 МВт в Серро-Прието. Возможно сооружение геотермальных электростанций и в других районах центральной Мексики. По-видимому, вступит в строй и вторая электростанция мощностью 30 МВт в Ауачапане (Сальвадор).

Предполагается сооружение небольших электростанций на Филиппинах, в Кении, Чили, Турции, на острове Тайвань, а возможно, и в Гваделупе, Никарагуа и некоторых других странах. Их общая мощность, вероятно, составит 70–150 МВт. Вследствие того что разведка и строительство электростанций занимают минимум 4–5 лет, маловероятно, что к 1980 г. будут еще где-то сооружены достаточно мощные электростанции. Тем не менее вполне возможно, что электростанции мощностью 50 МВт будут построены в Индонезии, Эфиопии и КНР.

Таким образом, по самым скромным оценкам, мощность геотермальных электростанций во всем мире составит к 1980 г. около 2500 МВт, что в три раза превысит их современную мощность. Но поскольку потребление электрической энергии в течение 8 лет, вероятно, удвоится, то вклад геотермальной энергии в общее количество вырабатываемой энергии останется меньшим 1%. Вероятно, в больших размерах будет проводиться непосредственное использование геотермальной энергии, особенно в Восточной Европе.

В 80-х годах ожидается ускорение разработок геотермальных месторождений. Это будет зависеть от развития техники бурения скважин, совершенствования способов производства энергии, от дальнейших успехов в изучении геотермальных систем и от увеличения капиталовложений в освоение геотермальных месторождений.

ЛИТЕРАТУРА

Из-за большого объема материала, использованного при составлении данной главы, ссылки на отдельные статьи не приводятся. Отсылаем читателя к двум большим трудам, являющимся одновременно источниками использованных в этой главе данных и библиографией.

1. *Proceeding of the United Nations Conference on New Sources of Energy, Solar Energy, Wind Power and Geothermal Energy, Rome, August, 1961; v. 2, 3, Geothermal energy, New York, United Nations, 1964.*
Включает 77 статей и три обзора, относящихся к периоду до 1960 г.
2. *Proceedings of the United Nations Symposium on the Development and Utilization of Geothermal Resources, Pisa, Italy, September, 1970, Geothermics, Special Issue 2, 2 volumes, 1971.*

Включает 198 статей и 11 обзоров, содержащих данные по разведке и освоению геотермальных месторождений до 1969 г.

Более поздние данные в основном заимствованы из личной корреспонденции авторов и их бесед со специалистами.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

- 1*. Джамалов С.А., Левкович Р.А., Суетнов В.В., Тепло Земли и его практическое использование, изд-во "Наука", М., 1965.
- 2*. Кисин И.Г., Восточнопредкавказский артезианский бассейн, изд-во "Наука", М., 1964, стр. 211.
- 3*. Святловский А.Е., Вулканы служат людям, Дальневосточное книжное изд-во. 1969.
- 4*. Святловский А.Е., Геотермальный проект — вулканический очаг, изд-во "Знание", М., 1973.
- 5*. Термальные воды СССР и вопросы их теплоэнергетического использования, изд-во АН СССР, М., 1963.

3. ОЦЕНКА ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ США

*Р.В. Рекс, Д.Дж. Хауэлл*¹⁾

Внутреннее тепло Земли представляет собой один из самых колоссальных источников энергии, которыми располагает человек. Он содержит намного больше энергии, чем можно было бы получить в ядерных реакторах при использовании всех запасов урана и тория, имеющихся в земной коре. Но гораздо важнее знать, в какой мере эта энергия может быть использована при современном уровне развития техники и допустимых затратах и как она зависит от практических ограничений, связанных в основном с решением общественных проблем и защитой окружающей среды. Из опыта работы действующих в Калифорнии геотермальных электростанций очевидно, что некоторые способы извлечения геотермальной энергии не только технически осуществимы, но целесообразны и экономичны. На существующих электростанциях используется природный подземный пар. В настоящее время исследуются месторождения термальных вод в долине Импириал-Валли в Калифорнии, а в 1973 г. начнутся исследования аналогичного геологического района в северо-западной части Мексики. Итак, можно считать, что в США геотермальная энергия является конкурентоспособным источником энергии.

Распределение геотермальной энергии в США

Наиболее богата запасами доступной геотермальной энергии западная треть США, включая Аляску и Гавайские острова. Имеется очень мало достоверных данных о районах с термальными источниками в шт. Виргиния, Западная Виргиния, Джорджия, Арканзас и других восточных и центральных областях США. Месторождения горячих сухих горных пород в Аппалачских горах могут оказаться весьма обширными, но о них почти ничего неизвестно. В связи с

¹⁾ Ко времени написания данной главы Р.В. Рекс возглавлял, а Д.Дж. Хауэлл был ответственным исполнителем работ, связанных с осуществлением Программы исследования геотермальных ресурсов (Институт гео- и астрофизики Калифорнийского университета, Риверсайд). Оба являются также сотрудниками фирмы <<Пасифик энерджи>> (Марина-дель-Рей, шт. Калифорния).

Таблица 1

Характеристики модели распределения температур для вулканических пород гор Хемес район (Валлес-Кальдеры) при геотермическом градиенте 180 град/км

| Глубина, км | Используемый объем, км ³ | Масса, 10 ¹⁵ кг | Средняя температура T, град. | Полезная температура ΔT, °C | Удельная энтальпия, ΔH, кДж/кг | Общая используемая энтальпия, 10 ¹¹ МВт·ч |
|-------------|-------------------------------------|----------------------------|------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|--|
| 0-1 | 1600 | 4,40 | 90 | 0 | 0 | 0 |
| 1-2 | 1200 | 3,30 | 290 | 190 | 159 | 1,45 |
| 2-3 | 1000 | 2,75 | 460 | 360 | 301 | 2,30 |
| 3-4 | 800 | 2,20 | 610 | 510 | 427 | 2,60 |
| 4-5 | 600 | 1,15 | 740 | 640 | 536 | 1,71 |
| 5-6 | 400 | 1,1 | 800 | 700 | 586 | 1,79 |
| В с е г о | | | | | | 35,46 |

этим оценка таких ресурсов энергии производится весьма приближенно. Если освоение тепла горячих сухих горных пород окажется технически осуществимым, геотермальная энергия может стать основным источником электроэнергии для большей части США.

В настоящее время в основном осваиваются геотермальные системы с сухим паром или горячей водой. Огромные запасы внутреннего тепла Земли, расположенные на глубинах, доступных для современной техники бурения, сосредоточены в сухих породах. В качестве основы для оценки порядка величины потенциальных запасов геотермальной энергии рассмотрим вулканический район Валлес-Кальдеры в горах Хемес на севере шт. Нью-Мексико. Исходя из того, что энергия содержится лишь в горячих породах, при составлении упрощенной модели месторождения мы использовали данные по геотермическим градиентам, литологии и геофизике. Геотермический градиент на глубинах до 700 м составляет 180 град/км. Используя при составлении модели распределения температур (табл. 1) геологические и топографические данные, мы предполагаем, что коэффициент теплопроводности с увеличением глубины возрастает незначительно, а теплоемкость равна 0,84 Дж/(кг·град) при средней плотности пород 2,75 г/см³ и нижнем пределе рабочей температуры 100°C. При среднегодовой температуре воздуха -0-10°C воздушное охлаждение является наиболее подходящим способом отвода сбросового тепла.

Если принять, что полезная тепловая энергия будет полностью извлечена из района Валлес-Кальдеры за период более 100 лет, то ее величина составит $8,48 \cdot 10^{20}$ кал.

К.п.д. преобразования геотермальной энергии в электрическую составляет - 14%. Следовательно, в электрическую энергию может быть преобразовано $1,19 \cdot 10^{20}$ кал. Так как $1 \text{ кал} = 1,163 \cdot 10^{-9} \text{ МВт} \cdot \text{ч}$, то $1,19 \cdot 10^{20} \times 1,163 \cdot 10^{-9} = 1,38 \cdot 10^{11} \text{ МВт} \cdot \text{ч} = 158 \text{ 000 МВт} \cdot \text{век}$. Такой же энергией обладают по меньшей мере десять вулканических районов на Аляске, около десяти других районов, находящихся в 48 граничащих друг с другом штатов, и около пяти - на Гавайских островах. Следовательно, только запасы вулканической энергии составляют $\sim 4 \cdot 10^6 \text{ МВт} \cdot \text{век}$ и могут удовлетворять потребности США в электроэнергии в течение нескольких веков.

Вода в трещиноватых вулканических породах содержит в 1,8 раза больше энергии, чем горячие сухие породы. Теплосодержание сухого пара в таких породах оценить труднее из-за неизвестной плотности минерализованной воды. Хотя различие в энергии, содержащейся в единице объема горячих пород, горячей воды и сухого пара, не настолько велико, чтобы повлиять при расчетах на порядок величины энергии месторождения, тем не менее пар и вода относятся к числу освоенных и, вероятно, значительно более дешевых источников геотермальной энергии, чем горячие сухие породы. Разбросанность геотермальных месторождений на большой территории Долины Больших Гейзеров позволяет предполагать, что естественные термические напряжения могут играть большую роль в образовании заполняемой водой и паром пористости в районах крупных интрузий.

Фон Герцен [1] описал две области с большим тепловым потоком на западе США общей площадью $2,7 \cdot 10^6 \text{ км}^2$. Работы, проведенные авторами данной главы в долине Импириал-Валли (шт. Калифорния) и других местах, а также оценка опубликованных и неопубликованных данных позволяют предполагать, что - 5% этой территории, включая рассмотренные ранее вулканические районы, содержат промышленные геотермальные месторождения. Были рассчитаны возможные запасы тепла при средней мощности продуктивных отложений 3 км и средней температуре 300°C . При минимальной рабочей температуре 100°C получаем $\Delta T = 200^\circ\text{C}$. В результате получаем $2,7 \cdot 10^6 \text{ км}^2 \times 0,05 \times 3 \text{ км} = 0,405 \cdot 10^{15} \text{ м}^3$ водосодержащих горячих пород.

Теплосодержание горячей породы составляет $0,937 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{град})$ и $\Delta H = 167 \text{ кДж}/\text{кг}$. Считая среднюю плотность породы равной $2650 \text{ кг}/\text{м}^3$, получаем массу породы, равную $2650 \cdot 0,405 \cdot 10^{15} = 1,07 \cdot 10^{18} \text{ кг}$. При этом общее используемое тепло составит $-17,9 \times 10^{19} \text{ кДж}$. При к.п.д. преобразования тепловой энергии в электрическую, равном 14%, преобразованные в электроэнергию $25 \cdot 10^{18} \text{ кДж}$ дадут $-7,0 \cdot 10^{12} \text{ МВт} \cdot \text{ч}$, или $8 \cdot 10^8 \text{ МВт} \cdot \text{лет}$, или $8 \cdot 10^6 \text{ МВт} \cdot \text{век}$.

С учетом энергии вулканов общие запасы геотермальной энергии США могут составить $12 \cdot 10^6 \text{ МВт} \cdot \text{век}$. Этой энергии хватит для

удовлетворения нужд США на тысячелетие. Если горячую породу заменить горячей водой, то потенциальная энергия возрастет в $\sim 1,8$ раза. Дополнительное количество энергии можно обеспечить более глубоким бурением или расширением площадей использования геотермальной энергии (сверх указанных 5%). Приведенные цифры значительно возрастут при освоении других районов, расположенных на востоке и в центральной части США.

Связь между стоимостью и запасами геотермальной энергии

Чтобы оценить размеры и значение геотермальных ресурсов США, необходимо найти связь между запасами энергии геотермальных месторождений различного типа и стоимостью тепловой энергии для геотермальных электростанций. Сооружение электростанций, аналогичных действующим в Долине Больших Гейзеров, обходится в 120 долл. за 1 кВт располагаемой мощности. Предполагается, что в ближайшие 5 лет эта стоимость возрастет до 140–160 долл. Стоимость 1 кВт располагаемой мощности геотермальных электростанций, использующих горячую воду и теплообменники, через следующие 5 лет может составить 200–220 долл. В этот же период времени стоимость 1 кВт на атомных электростанциях будет равной ~ 400 – 600 долл., а на обычных тепловых (угольных) электростанциях с оборудованием для предотвращения загрязнения окружающей среды ~ 300 – 400 долл. В связи с этим становится очевидным, что решение проблемы нехватки электроэнергии путем освоения геотермальной энергии потребует наименьших капиталовложений, если, конечно, стоимость энергии будет являться определяющим фактором.

Установленные капитальные затраты и ежегодные эксплуатационные расходы, включая стоимость топлива, составляют для геотермальной электростанции $\sim (2,2\text{--}3,3) 10^{-3}$ долл./кВт·ч в зависимости от типа геотермального месторождения и коэффициента использования каждой геотермальной электростанции. Капитальные затраты включают затраты на сооружения, выраженные через годовые расходы: возврат капитала, амортизация, подоходные налоги, налоги на собственность и стоимость страхования. Другие расходы, входящие в указанный интервал значений $\sim (2,2\text{--}3,3) 10^{-3}$ долл./кВт·ч, составляют эксплуатационные и общие расходы. И, наконец, в стоимость электроэнергии, вырабатываемой на геотермальных электростанциях, включена еще стоимость "топлива", или тепловой энергии, которая представляет собой благоприятную рыночную цену для той частной фирмы, которая на свой риск проводит разведку, бурение и испытания, получает пар или горячую воду и поставляет их через систему трубопроводов к месту использования.

Таблица 2

Оценка перспектив производства геотермальной энергии в США

| Стоимость тепловой энергии ¹⁾ , 10 ⁻³ долл./ (кВт·ч) | Известные месторождения | | Вероятные месторождения | | Потенциальные месторождения | |
|--|-------------------------|-------|-------------------------|-------|-----------------------------|-------|
| | количество, МВт·век | район | количество, МВт·век | район | количество, МВт·век | район |
| 2,90-3,00 | 1 000 | 1 | 5 000 | 1 | 10 000 | 1 |
| 3,00-4,00 | 30 000 | 1-2 | 400 000 | 1-4 | 2 000 000 | 1-5 |
| 4,0-5,00 | | | 600 000 | 1-6 | 12 000 000 | 1-7 |
| 5,00-8,00 | | | | | 20 000 000 ²⁾ | 4) |
| 8,00-12,00 | | | | | 40 000 000 ³⁾ | 4) |

Район: 1) Клир-Лейк – Долина Больших Гейзеров; 2) долина Импириал-Валли; 3) район гор Хемес, шт. Нью-Мексико; 4) Лонг-Валли (шт. Калифорния); 5) остальная часть Провинции Бассейнов и Хребтов на западе США; 6) Гавайские острова; 7) Аляска.

¹⁾ В долларах по курсу 1972 г.

²⁾ Горячие сухие породы на глубинах менее 6,1 км.

³⁾ Горячие сухие породы на глубинах менее 10,7 км.

⁴⁾ Развитие добычи геотермальной энергии из горячих сухих пород предполагается на площади более 5% западной трети США. Разработка геотермальных систем с горячими сухими породами производится с помощью гидравлического разрушения горных пород или сходных по стоимости методов. Учитываются современные методы бурения. Усовершенствование глубокого бурения может существенно расширить перспективы.

Авторы провели оценку потенциальных геотермальных ресурсов США в зависимости от стоимости энергии и выполнили отдельные оценки для *известных месторождений, вероятных месторождений и потенциальных месторождений* (табл. 2). Оценки для вероятных и потенциальных месторождений выполнены на основе опыта работы авторов по разведке геотермальных ресурсов в различных районах США. Развитие техники разведки за последние несколько лет несомненно должно привести к расширению разведочных работ. До сих пор мало учитывалась специфика разведки геотермальных месторождений. Не было единого мнения относительно методов экстраполяции имеющегося технического опыта на неизвестные области. По этой и по другим причинам необходимо уделить основное внимание оценке геотермальных ресурсов США и развитию техники разведки геотермальных месторождений. Расчеты авторов основаны на современных

данных о технике и разведке месторождений, существующих и ожидаемых ценах, а также о масштабах инфляции.

В наших оценках мы пользуемся единицей измерения МВт·век (мегаватт электроэнергии, производимой в течение века). Для сравнения укажем, что современная мощность электроэнергии, вырабатываемой в США, составляет 340 000 МВт. Суммируя стоимость производства электроэнергии $-(2,2-3,3) \cdot 10^{-3}$ долл/(кВт·ч) и стоимость тепловой энергии, приведенной в табл. 2, определяем, что уже в настоящее время можно вырабатывать электроэнергию на геотермальных электростанциях в Долине Больших Гейзеров в Калифорнии стоимостью $-(5,1-6,3) \cdot 10^{-3}$ долл/(кВт·ч). По оценкам авторов, при предполагаемых темпах развития в ближайшие 20 лет на западе США может быть получено 400 000 МВт электроэнергии. Полагая, что запасы энергии в отдельных месторождениях будут исчерпаны за период ~100 лет, придется принимать меры по поддержанию давления и закачке воды в месторождения. Следует также учитывать, что рост потребления электроэнергии, возможно, не будет успевать за ее производством.

Различные экономические соображения, принятые в расчетах стоимости пара, приведены при обсуждении табл. 2. В целом эти расчеты основаны на действующей в настоящее время налоговой системе, включающей процент отчислений на истощение природных запасов, равный 22%; современную структуру и изменение налогов на корпорации и государственных налогов; 5%-ное ежегодное изменение цен, связанное с инфляцией; непрерывное развитие методов бурения и постоянный возврат капитала предпринимателю. Из табл. 2 можно сделать вывод, что геотермальная энергия способна удовлетворить в будущем основную часть потребностей США в электрической энергии. Следует при этом отметить, что освоение геотермальной энергии требует меньших ассигнований, чем другие способы производства энергии.

Проблемы, связанные с влиянием на окружающую среду при использовании геотермальной энергии, являются преимущественно *визуальными*, и для их решения можно использовать существующие методы или при необходимости в ближайшем десятилетии разработать новые. Все эти проблемы технически разрешимы, однако в отдельных случаях могут потребоваться дополнительные расходы, которые учтены при составлении табл. 2. Проблемы, связанные с влиянием на окружающую среду, включают запахи и шумы, истечение рассолов из скважин, возврат сбросовых вод в систему и оседание почвы. Маловероятно, что геотермальные электростанции возникнут в районах с большой плотностью населения, в национальных парках или других местах, где проблема защиты окружающей среды имеет особое значение. Но геотермальные ресурсы настолько велики, что если для их

освоения будут предоставлены федеральные земли, то найдется много подходящих районов.

Обсуждение сделанных оценок

Для определения рентабельности, а следовательно, и вероятности будущего освоения геотермальных ресурсов было составлено несколько программ расчета на ЭВМ. Было рассчитано около 1200 вариантов. Учитывались три типа геотермальных бассейнов: с преобладанием пара, водные системы и системы с горячими сухими породами. Однако при оценке систем с горячими сухими породами учитывалось лишь гидравлическое разрушение пород. Стоимость получения пара из таких систем с помощью ядерных взрывов не определялась.

Предполагается, что в каждом отдельном случае освоение геотермальной энергии проводится энергетической компанией на собственные средства, величина которых определяется существующими ценами. Также необходимо, чтобы предприниматель был налогопособным и имел источники облагаемого налогами дохода, который превышал бы суммы кредита, связанные с большими расходами на разведку и бурение в течение 5–6 лет, предшествующих первым доходам от продажи пара. Предприниматель вознаграждается возвратом 20% вложенного капитала в качестве компенсации отсрочки первых доходов и риска, связанного с разведкой геотермальных месторождений. Доход на вложенный капитал рассчитывается таким образом, чтобы проценты с дохода, оставшегося после уплаты налогов, и меньшего по величине, чем основной капитал, обеспечивались в настоящем (имеется в виду 1972 г.), компенсируя уменьшение капиталовложения. Если при разведочном бурении и проходке первых скважин обнаружены запасы геотермальной энергии, то предполагается, что дополнительные буровые работы финансируются из частных средств на 10-летний срок под 8,5% годовых. Считается, что эксплуатация каждого месторождения занимает более 30 лет и что в конце 30-го года нет смысла далее использовать оборудование или обсадные трубы для проходки скважин. Предполагается, что трубы для пара обходятся в 12 долл. за 1 кВт мощности для каждой рабочей скважины и для каждой продуктивной разведочной скважины. Отчисления землевладельцу составляют 10% общих доходов, получаемых от продажи пара. Коэффициент использования составляет для систем с преобладанием пара 90%, для систем с горячей водой 85% и для систем с горячими сухими породами 80–85%. Затраты на бурение приведены в табл. 3, а глубины бурения в системах с горячими сухими породами указаны в табл. 4. Рентабельность разведочных скважин составляет 40%, а продуктивных скважин – 85%. Все затраты будут возрастать на 5% ежегодно в течение ближайших 30 лет. Продажная цена пара (стоимость

Таблица 3

Расходы на бурение скважин различной глубины¹⁾

| Глубина скважины, м | Расходы, долл. |
|---------------------|---------------------|
| 1830 - 2440 | 300 000 - 520 000 |
| 2440 - 3050 | 425 000 - 770 000 |
| 3050 - 4580 | 635 000 - 1 055 000 |
| 4580 - 6100 | 940 000 - 2 750 000 |

¹⁾ Данные фирмы << Филлипс петролеум >>.

Примечание: Расходы учитывают разведку, проходку и освоение скважин, а также повторные закачки. На каждую разведочную скважину дополнительно ассигнуется 100 тыс. долл. В системах с горячей водой для каждой продуктивной или разведочной скважины, оказавшейся продуктивной, требуется скважина для повторной закачки.

Таблица 4

Расходы при бурении на различную глубину в горячих сухих породах

| Стоимость энергии, 10 ⁻³ долл/ (кВт·ч) | Средняя глубина скважин, м | | |
|---|----------------------------|---------------|------------|
| | Запад США | Средний Запад | Восток США |
| 3,0 - 4,0 | 4260-4880 | - | - |
| 4,0-5,0 | 4880-5190 | - | - |
| 5,0-8,0 | 5190-6100 | 4570-5190 | - |
| 8,0-12,0 | 6100-9150 | 5190-6700 | 4570-5490 |

Примечание. Расчетные данные для среднезападной и восточной частей США не включены в оценки геотермальных ресурсов, приведенные в табл. 2.

энергии) будет возрастать в такой же степени. Предполагается, что уровень правительственных налогов не изменится, а налоги в штатах сохранятся на уровне, не превышающем уровня налогов в шт. Калифорния (7,6%). Считается, что скорость истощения энергетических запасов для всех трех типов рассматриваемых систем остается на современном уровне (22% общих доходов, но не более 50% чистых доходов). Расходы на разведочное бурение превышают расходы

на бурение продуктивных скважин. Подразделение налогов отсутствует; износ оборудования в течение 14 лет будет описываться линейной зависимостью.

Некоторыми дополнительными факторами, учитываемыми в данном анализе, являются расходы на геологические, геофизические и инженерные работы; эксплуатационные расходы; косвенные расходы (постоянные и переменные); общие накладные и административно-хозяйственные расходы; расходы на исследовательские работы, по защите окружающей среды и на бурение разведочных скважин. Предполагается, что для сооружения электростанции после завершения бурения продуктивных скважин и введения месторождения в эксплуатацию потребуется 3 года. Следует напомнить, что приведенная в табл. 2 стоимость энергии дана в долларах по курсу 1972 г. и допускается, что она будет возрастать на 5% ежегодно. Это облегчает сравнение геотермальных источников энергии с другими источниками энергии, используемыми в настоящее время в США.

Направления исследований

Ключом к освоению систем с сухими горными породами являются методы разрушения пород. Основная программа исследований в этом направлении заключается в отработке существующего метода гидравлического разрушения и разработке новых более эффективных методов.

Кроме того, необходимо разработать национальную программу глубокого бурения (6100–9150 м) с более широким размещением скважин по территории США, чтобы оценить общие ресурсы геотермальной энергии в стране. Осуществление программы глубокого геотермального бурения обеспечит данные, которые нельзя получить с помощью нефтяных скважин, но потребует создания нового оборудования для бурения при высоких температурах и разработки новой техники бурения. Еще одним направлением исследовательских работ является использование энергии геотермальных систем с низкотемпературными водами. Это необходимо для извлечения энергии как из горячих сухих пород, так и из многочисленных низкотемпературных гидрогеологических систем, обнаруженных во многих районах США.

Рекомендации

Предлагается четыре рекомендации.

1. Финансирование работ по освоению геотермальных систем с сухим паром и высокотемпературными водами должно осуществляться частным сектором. (Температуры считаются высокими, если они достаточны для получения содержания пара 20% при вскипании воды при давлениях, меньших $0,7 \text{ МН/м}^2$, или если они выше 260°C .)

Федеральное правительство должно финансировать фундаментальные исследования, а также исследования, связанные с защитой окружающей среды, с удалением солей, с освоением глубинных месторождений и организационными вопросами.

2. Федеральное правительство должно финансировать программу исследований геотермальных систем с горячими сухими породами, причем основное внимание должно быть уделено инженерным исследованиям и изучению месторождений.

3. Федеральное правительство должно финансировать национальную программу работ по глубокому бурению, что позволит оценить общие ресурсы геотермальной энергии в США при планировании развития энергетики страны.

4. Федеральное правительство должно финансировать программу исследований по извлечению энергии из низкотемпературных термальных вод. Должны проводиться как теоретические исследования с учетом лимитирующих технических факторов, так и исследования на опытных установках, чтобы установить эффективность системы и ее влияние на окружающую среду. Программа должна также предусматривать разработку основного цикла для обычных тепловых электростанций, позволяющего снизить потери тепла на этих электростанциях.

Правительственные расходы будут быстро возмещены и многократно окупятся вследствие увеличения числа геотермальных месторождений на государственных землях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Von Herzen R.P., Surface heat flow and some implications for the mantle, in T.E. Gaskell, ed., The Earth's mantle, New York, Academic Press, pp. 197–230, 1967.

4. ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ СИСТЕМ

Д.И. Уайт

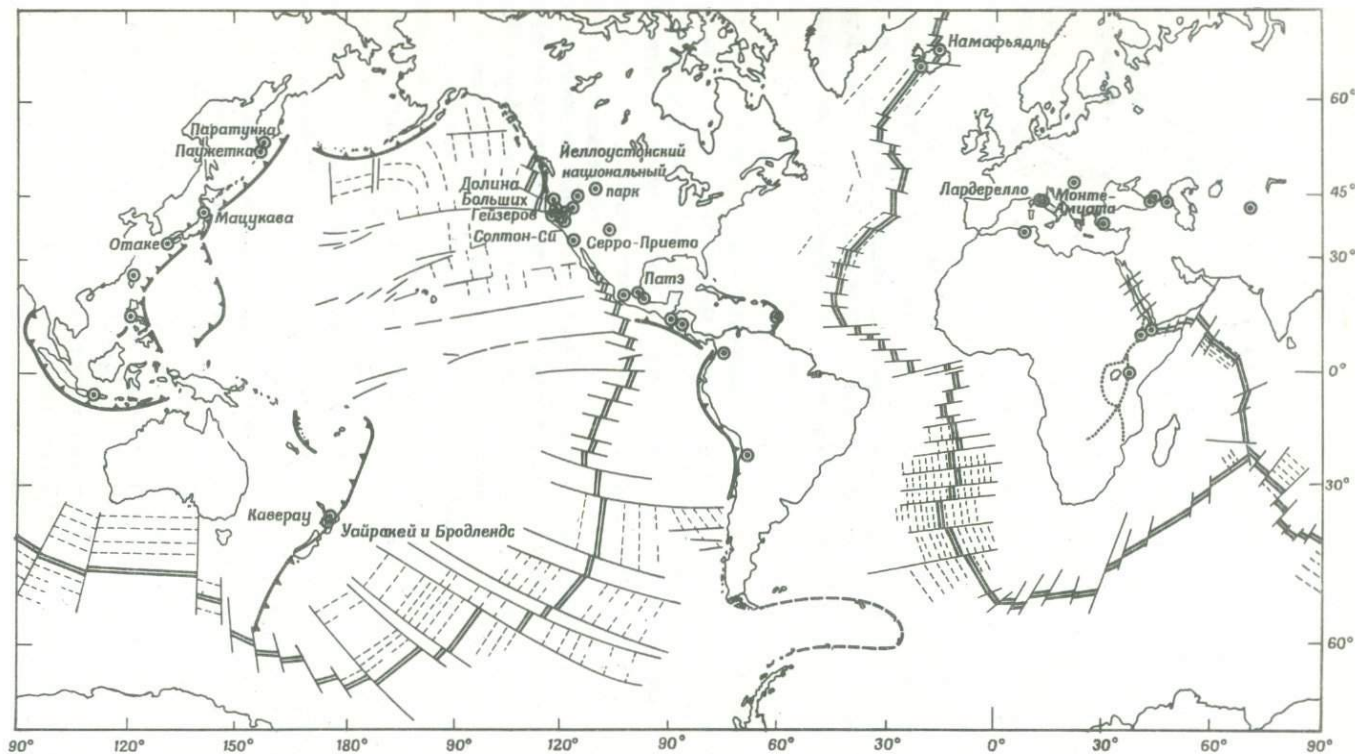
Геотермальные ресурсы связаны с распределением температур и тепловой энергии в глубине Земли. Современная техника позволяет получать электрическую энергию из геотермального пара. Для этого температура на глубине менее 3 км в месторождении должна быть не ниже 180°C, а желательно выше 200°C; необходимо также наличие теплоносителей к поверхности Земли и достаточный объем бассейна ($\sim 5 \text{ км}^3$) с проницаемостью пород, обеспечивающей постоянное поступление теплоносителей к скважинам с достаточным расходом. Поскольку одновременное сочетание указанных характеристик в земной коре встречается довольно редко, нужно осваивать и другие способы использования геотермального тепла.

На фиг. 1 представлены основные известные геотермальные системы мира, а в табл. 1 приведены мощности основных продуктивных месторождений. Конвективно-гидротермальные системы с преобладанием пара или горячей воды в основном связаны с окраинами континентов и с районами вулканической деятельности. Месторождения, расположенные вдоль горных хребтов, тянувшихся от Средиземного моря на восток через Турцию к Кавказу, находятся в сложной зоне стыка евроазиатского и африканского континентов. Большинство геотермальных районов западной части США и центральной части Мексики характеризуются недавней вулканической деятельностью, высокими тепловыми потоками и сравнительно небольшой глубиной залегания мантии Земли.

В тех районах мира, где имеются термальные источники, они используются для коммунальных нужд, теплоснабжения теплиц, промышленных процессов и на курортах /29/. Существенное значение это имеет пока в Исландии /34/, Венгрии /6/ и Японии и является наглядной демонстрацией потенциальных возможностей использования термальных вод в остальных районах.

Дальнейшее развитие техники может существенно изменить требования, предъявляемые к геотермальным месторождениям, и область применения геотермальных вод.

¹⁾ Уайт Д.И. — геолог Геологического управления США, Менло-Парк, шт. Калифорния.



Ф и г. 1. Основные известные геотермальные системы мира.

Во всех названных системах (за исключением Йеллоустонского национального парка) в настоящее время действуют или сооружаются геотермальные электростанции [30]. Большая часть геотермальных полей расположена вдоль горных хребтов (двойные линии) или рифтовых впадин (жирные пунктирные линии) или на окраинах континентов (сплошные линии с зубцами).

Таблица 1

Запасы геотермальной энергии, используемой для производства электрической энергии, 1972 г. /31/

| Страна | Месторождение | Мощность электростанций, МВт | | | |
|------------------|---------------------------------------|------------------------------|-------------|------------------------------|-------------------------|
| | | действующих | сооружаемых | системы с преобладанием пара | системы с горячей водой |
| Италия | Лардерелло | 358,6 | | 358,6 | |
| | Монте-Амиата | 25,5 | | 25,5 | |
| США | Долина Больших Гейзеров ¹⁾ | 302 | 110 | 412 | |
| Новая Зеландия | Уайракей | 160 | | | 160 |
| | Каверау | 10 | | | 10 |
| Япония | Мацукава | 20 | | 20 | |
| | Отате | 13 | | | 13 |
| Мексика | Патэ | 3,5 | | | 3,5 |
| | Серро-Прието | | 75 | | 75 |
| СССР | Паужетка | 5 | | | 5 |
| | Паратунка | 0,5 | | | 0,5 |
| Исландия | Намафьяльд | 2,5 | | | 2,5 |
| В с е г о | | 900,8 | 185 | 816,1 | 269,7 |

¹⁾ По состоянию в ноябре 1972 г. Ввод дополнительной мощности 110 МВт предусматривался в 1973 г., еще 110 МВт будут введены в 1974 г. (в таблице не приведены).

Геотермические градиенты, определяемые теплопроводностью

Температуры ниже поверхности Земли определяются кондуктивными потоками в горных породах, конвективными тепловыми потоками в циркулирующих жидкостях и массообменом в магме. Другие виды теплообмена незначительны и поэтому далее не учитываются. Более того, массообмен в магме рассматривается только в связи с влиянием на теплопроводность и гидротермическую конвекцию.

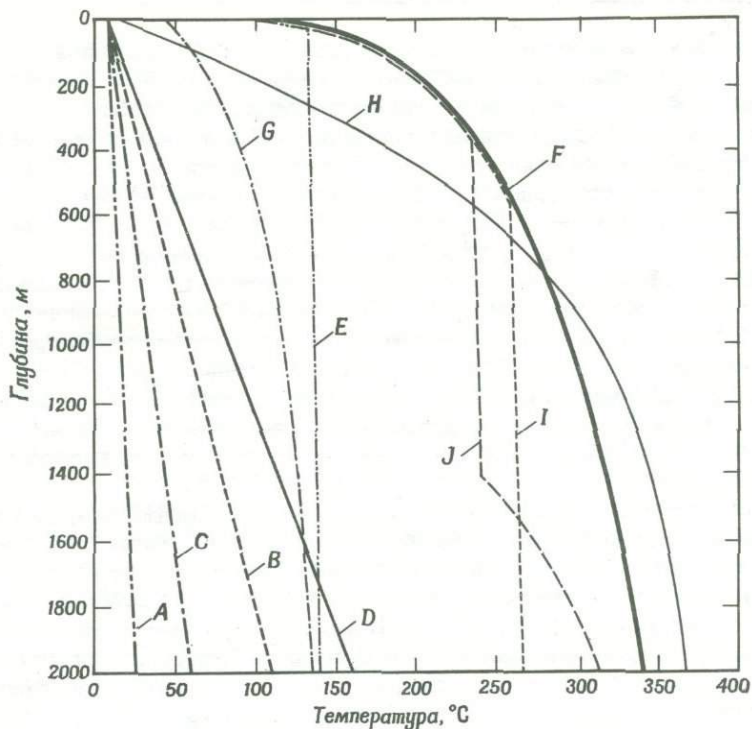
Теплопроводность является основным видом передачи тепла в земной коре, вследствие чего температура непрерывно растет с увеличением глубины, однако геотермический градиент непостоянен. При этом важное значение имеет связь между геотермическим градиентом, тепловым потоком и коэффициентом теплопроводности пород. Соответствующим выражением этой связи является закон Фурье $r = q/k$, где r — геотермический градиент, град/км, q —



Ф и г. 2. Температура в зависимости от глубины в случае, когда тепловой поток определяется теплопроводностью пород. *A* — постоянная теплопроводность; *B* — переменная теплопроводность; *C* — определяющее влияние конвекции; *K* — коэффициент теплопроводности; K_1 — низкое значение *K*; K_2 — умеренное значение *K*; K_3 — высокое значение *K*; K_4 — умеренное значение *K*.

тепловой поток, $\text{Вт}/\text{м}^2$, и k — коэффициент теплопроводности, $\text{кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$. Итак, измеренный геотермический градиент прямо пропорционален тепловому потоку и обратно пропорционален коэффициенту теплопроводности. Самым важным параметром является тепловой поток, однако обычно его приходится рассчитывать по геотермическому градиенту и коэффициенту теплопроводности. Это связано с тем, что при малых значениях тепловой поток нельзя точно измерить ни одним прямым методом.

В районах преобладающего действия теплопроводности, где влияние конвективного переноса тепла незначительно, тепловой поток относительно постоянен во времени и пространстве, однако коэффициент теплопроводности пород существенно изменяется с глубиной в зависимости от минерального состава, пористости и содержания жидкости в порах. Следовательно, градиенты температуры могут существенно изменяться с глубиной, как это видно из фиг. 2 (кривая *B*), где показано влияние разных значений коэффициента теплопроводности на геотермические градиенты по сравнению со случаем его постоянного значения (кривая *A*). Надежно предсказать геотермический градиент ниже разведочных глубин невозможно из-за вероятных изменений пористости и коэффициента теплопроводности пород и особенно в связи с тем, что влияние конвективного переноса тепла неизвестно.



Ф и г. 3. Сравнение профилей температур, определяемых градиентами, связанными с теплопроводностью и заключенными в "нормальных" пределах (A, B, C), а также выходящими за эти пределы (D), и профилей температур, определяемых конвективным теплообменом в системах с горячей водой различного типа, с расчетной кривой температур кипения чистой воды (F).

Районы с почти "нормальным" геотермическим градиентом, определяемым теплопроводностью. Средний геотермальный тепловой поток равен $6,28 \cdot 10^{-2}$ Вт/м² /25, 37/. Это составляет 1/2000 часть средней энергии солнечного излучения, падающего на поверхность Земли, т. е. очень малую, хотя и важную, величину. В рассматриваемом случае считаем, что "нормальный" тепловой поток имеет значения от $3,34 \cdot 10^{-2}$ до $8,36 \cdot 10^{-2}$ Вт/м². Коэффициенты теплопроводности большинства пород имеют значения от 0,167 до 4,19 Вт/(м·град). В этих пределах градиент температуры может возрастать от 8 до 50 град/км (линии A и B фиг. 3), составляя в среднем 25 град/км (линия C) или несколько более. На глубине 3 км температуры при таких градиентах могут быть на 24–150°C выше температуры на

поверхности, а в среднем на 75°C . Большая часть "нормальных" районов не подходит для эффективного использования геотермальной энергии ни в настоящем, ни в ближайшем будущем. Скрытое же в них тепло нельзя рассматривать как полезный источник и тем более как источник, подлежащий освоению. Большая часть, если не все такое "низкотемпературное" тепло, подобна примесям золота, меди или урана, которые содержатся в обычных породах. Некоторые районы одновременно могут иметь максимальный тепловой поток и минимальный коэффициент теплопроводности из интервала их "нормальных" значений. К таким районам относится побережье Мексиканского залива /22/, где геотермические градиенты составляют до 45 град/км или несколько более (их изменение близко к линии *B* фиг. 3). Подобные районы могут стать исключением и целесообразно их дальнейшее изучение и оценка, особенно если уже имеются нефтяные или газовые скважины, которые можно использовать для исследовательских целей.

Районы с "ненормальной" высоким геотермическим градиентом, определяемым теплопроводностью. Ненормально высокие геотермические градиенты обусловлены необыкновенно высоким тепловым потоком и очень низким значением коэффициента теплопроводности или удачными сочетаниями обоих факторов. В некоторых больших районах с такими показателями, например в Венгерской низменности /6/, геотермические градиенты составляют $40-75$ град/км, а в отдельных местах они, возможно, выше. Несколько довольно больших районов с высоким тепловым потоком, которые нельзя отнести к системам с конвективным теплообменом, существуют и в США. В горах Бэтл-Маунтин-Хай /38/ среднее значение теплового потока равно $12,6 \cdot 10^{-2}$ Вт/м², однако геотермические градиенты составляют $30-60$ град/км и не столь высоки, как можно было бы ожидать. Это связано с относительно высоким значением коэффициента теплопроводности ($\lambda \approx 3,77$ Вт/(м·град)). В районе около Мерисвилла (шт. Монтана) /2/ наблюдаются более высокие значения теплового потока ($29,3 \cdot 10^{-2}$ Вт/м²). Коэффициенты теплопроводности пород там тоже высоки, и измеренные градиенты температуры составляют в среднем 75 град/км (линия *D* фиг. 3). Оба района можно отнести к районам интрузивных изверженных пород. Высокие значения теплового потока в сочетании с несколько более низкими значениями коэффициента теплопроводности возможны в районе, окружающем озеро Клир-Лейк в Калифорнии. Здесь встречаются геотермические градиенты 100 град/км.

Системы с конвективным переносом тепла жидкостями

В таких системах тепло переносится в основном циркулирующей жидкостью, а не вследствие теплопроводности. Конвективный перенос тепла возникает благодаря нагреванию и последующему теплово-

му расширению жидкостей в поле тяготения. Тепло, подводимое в основание циркулирующей системы, является энергией, приводящей эту систему в движение. Нагретая жидкость с малой плотностью стремится подняться вверх и замещается холодной жидкостью с более высокой плотностью из верхней части системы. Конвекция по своей природе стремится увеличить температуру в верхней части системы и понизить ее в нижней части. Кроме того, конвекция (кривая *C*, фиг. 2) изменяет геотермический градиент, связанный только с теплопроводностью (ср. кривые *A* и *B*, фиг. 2). Поэтому только геотермический градиент или только тепловой поток не может характеризовать конвективную систему. Обычно градиенты очень высоки около поверхности и местами превышают даже 3 град/м глубины. Экстраполируя это значение градиента на глубину 1 км, получаем невероятно высокое значение 3000 град/км, превышающее точки плавления всех обычных пород (-700–1200°C). Измерения показали, что градиенты температур существенно понижаются с увеличением глубины до достижения температуры основания циркулирующей системы. В отдельных местах возможно обратное изменение температур.

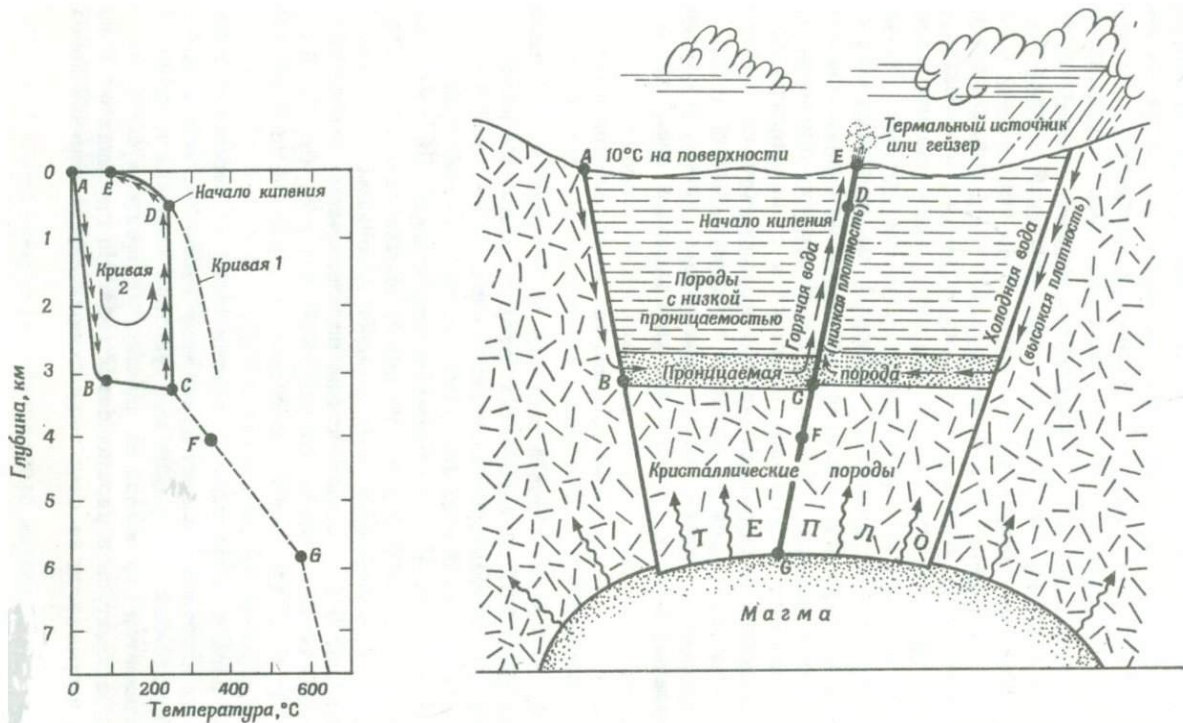
Существует два основных типа конвективных систем, различающиеся по физическому состоянию фазы, определяющей давление в системе.

Системы с горячей водой

В системах с горячей водой давление определяет непрерывная жидкая фаза /46, 50/. В неглубоких зонах с низким давлением может содержаться некоторое количество пара, в основном в виде отдельных пузырьков. О неразрывности жидкости можно судить по распределению давления и по относительному содержанию компонентов, которые растворимы в воде, но имеют низкие давления паров и, следовательно, пониженную концентрацию в водяном паре при низком давлении. Этими компонентами, определяемыми с помощью обычного анализа воды, являются SiO_2 , Na^1 , K , Ca , Mg , Cl , SO_4 , HCO_3 и CO_3 (B , CO_2 , H_2S и NH_3 могут растворяться в воде и улетучиваться из нее и поэтому не рассматриваются).

Горячая вода в конвективной системе (фиг. 4) переносит тепло из глубинных источников к геотермальному бассейну, залегающему на меньших глубинах, доступных для бурения. Холодная дождевая вода просачивается под землю на площади от десятков до тысяч квадратных километров и перемещается вниз. На глубинах от 2 до 6 км вода нагревается за счет теплопроводности от горячих пород,

¹⁾ Электрический заряд ионизованных компонентов не указывается, поскольку он не важен в данном рассмотрении.



Ф и г. 4. Модель высокотемпературной геотермальной системы с горячей водой.
 1 – расчетная кривая температур кипения чистой воды; 2 – профиль температур для циркулирующей воды от исходной точки А до конечной точки Е.

которые в свою очередь, вероятно, получают тепло от расплавленной породы. Вода расширяется при нагревании и за счет разности плотностей начинает перемещаться вверх к поверхности в столбе с площадью сечения от 1 до 50 км². Если породы пронизаны множеством связанных между собой пор или трещин с высокой проницаемостью, то горячая вода быстро поднимается к поверхности и ее энергия рассеивается. Однако если подъему горячей воды препятствуют породы с не связанными между собой порами или трещинами, то геотермальная энергия может накапливаться в бассейне под водоупорными слоями. В переносе тепла, конечно, играет роль разность плотностей холодной воды, опускающейся с поверхности, и поднимающейся горячей геотермальной воды.

Некоторые подклассы. Системы с горячей водой включают в себя множество подклассов, которые пока еще строго не определены. Классификацию можно проводить по содержанию соли, основным химическим характеристикам, интервалу температур, тектоническим и стратиграфическим условиям, наличию или отсутствию проницаемых пород в месторождении, водоупорным пластам, расположенным над месторождением. Здесь не будет проводиться систематическая классификация определенной системы, а будут даны подклассы, которые могут представлять интерес для геотермальной разведки.

1. Системы, характеризующиеся умеренными температурами в интервале 50–125°C, но достигающими иногда 150°C, как, например, в Исландии [3], а также сходством химического состава поверхностных и грунтовых вод на небольшой глубине. Некоторые такие системы с более высокими температурами могут проявляться на поверхности в виде кипящих источников со значительным расходом. При измерении температур в такой системе получается профиль температур, аналогичный линии *E* (фиг. 3). Такая линия соответствует быстрому подъему воды при давлениях, близких к гидростатическому. Давления оказываются слишком высокими, чтобы могло возникнуть кипение при существующих температурах, за исключением верхних 20–30 м, где линия *E* достигает кривой *F*, представляющей расчетные температуры кипения чистой воды при давлениях, определяемых ее плотностями вплоть до поверхности земли. Причем плотности воды соответствуют принятым температурам. Действительные профили температур в таких системах в большой степени зависят от их температур на глубине и от расхода восходящего потока жидкости. При большом расходе восходящего потока (как при принятом для линии *E*) потери тепла, связанные с теплопроводностью, на границах системы невелики. Однако при малом расходе восходящего потока (как для кривой *G*) потери тепла, связанные с теплопроводностью, возрастают. При дальнейшем снижении расхода восходящего потока основным видом передачи тепла в таких системах становится теплопроводность.

2. Системы в глубоких осадочных бассейнах, обычно содержащие соленые воды с умеренной температурой, подобные водам, сопровождающим нефтяные месторождения. Эти воды, по крайней мере частично, не атмосферного происхождения /43, 47/. Некоторые системы с рассолами, такие, как Уилбер-Спрингс в шт. Калифорния, характеризуются термальными источниками. Однако конвекция в наиболее глубоких породах столь ограничена (вследствие плохой проницаемости, градиентов концентрации или малых перепадов температур), что геотермические градиенты, обусловленные теплопроводностью, почти не нарушаются и потери тепла отсутствуют. Тем не менее перепады давлений обеспечивают в общем случае некоторую циркуляцию под поверхностью земли.

3. Системы с горячей водой, содержащие растворы очень высокой солености. Геотермальная система в Солтон-Си и бассейны соляных растворов в Ред-Си /10, 19, 30, 36, 44/ содержат соляные растворы с концентрацией 26%. Однако эти системы значительно отличаются друг от друга по составу соляных растворов из-за разных зависимостей от температуры, химического состава пород и отложений. Вследствие влияния концентрации на кипение /18/ кривая изменения температуры в системе Солтон-Си (кривая *H*, фиг. 3) /19/ проходит значительно выше расчетной кривой для чистой воды.

4. Системы с теплоизолирующей кровлей над месторождением, отличающиеся пониженными потерями тепла. Такие породы в системах Солтон-Си (шт. Калифорния) и Серро-Прието (Мексика) состоят из плохопроницаемых, мелкозернистых отложений. Этим объясняется преобладающая роль определяемого теплопроводностью градиента низких температур вблизи поверхности (кривая *H*, фиг. 3) в системе Солтон-Си.

5. Высокотемпературные конвективные системы с горячей водой, которые сами образуют теплоизолирующую кровлю путем "самоуплотнения". Гидротермальные минералы откладываются в порах, особенно вблизи поверхности, где происходит резкое снижение температур. Фиг. 4 и кривая 1 фиг. 3 обобщают данные, полученные в Уайракей (Новая Зеландия) и в местах выхода гейзеров в Йеллоустонском национальном парке. Из-за термоартезианского давления и закупорки пор в породах действительные градиенты давления вблизи поверхности могут превышать гидростатические, как это имеет место в Йеллоустонском национальном парке /43/. Значения температуры при этом могут оказаться несколько выше расчетной кривой *F*.

Основные характеристики. Основные характеристики систем с горячей водой рассмотрены в работах /46, 50/ и вкратце описываются ниже.

1. Термальные источники являются общим, но не обязательным условием существования конвективных систем с горячей водой. Ес-

ли водоносный пласт расположен на поверхности земли или вблизи нее, весь или почти весь расход системы реализуется в виде термальных источников. Однако если породы вблизи поверхности земли проницаемы и водоносный пласт расположен на глубине, то почти 100% стока из системы может находиться под поверхностью, где он рассеивается в подземных водах и не выходит непосредственно на поверхность.

2. Термальные источники с очень высокой температурой и расходом отличаются также высоким содержанием SiO_2 , Cl, B, Na, K, Li, Rb, Cs и As по сравнению с их содержанием в окружающих грунтовых водах. Анализ содержания SiO_2 и соотношения Na-K-Ca в таких источниках /17/ является наилучшим способом оценки температуры под поверхностью земли.

3. "Базовая" температура /3, 5/ характеризует наиболее глубокие части многих конвективных систем с горячей водой. Область незначительного изменения температуры между точками C и D на фиг. 4 соответствует базовой температуре системы Уайракей, которая до эксплуатации составляла -260°C /1/. Базовые температуры некоторых других систем с умеренной или низкой концентрацией соли ($< 0,5\%$) достигают 300°C . Системы данного типа с более высокими температурами пока неизвестны.

4. Изолированная система с рассолом в Солтон-Си имеет температуры до 360°C (кривая H/фиг. 3) /28/, а в системе Серро-Прието в Нижней Калифорнии (где концентрация соли $-2/3$ концентрации соли в морской воде) температуры еще выше и достигают 388°C . Рассолы могут иметь температуры, достигающие или превышающие критическую температуру чистой воды (373°C), так как их физические свойства значительно отличаются от свойств чистой воды /18, 48/.

5. Кремнезем SiO_2 является наиболее важным самоуплотнителем систем с горячей водой. При температурах выше -140°C это в основном кварц и халцедон, а в низкотемпературных зонах и в породах кровли уплотнителями являются опал и β -кристобалит /20, 48/. Важную роль могут также играть цеолиты, глинистые минералы и кальцит.

6. Гейзериты и аморфный или перекристаллизованный кремнезем SiO_2 , откладывающийся в грифоне гейзера, указывают на выброс подземных вод с базовыми температурами, составляющими 180°C и более /17, 46/. Травертин (CaCO_3 выделяющийся из вод термальных источников), наоборот, указывает на низкие температуры или, что бывает реже, растворение известняка приводит к снижению температуры до их значений на поверхности.

7. Низкотемпературные конвективные системы обладают небольшими возможностями для самоуплотнения, так как их воды не содер-

жат достаточного количества SiO_2 . Однако со временем системы с максимальными температурами ниже -150°C могут стать *более* проницаемыми, поскольку при нагревании холодной атмосферной воды с низким содержанием SiO_2 последний растворяется в количестве 0,14%. Температура -150°C достаточно высока, чтобы вызвать увеличение пористости пород месторождения, содержащих кварц, но, возможно, недостаточна, чтобы противостоять гидратации минералов, приводящей к закупорке пор. Вследствие этого расход в некоторых системах с умеренной температурой реализуется в виде мощных одиночных источников без признаков самоуплотнения с течением времени (кривая E фиг. 3).

8. В отличие от только что описанных систем в высокотемпературных системах с максимальной температурой более -180°C проницаемость кровли *понижается* с течением времени из-за самоуплотнения. Однако полное уплотнение достигается редко. Через имеющиеся каналы неизбежно происходят утечки. Могут образоваться новые каналы и вновь открыться старые под действием тектонических сил или вертикальных перепадов давления, связанных с термоартезианским напором. Местные градиенты давления могут существенно превышать гидростатические. Градиенты давления воды в верхних горизонтах в несколько сотен метров мощности, определенные при разведочном бурении в Йеллоустонском национальном парке, оказались в среднем на -20% , а в одной из скважин на -40% выше гидростатических /49/. Однако такие высокие градиенты редки и встречаются лишь в неглубоких участках конвективных систем.

9. От 70 до 90% всего расхода скважин в проницаемых месторождениях составляет вода. Количество пара, образующегося при понижении давления, определяется начальной температурой жидкости и конечным давлением (по Муфлеру). Например, при вскипании воды при давлении в устье скважины $0,35 \text{ МН/м}^2$ (изб.) и начальной температуре 300°C содержание пара равно 33%, при 200°C оно равно 11%, а при 150° пар не образуется вообще.

10. Скважины в породах с низкой проницаемостью могут давать сначала пар и воду, затем через некоторое время влажный пар и наконец сухой пар по аналогии со стадиями извержения некоторых гейзеров /42/. Может показаться, что увеличение содержания пара является положительным фактором, однако это не совсем так. Тепло горных пород затрачивается не только на испарение воды и, следовательно, образование пара, но также ускоряет осаждение растворимых солей, что приводит к снижению проницаемости.

11. В большинстве месторождений с горячей водой в продуктивную скважину поступает только вода. При подъеме по скважине она сохраняется в жидком состоянии до тех пор, пока давление не понизится настолько, что начинают образовываться пузырьки пара. При

дальнейшем подъеме воды все большее ее количество "вскипает" и переходит в пар (по мере понижения давления и температуры смеси). Расширяющийся пар захватывает оставшуюся воду и с возрастающей скоростью пароводяная смесь выбрасывается над поверхностью земли (если нет горизонтального отвода в трубы или в сепаратор), подобно тому как это происходит в природных гейзерах. Глубина фронта вскипания в скважине зависит в основном от начальной температуры воды, а также от начального давления теплоносителя и конечного давления. Приблизительную глубину начала вскипания можно рассчитать, однако методика расчета достаточно сложна. Более подходящим методом, для осуществления которого имеется соответствующее оборудование, является измерение градиентов давления в скважине в рабочих условиях. Разрыв наклона кривой градиента давления соответствует глубине начала вскипания.

12. Содержание хлоридов в воде с температурой более -150°C почти всегда превышает $0,015\%$. Однако имеются системы с температурой выше 200°C , в которых содержание хлоридов составляет $0,004\%$, но таких систем очень мало.

13. Хлорид является единственным веществом, отличающим системы с преобладанием горячей воды от систем с преобладанием пара. Большинство хлоридов металлов хорошо растворяется в воде, причем хлориды минералов многих горных пород легко растворяются в воде при высокой температуре /13/. Однако хлориды металлов при температурах порядка 400°C почти не улетучиваются и почти не растворяются в паре при низких давлениях. Таким образом, содержание хлоридов в воде является отличительным признаком системы с горячей водой (содержание хлоридов $> 0,005\%$). Однако в некоторых гидротермальных системах источники содержат соли серной кислоты и очень мало хлоридов. Пар в таких системах образуется при вскипании воды ниже водоносного горизонта, содержащего хлориды. В остальном химический состав таких источников аналогичен составу источников в системах с преобладанием пара.

Системы с преобладанием пара

Некоторые геотермальные системы, включая известные месторождения в Лардерелло и в Долине Больших Гейзеров, дают сухой или пергретый пар без жидкости. Поэтому их часто называют системами "сухого пара", однако Уайт и др. /49/ считают, что обычно в бассейнах существуют одновременно вода и пар, причем пар является непрерывной фазой, определяющей давление. Поэтому название "системы с преобладанием пара" является, по-видимому, более подходящим.

По мнению многих специалистов, теплоноситель в месторождении Лардерелло представляет собой насыщенную жидкость /14, 26/ и

перегретый пар, который при его извлечении восполняется за счет вскипания воды из глубоких горизонтов /12, 21/ или рассола /10/. Предполагается, что бассейн в основном заполнен паром и лишь в отдельных местах имеется кипящая вода /39/, которая, очевидно, не оказывает существенного влияния на подповерхностное давление. Системы с преобладанием пара, типа Лардерелло, по-видимому, произошли от систем с горячей водой, характеризующихся очень высоким притоком тепла и очень малым притоком воды /50/. Когда развивающаяся система становится достаточно нагретой и воды выпаривается больше, чем поступает, начинается образование бассейна с преобладанием пара (в известных системах это произошло, вероятно, от тысяч до десятков тысяч лет тому назад). Недостающая часть жидкости восполняется водой из крупных трещин и пор. Некоторое количество воды удерживается в более мелких порах и на поверхностях трещин под действием поверхностного натяжения, а также остается в закрытых порах и в различных вертикальных трещинах. Кроме того, потери тепла вследствие теплопроводности на границах бассейна приводят к конденсации пара. Наконец, жидкость, не задержанная всеми этими "ловушками", под действием силы тяжести просачивается вниз к более глубоким породам, насыщенным водой. Однако в больших порах и открытых каналах именно пар является непрерывной фазой, определяющей давление.

В соответствии с такой моделью глубинная граница раздела, вероятно, почти горизонтальная, отделяет нижнюю зону с преобладанием жидкой фазы от верхней зоны, в которой давление определяется паровой фазой. Эта граница продолжает понижаться по мере того, как расход теплоносителя из бассейна (в основном в виде пара) превышает его поступление, а объем пара продолжает увеличиваться. Лишь часть этого пара выходит на поверхность. В основном он конденсируется на границах бассейна, где тепло теряется вследствие теплопроводности. Например, на образование кондуктивного теплового потока от границ месторождения к поверхности, равного $0,835 \text{ Вт/м}^2$, требуется тепло, высвобождающееся при конденсации 29 кг пара на 1 км^2 поверхности в 1 с /46/. Кондуктивный тепловой поток через бассейн не может обеспечить такого большого количества тепла вследствие почти постоянной температуры в бассейне. Единственным источником тепла является скрытая теплота парообразования. Следовательно, просачивание конденсата вниз через бассейн обеспечивает совместное существование жидкости и пара в природных системах до начала их эксплуатации.

Различаются два подкласса систем с преобладанием пара: Лардерелло и Монте-Амиата.

Система Лардерелло. Физические, химические и геологические характеристики систем с преобладанием пара в Долине Больших Гейзеров, Лардерелло и Мацукаве, которые известны на сегодняшний

день /30, 46, 50/, согласуются с тем, что описанной моделью и могут быть представлены в следующем виде:

1. Бассейны, расположенные на глубине -350 м и ниже, преимущественно имеют начальную температуру -240°C (кривая 1, фиг. 3) и давление $-3,5 \text{ МН/м}^2$. Известные данные для месторождений в Лардерелло и Мацукаве /7, 31, 35, 39/ убедительны, но отрывочные данные для глубокого бассейна системы Долины Больших Гейзеров менее достоверны /33/. Сообщалось о некотором различии начальных физических характеристик в скважинах, пробуренных на большие глубины (об изменениях в Лардерелло, происшедших в процессе эксплуатации, говорится в п. 9).

2. Относительное постоянство начальных температур и давлений, очевидно, строго определяется максимальной энтальпией насыщенного пара (2780 Дж/г при 236°C и $3,18 \text{ МН/м}^2$) /21, 39, 50/. Если содержание газов в паре превышает несколько процентов, то эти физические характеристики существенно изменяются /50/. Например, при постоянной температуре пароводяной смеси 236°C содержание газов в паре, равное 1%, увеличивает общее давление всего лишь до $3,21 \text{ МН/м}^2$, увеличение содержания газов до 5% приводит к увеличению давления до $3,35 \text{ МН/м}^2$, а увеличение содержания газов до 10% — к увеличению давления до $3,53 \text{ МН/м}^2$.

3. Давления в рассматриваемых системах с преобладанием пара значительно ниже гидростатического и, за немногими исключениями, эта разница увеличивается с глубиной /41/. Согласно некоторым данным по давлениям в скважинах, они лишь немного возрастают с глубиной вследствие малой плотности пара, определяющего величину давления. В табл. 3 работы /49/ приводятся данные, учитывающие только влияние глубины. Очевидно, такая система не могла бы образоваться и существовать, если бы окружающие бассейн породы, насыщенные водой, обеспечивали ее высокий приток. Поступающая вода втекала бы в бассейн под действием гидростатического давления причем ее приток был бы выше ее расхода. В таком случае бассейн с пониженным давлением исчез бы.

4. Фумаролы, грязевые пузыри, грязевые вулканы, мутные водоемы и насыщенная кислотой почва характеризуют районы разгрузки гидротермальных систем, в которых поверхностная активность наиболее интенсивна. Термальные источники в таких районах в основном являются кислыми, поскольку при окислении H_2S в выходящих газах образуется H_2SO_4 . Показатель pH достаточно низок и составляет 2–3, за исключением случаев, когда в достаточном количестве имеется NH_3 для нейтрализации кислоты. Содержание сульфатов высокое, однако содержание Cl невысокое и постоянное ($< 0,0015\%$). Содержание хлорида в источниках, потоках и грунтовых водах по соседству с этим районом также низкое. Районы, в которых поверх-

ностная активность не интенсивна, характеризуются слабокислыми или слабощелочными водами с бикарбонатами-сульфатами. Эти воды могут иметь высокое содержание CO_2 , V или NH_4 при низком содержании Cl . Термальные воды в источниках таких районов иногда имеют аномально высокое содержание SiO_2 .

5. Если в системах с преобладанием пара естественная разгрузка воды наблюдалась непосредственно перед эксплуатацией, ее расход невелик и составляет от нескольких десятков до нескольких сотен литров в минуту. К сожалению, не существует детального описания естественной разгрузки месторождения в Лардерелло, предшествовавшей его эксплуатации, начатой в 1904 г. Попытка оценить эту разгрузку привела к заключению, что "согласно документам и другим свидетельствам, общий расход воды, пара и газа мог составлять величину порядка нескольких сотен тонн в час" /39/. Эта величина эквивалентна нескольким тысячам литров в минуту, если представить все содержание H_2O жидкостью, и является, по видимому, чрезмерно большой разгрузкой по сравнению с расходами до эксплуатации в Долине Больших Гейзеров и Мапукаве, а также из неразработанных систем в Йеллоустонском национальном парке (шт. Вайоминг), в национальном парке Лассен-Вулканик (шт. Калифорния), в Стимбот-Спрингс (шт. Невада) и в Валлес-Кальдере (шт. Нью-Мексико), также, вероятно, являющейся системой с преобладанием пара. Однако расход в Лардерелло не является чрезмерно высоким, если учесть, что большую его часть составляют подповерхностные воды, нагреваемые поднимающимся паром. Следует отметить, что большую часть естественного расхода жидкости из систем с преобладанием пара составляют подповерхностные воды, нагреваемые паром. Особенно это относится к системам в национальных парках Йеллоустонском и Лассен-Вулканик.

6. Продуктивные скважины обычно дают сухой или перегретый пар (перегрев составляет от нескольких градусов до 50°C и более). Однако жидкая вода встречается в некоторых непромышленных скважинах, расположенных на границах бассейнов, и в пароводяных смесях, первоначально истекающих из некоторых скважин, в которых влажный пар (т. е. пар, содержащий небольшое количество воды) становится сухим. Скважины, закрытые для восстановления, содержат только пар, однако Сестини /39/ отмечает, что в некоторые скважины в Лардерелло, которые были на время закрыты, поступает "достаточно высокотемпературная вода" но не приводит ее характеристик и не дает объяснения ее происхождения. Возможно, что эта вода дренируется непроницаемыми породами или заключена в вертикальных трещинах, не являясь частью большой системы с преобладанием жидкости, так как другие более глубокие скважины имеют начальные давления, равные 3,1–3,4 МН/м², типичные для систем с преобладанием пара /37/.

7. Большая часть тепла бассейна заключена в твердых породах, составляя 80–90% общего количества тепла /21, 49/.

8. Перегретый пар образуется из насыщенного при падении давления во время прохождения пара через высушенные горячие породы. Основными параметрами при этом является теплосодержание твердых пород и снижение температуры кипения при понижении давления /41/.

9. При продолжительной эксплуатации большинства скважин в Лардерелло наблюдалось почти непрерывное увеличение температуры в устье скважин (до 260°C в 1966 г.) и последующее истощение большинства скважин /37/. При этом происходило увеличение энтальпии до 2960 Дж/г, а также перегрев. Возможность таких постепенных изменений предполагалась и ранее, а теперь подтверждена Сестини, который предполагает возрастающую зависимость от наличия H_2O , имеющей сверхкритические параметры ($> 374^\circ C$), из глубинных магматических пород. В более удовлетворительном объяснении Трусделла, Уайта и Муфлера /41/ предполагается возрастание зависимости от вскипания соленой воды из глубокого истошающегося слоя, которая по мере испарения становится все более соленой /41/. На фиг. 3 (кривая J) показано возможное распределение температур в глубоком слое рассола (при допущении, что концентрация соли равна 25% и слой начинается на глубине 1400 м). Максимальная энтальпия пара, образующегося из 25%-ного раствора NaCl, при 275°C равна 2850 Дж/г /18/. Достигаются и значительно более высокие значения температуры и энтальпии пара, поскольку концентрация соли возрастает и кипение происходит в окружающей среде с большей начальной температурой. Данные, полученные Хаасом /18/, были рассчитаны при 35%-ном содержании NaCl, когда образующийся пар имеет максимальную энтальпию 2870 Дж/г при температуре $\sim 295^\circ C$.

Проведенное рассмотрение в основном относится к таким системам, как Лардерелло, Долина Больших Гейзеров и Мапукава /46/, которые имеют начальные температуры в бассейне $\sim 240^\circ C$, давления в полностью закрытой скважине $\sim 3,5$ МН/м² и содержание газов, помимо пара, $\sim 5\%$ или менее. Автор и его коллеги делают заключение, что такие системы, по-видимому, имеют существенные площади выхода, что приводит к потерям большого количества первоначально содержащейся в порах воды и созданию условий для преобладания паровой фазы и выноса других газов. По всей вероятности, каждая такая большая система имеет по меньшей мере один основной район с разгрузкой, которая не может происходить в грунтовые воды. При некоторых обстоятельствах (см. п. 4 рассматриваемых характеристик) может наблюдаться меньший расход пара и газов. Если для CO_2 , H_2S и других газов нет выхода, они концентрируют-

ся в отдельных местах на более холодных границах и в верхней части месторождения, где тепло отводится теплопроводностью. Снижение температуры в наружных и верхних частях бассейна сопровождается конденсацией некоторого количества пара (1/50, табл. 5/). Расход жидкости в системах такого подкласса ограничен низкой проницаемостью каналов, по которым жидкость поступает в месторождение. Эти каналы ограничивают прохождение жидкости через систему.

Системы Монте-Амиата. Вторая разновидность систем с преобладанием пара до сих пор полностью не изучена, однако во многих отношениях она аналогична горячим месторождениям природного газа /50/. Температуры в Монте-Амиата намного ниже ($\sim 150^{\circ}\text{C}$), а начальное содержание газа намного выше ($\sim 90\%$ /8, 9/), чем в Лардерелло, где начальное давление составляет 2–4 МН/м². Начальное содержание пара относительно низкое в основном вследствие его конденсации у более холодных границ бассейнов. При эксплуатации и понижении давления первичный пар с высоким содержанием газов выходит из бассейна и замешается паром с относительно низким давлением и малым содержанием газов, образующихся в результате кипения воды при невысокой температуре. Еще одной особенностью жидкостей, получаемых в месторождении Баньоре (в районе Монте-Амиата), является переход сухого пара в пароводяную смесь /9, табл. 2/.

Последнее может быть связано с подъемом уровня глубинных вод под действием гидростатического давления при понижении давления в бассейне в процессе его эксплуатации. Основное сопротивление движению жидкости в системах подкласса Монте-Амиата, очевидно, создается при *разгрузке*, происходящей через малопроницаемую кровлю, вследствие чего количество выходящих газов равно или меньше количества вновь образующихся или поступающих в систему газов. Выход газов и пара не является условием образования или существования месторождений с преобладанием пара подкласса Монте-Амиата, в отличие от месторождений подкласса Лардерелло. Тем не менее большинство таких месторождений несомненно характеризуется утечкой некоторого количества газов.

Проблемы использования

Существует множество проблем, связанных с эксплуатацией в больших масштабах различных типов и подтипов геотермальных месторождений. Рассмотрим наиболее важные из них.

1. Из-за их специфических геологических и физических особенностей рентабельные месторождения с преобладанием пара подкласса Лардерелло редки и составляют всего $\sim 5\%$ всех геотермальных систем с температурами более 200°C . О преимуществах таких месторождений можно судить по мощности построенных на них электростан-

ций (действующих и сооружаемых), которая составляла в 1973 г. 73% мощности всех геотермальных электростанций.

2. Площади разгрузки месторождений подкласса Лардерелло характеризуются явными проявлениями активности, особым химическим составом и выцветанием почвы. Это означает, что полностью скрытые глубинные системы могут быть и не обнаружены.

3. Системы с преобладанием пара подкласса Монте-Амиата, характеризующиеся относительно высоким содержанием неконденсирующихся газов и невысокими температурами, возможно, более распространены, чем системы подкласса Лардерелло, однако обнаружить их значительно труднее из-за отсутствия явных поверхностных проявлений. По своим физическим и эксплуатационным характеристикам они менее привлекательны для разработки (2,3% в табл. 1).

4. Высокотемпературные месторождения с горячей водой (25% в табл. 1) перспективны для увеличения производства электроэнергии в ближайшем будущем, однако существующие методы преобразования энергии неэффективны: к.п.д. преобразования тепловой энергии в электрическую составляет 1% /5/.

5. Воды многих систем с преобладанием горячей воды при истечении с вскипанием и при охлаждении дают отложения SiO_2 или CaCO_3 в скважинах или на поверхности труб. Если же вскипание и образование накипи происходит в устье скважин, то их пропускная способность и производительность существенно понижаются.

6. Коррозионная активность некоторых горячих вод связана с их высокой соленостью, большим содержанием CO_2 или O_2 и высокой кислотностью, обусловленной присутствием H_2SO_4 и реже HCl .

7. Некоторые системы с горячей водой не имеют достаточных объемов, температуры или проницаемости для их эффективного использования. Согласно опыту, полученному в Бродлендсе и Уайотапу (Новая Зеландия), а также в Беоваве и Стимбот-Спрингс (шт. Невада), недостаточная проницаемость и другие неудовлетворительные характеристики месторождений столь же часты, как и недостаточно высокая температура /45/.

8. Термальные источники могут представлять опасность для окружающей среды, поскольку они содержат больше растворимых солей, V , NH_3 , As и тяжелых металлов, чем обычные поверхностные и грунтовые воды. Требуется специальные средства для их удаления, из которых наиболее эффективна закачка воды в месторождение.

9. Некоторые изливающиеся горячие воды несовместимы с грунтовыми водами или с водами, содержащимися в бассейне, даже если первоначально они и были идентичны. Поэтому необходимо предварительно проверить совместимость таких вод и надежность закачки, а также найти способы решения возникающих при этом проблем. Повторная закачка была опробована в течение одного года в системе Солтон-Си и в течение более коротких периодов времени в системе

Лонг-Валли (шт. Калифорния) и в месторождении Ауачапан (Сальвадор). Единственное длительное испытание продолжительностью около 3 лет было проведено в Долине Больших Гейзеров (шт. Калифорния). Здесь успешно проводилась закачка охлажденного конденсата в бассейн с преобладанием пара при давлении ниже гидростатического. Большая часть жидкости, по всей вероятности, испарялась при прохождении через все еще горячие породы. Обычно эти результаты приводятся как доказательство того, что закачка всегда должна быть успешной. Но так как различные системы с горячей водой существенно отличаются друг от друга по химическому составу жидкостей и по способности к отложению солей, делать такое заключение опасно без соответствующих испытаний. Инженеры-эксплуатационники считают, что если закачка оказывается успешной в течение одного года, то ее можно продолжать еще несколько лет в зависимости от срока службы насосов (частное сообщение Отте).

10. Для низкотемпературных гидротермальных систем большинство химических проблем несущественно. Однако самостоятельный подъем жидкости ненадежен или вообще невозможен при слишком низких температурах воды. Тогда ее подъем со значительных глубин осуществляется парлифтом /5/. Количество вскипающей и переходящей в пар воды в продуктивных геотермальных скважинах зависит в основном от начальной температуры и давления, при которых осуществляется сепарация пара от жидкости, в большинстве случаев составляющей 70–90%. Парлифт жидкости с невысокими температурами (150–200°C) становится менее эффективным с уменьшением давления и температуры в бассейне в процессе его эксплуатации. С понижением уровня воды возрастает энергия, необходимая для ее подъема, и может оказаться, что без насосов истечение воды на поверхность станет невозможным.

11. Обессоливание низкотемпературных вод связано с решением химических проблем и проблем сброса, так как растворимые твердые вещества содержатся в малых количествах оставшейся воды. Растворимые вещества, такие, как NaCl , обычно не осаждаются; однако слабо растворимые вещества, такие, как SiO_2 , CaCO_3 и CaSO_3 , представляют потенциальную опасность.

12. Неиспользованное тепло, шум и загрязнение воздуха (в основном H_2S) представляют определенную опасность для окружающей среды и требуют контроля.

13. Следует также оценить сейсмическую опасность закачки, особенно для систем с горячей водой. Закачка в системы с преобладанием пара, в которых давление ниже гидростатического, не угрожает землетрясениями.

14. При извлечении горячей воды из месторождения без последующей закачки возможно оседание почв, лежащих в глинах, осадоч-

ных породах или сланцах. Песок и песчаник менее подвержены уплотнению, если жидкость в порах не находится под чрезмерным давлением. Оседание поверхности над месторождениями с преобладанием пара (с начальным давлением, меньшим гидростатического) бывает незначительным.

Получение геотермальной энергии и ее запасы

В данной главе основное внимание уделено физической и химической природе месторождений геотермального тепла вблизи поверхности земли. Особо выделены гидротермальные конвективные системы (с преобладанием пара или горячей воды), так как именно в них сосредоточены основные геотермальные ресурсы, которые можно использовать при современных экономических условиях и современном уровне техники.

Дальнейшее развитие техники может существенно расширить возможность освоения таких систем в самом ближайшем будущем. Наиболее значительными этапами такого развития являются:

1. Создание теплообменников, позволяющих использовать тепло жидкостей с температурами менее 100°C /23/. Известно, что общее количество тепла, содержащегося в легко добываемых геотермальных жидкостях с температурами $100\text{--}180^{\circ}\text{C}$, намного превышает (возможно, в 100 раз) разность теплосодержаний, обусловленную более высокой температурой жидкости (гл. 8).

2. Комплексное освоение месторождений, включающее опреснение воды и получение различных химикатов, что может повысить рентабельность производства.

3. Использование недорогих (механического, химического или ядерного) методов создания трещиноватости сухих горячих пород для увеличения их проницаемости, что позволит закачивать в них воду для извлечения тепла (см. последние главы данной книги).

4. Новые более дешевые методы бурения глубоких скважин.

5. Разработка новых способов применения геотермальной воды для отопления помещений, теплиц и производственных процессов.

6. Решение и урегулирование всех проблем использования геотермальных ресурсов с затратами, не превышающими расходы на предотвращение загрязнения окружающей среды, и решение других проблем, возникающих при использовании конкурирующих источников энергии.

Некоторые из этих достижений могут способствовать извлечению геотермальной энергии из очень больших объемов пород, в которых преобладают геотермические градиенты, таких, как глубоко погруженные осадочные породы или горячие, сухие кристаллические породы, освоение которых при существующих ценах и современном уровне техники невозможно.

В последние годы были сделаны самые противоречивые оценки возможных мощностей геотермальных электростанций, количество опресняемой воды, относительных затрат, а также рассмотрены вопросы загрязнения окружающей среды при использовании геотермальной энергии. Оценки рентабельности геотермальной энергетики колеблются от умеренных и скромных, хотя и важных в отдельных районах, но составляющих малую часть общих потребностей каждой страны в энергии, до очень оптимистических, согласно которым в будущем именно таким способом будут обеспечиваться потребности в энергии и в пресной воде. Расхождения в оценках относятся в основном к 1) возможностям реализации и стоимости различных категорий геотермальных ресурсов /27, 29/; 2) роли развития техники и связанным с этим расходами; 3) классификации типов и генезиса геотермальных месторождений, включая проблемы их открытия и извлечения из них энергии.

С точки зрения автора, весьма маловероятно, что при существующих ценах и современном уровне развития техники выработка электроэнергии на геотермальных электростанциях превысит 30 000 МВт. Известные и возможные запасы геотермальной энергии в США при существующих условиях могут обеспечить выработку ~600 МВт·век. Предельные ресурсы такой энергии (извлекаемой при современном уровне техники, но при увеличении ее стоимости на 1/3) можно оценить в 2000–4000 МВт·век. При таком развитии геотермальной энергетики она сможет удовлетворить более 10% общих потребностей США в энергии.

Что касается основных ресурсов геотермальной энергии (т. е. всех запасов тепла без учета стоимости ее извлечения), то они могут быть оценены с определенной точностью в зависимости от глубины (3 км, 10 км и т. д.) и геотермического градиента при использовании понятия объемной удельной теплоемкости. Приняв среднее значение геотермического градиента равным 20 град/км, можно вычислить количество тепла на глубине 10 км при температурах, превышающих температуру поверхности. Общее количество такого тепла в мире составляет $2,5 \cdot 10^{27}$ Дж, а на долю США приходится $1,25 \cdot 10^{25}$ Дж. Принятый в расчетах средний геотермический градиент, возможно, слишком низок и более вероятно значение 25 град/км. Однако даже если принять такое маловероятное значение, как 30 град/км, то расчетные значения ресурсов геотермальной энергии в США и в мире возрастут всего лишь до $1,88 \cdot 10^{25}$ и $3,76 \cdot 10^{27}$ Дж соответственно. Эти результаты дают самые верхние пределы ресурсов геотермальной энергии и могут превышать действительные значения примерно на два порядка.

В заключение следует отметить, что в данной главе использованы результаты исследований, полученные за последние годы в

Йеллоустонском национальном парке, Импириал-Валли и других районах США, а также в Новой Зеландии, Италии и Исландии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Banwell C. J., Cooper E. R., Thompson G. E. K., McCree K. J., Physics of the New Zealand thermal area, *New Zealand Dept. Sci. and Industr. Res. Bull.*, **123**, 109 (1957).
2. Blackwell D. D., Heat-flow determinations in the northwestern United States, *Jour. Geophys. Res.*, **74**, No.4, 992 – 1007 (1969).
3. Bodvarsson G., Physical characteristics of natural heat resources in Iceland, in *Geothermal energy I: Proc. United Nations Conf. on New Sources of Energy*, Rome, 1961, v. 2, 1964, pp. 82 – 90.
4. Bodvarsson G., Energy and power of geothermal resources, *Ore Bin*, **28**, No.7, 117 – 124 (1966).
5. Bodvarsson G., Evaluation of geothermal prospects and the objectives of geothermal exploration, *Geoexploration*, **8**, No.1, 7 – 17 (1970).
6. Болдижар Т., Получение геотермальной энергии из водоносных горизонтов осадочных пород в Венгрии, сб. "Изучение и исследование геотермических ресурсов", изд-во "Мир", 1975, стр. 122 – 144.
7. Burgassi R., Prospecting of geothermal fields and exploration necessary for their adequate exploitation performed in the various regions of Italy, in "Geothermal energy I: Proc. United Nations Conf. on New Sources of Energy", Rome, 1961, v. 2, 1964, pp. 117 – 133.
8. Burgassi R., Cataldi R., Mountin J., Scandellari F., Prospezione delle anomalie geotermiche e sua applicazione alla regione Amiatina, *l'Industria Mineraria*, **16**, 1 – 15 (1965).
9. Cataldi R., Remarks on the geothermal research in the region of Monte Amiata (Tuscany-Italy), *Bull. Volcanol.*, **30**, 243 – 270 (1967).
10. Craig H., Superheated steam and mineral-water interactions in geothermal areas, *Trans. Am. Geophys. Union*, **47**, 204 – 205 (1966) (abs.).
11. Craig H., Isotopic composition and origin of the Red Sea and Salton Sea geothermal brines, *Science*, **154**, No.3756, 1544 – 1548 (1966).
12. Elder J.W., Physical processes in geothermal areas, in "Terrestrial heat flow", W. H. K. Lee ed., *Am. Geophys. Union Mon.*, ser. 8, 1965, pp. 211 – 239.
13. Ellis A. J., Mahon W. A. J., Natural hydrothermal systems and experimental hot water/rock interaction (pt. II), *Geochim. et Cosmochim. Acta*, **31**, No.4, 519 – 538 (1967).
14. Faccia G., Tonani F., Theory and technology of a geothermal field, *Bull. Volcanol.*, **27**, 143 – 189 (1964).
15. Fournier R. O., Silica in thermal waters: Laboratory and field investigations, Pergamon Press, New York, 1972.
16. Fournier R. O., An empirical geothermometer based on Na, K and Ca in natural waters, *Geochim. et Cosmochim. Acta*, **36**, 1973.

17. Fournier R. O., Truesdall A. H., Chemical indicators of subsurface temperature applied to hot spring waters of Yellowstone National Park, Wyoming, U. S. A., *Geothermics*, special issue 2, 2, pt. 1, 529 – 535 (1972).
18. Haas J. L., Jr., The effect of salinity on the maximum thermal gradient of a hydrothermal system at hydrostatic pressure, *Econ. Geol.*, 66, 940 – 946 (1971).
19. Helgeson H. C., Geologic and thermodynamic characteristics of the Salton Sea geothermal system, *Am. Journ. Sci.*, 266, 129 – 166 (1968).
20. Honda S., Muffler L. J. P., Hydrothermal alteration in core from research drill hole Y-1, Upper Geyser Basin, Yellowstone National Park, *Amer. Mineral.*, 55, 1714 – 1737 (1970).
21. James R., Wairekei and Larderello, Geothermal power systems compared, *New Zealand Jour. Sci. and Techn.*, 11, 706 – 719 (1968).
22. Джонс П., Геотермические ресурсы Северо-Мексиканского бассейна, сб. "Изучение и использование геотермических ресурсов", под ред. Э. Тонджорджи, изд-во "Мир", 1975, стр. 41 – 67.
23. Jonsson V. K., Taylor A. J., Charmichael A. D., Optimisation of geothermal power plant by use of freon vapour cycle, *Timarit VFI*, 54, 2 – 17 (1969).
24. Krauskopf K. B., The possible role of volatile metal compounds in ore genesis, *Econ. Geol.*, 59, 22 – 45 (1964).
25. Lee W. H. K., Uyeda S., Review of heat flow data, in "Terrestrial heat flow", W. H. K. Lee, ed., *Am. Geophys. Union Mon.*, ser. 8, 1965, pp. 87 – 190.
26. Marinelli G., Some geological data on the geothermal areas of Tuscany, *Bull. Volcanol.*, 33, No.1, 319 – 334 (1969).
27. McKelvey V. E., Mineral resource estimates and public policy, *Amer. Scientist*, 60, 32 – 40 (1972).
28. Mercado S., High activity hydrothermal zones detected by Na/K, Cerro Prieto, Mexico, *Geothermics*, special issue 2, 2, pt. 2 (1973).
29. Muffler L. J. P., Geothermal resources in "Potential mineral resources: A geologic perspective", D. A. Brobst and W. P. Pratt, eds. *Potential mineral resources: A geologic perspective*, U. S. Geol. Surv. Prop. Paper, 1973.
30. Muffler L. J. P., White D. E., Active metamorphism of Upper Cenozoic sediments in the Salton Sea geothermal field and the Salton Trough, southeastern California, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 80, 187 – 182 (1969).
31. Muffler L. J. P., White D. E., Geothermal energy, *The Science Teacher*, 39, No.3, 1 – 4 (1972).
32. Nakamura H., Sumi K., Katagiri K., Iwata T., The geological environment of Matsukawa geothermal area, Japan. *Geothermics*, special issue 2, 2, pt. 1, 221 – 231 (1972).
33. Otte C., Dondanville R. F. Geothermal developments in The Geysers area, California, *Am. Assoc. Petrol. Geologists Bull.*, 52, 575 (1968) (abs.).
34. Палмасон Г., Зоера И., Освоение геотермальной энергии в Исландии в период 1960 – 1969 гг., сб. <<Изучение и использование геотермических ресурсов>>, под ред. Э. Тонджорджи, изд-во <<Мир>>, 1975, стр. 94 – 102.

35. Penta F., *Sulle origini del vapore acqueo naturale e sull'attuale stato delle relative ricerche (ricerche per "forze endogene")*, *La Ricerca Scientifica*, **29**, No.12, 2521 –2536 (1959).
36. Ross D. A., *Red Sea hot brine area; Revisited. Science*, **175**, 1455 –1457 (1972).
37. Sass J. H., *The Earth's heat and internal temperature*, in "Understanding the Earth", T.G.Gass, P. J. Smith, R. C. L. Wilson, eds., Sussex; Artemis Press, 1971, pp. 81 –87.
38. Saas J. H., Lachenbruch A. H., Monroe R. J., Greene G. W., Moses T. H., Jr., *Heat flow in the western U. S.*, *Journ. Geophys. Res.*, **76**, No.26, 6376 –6413 (1971).
39. Сестини Дж., *Перегрев геотермального пара, <<Изучение и использование геотермических ресурсов>>*, под ред. Э. Тонджорджи, изд-во <<Мир>>, 1975, стр. 299 – 340.
40. Sourirajan S., Kennedy G. C., *The system H₂O –NaCl at elevated temperatures and pressures*, *Am. Jour. Sci.*, **260**, 115 –141 (1962).
41. Truesdell A. H., White D. E., Muffler L. J. P., *Production of superheated steam from vapor-dominated geothermal reservoirs* (готовится к печати).
42. White D. E., *Some principles of geyser activity, mainly from Steamboat Springs, Nevada*, *Am. Jour. Sci.*, **265**, 641 –648 (1967).
43. White D. E., *Mercury and base-metal deposits with associated thermal and mineral waters*, in "Geochemistry of hydrothermal ore deposits" H. L. Barnes ed., Holt, Rinehart and Winston, New York, 1967, pp. 575 –631.
44. White D. E., *Environments of generation of base-metal ore deposits*, *Econ. Geology*, **63**, No.4, 301 –335 (1968).
45. White D. E. *Geothermal energy reservoirs*, *Am. Assoc. Petrol. Geol.*, **52**, No.3, 568 (1968) (abs).
46. White D. E., *Geochemistry applied to the discovery, evaluation and exploitation of geothermal energy reservoirs*, *Geothermics*, special issue 2, **1** (1973).
47. White D. E., Barnes I., O'Neil J. R., *Thermal and mineral waters of non-meteoritic origin, California Coast Ranges*, *Geol. Soc. Am. Bull.* (1973).
48. White D. E., Brannock W. W., Murata K. J., *Silica in hot-spring waters*, *Geochim. et Cosmochim. Acta*, **10**, 27 – 59 (1956).
49. White D. E., Muffler L. J. P., Fournier R. O., Truesdell A. H., *Preliminary results of research drilling in Yellowstone thermal areas*, *Trans. Am. Geophys. Union*, **49**, 358 (1968) (abs.).
50. White D. E., Muffler L. J. P., Truesdell A. H., *Vapor-dominated hydrothermal systems compared with hot-water systems*, *Econ. Geol.*, **66**, 75 – 97(1971).

5. РАЗВЕДКА ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Дж. Комбе, Л. Дж. П. Маффлер¹⁾

В принципе все естественное тепло земной коры можно рассматривать как геотермальные ресурсы Земли. Однако эта тепловая энергия приобретает экономическое значение только в том случае, если она сконцентрирована в ограниченных объемах, подобно полезным металлам в рудных месторождениях или нефти в нефтяных бассейнах. В данной главе рассматриваются современные методы разведки, обнаружения и определения границ геотермальных бассейнов промышленного масштаба.

Основные проблемы переноса тепла, гидротермальных систем, горячих источников и геотермальной энергии подробно рассматриваются в других главах этой книги и ряде других работ, и в данной главе мы к ним не возвращаемся. Для тех, кого эти вопросы интересуют более подробно, можно рекомендовать работы /2, 3, 23, 33, 34, 46, 55, 61, 65, 75/.

Основные принципы разведки

С чего должен начать руководитель поисковых работ, обладающий необходимыми знаниями в области геологии и геофизики и имеющий опыт разведки нефтяных месторождений, если ему впервые в своей практике необходимо разработать и осуществить программу поиска геотермального месторождения? Из каких предположений он должен исходить и какие исходные знания ему могут потребоваться?

Несомненно, прежде всего следует исходить из того, что объектом поиска является *тепло*. В отличие от нефти, газа, угля или урана геотермальная энергия может быть использована непосредственно без предварительного процесса сжигания или расщепления для получения полезной тепловой энергии. В связи с этим методы, успешно применяемые для поиска минералов или топлива, не обязатель-

¹⁾Комбе Дж. — сотрудник геологического факультета, а также Института геофизики и физики планет Калифорнийского университета, Риверсайд; Маффлер Л. Дж. П. — сотрудник Геологического управления США, Менло-Парк, шт. Калифорния.

но дадут наилучшие результаты при разведке геотермальных ресурсов. И, наоборот, может оказаться, что методы, мало пригодные для разведки нефтяных месторождений, исключительно эффективны для поиска природного тепла.

Далее, руководитель поисковых работ должен исходить из того, что, хотя земная кора представляет собой неисчерпаемый источник тепла (тепло, заключенное в земной коре до глубины 10 км с температурой выше температуры поверхности, составляет $3 \cdot 10^{26}$ кал /75/), большая часть этого тепла настолько рассеяна, что его использование невозможно. Области земной коры со средним тепло-содержанием постепенно переходят в бассейны с более или менее высокой концентрацией тепловой энергии. Часть этих бассейнов может быть использована в качестве промышленного источника тепловой энергии. Степень концентрации тепла (или "качество" геотермального месторождения), принимаемая за исходный критерий в поисковых работах, определяется с учетом возможного применения, технологии и целесообразности использования, а также в зависимости от местных условий, местоположения и времени.

Например, при использовании геотермальных ресурсов для производства электроэнергии с помощью обычных паровых турбин температура геотермального бассейна должна быть выше 180°C (желательно даже выше 200°C). Такой бассейн должен характеризоваться соответствующей проницаемостью пород и наличием воды. Вода с температурой от 40 до 180°C используется для отопления помещений, нужд сельского хозяйства и промышленности, кондиционирования воздуха, получения пресной воды, выработки электроэнергии (с применением теплообменника с фреоном или изобутаном) и производства минеральных солей. Технология и рентабельность этих сфер применения геотермальной энергии определяют минимальную температуру бассейна.

Далее следует сознавать, что как ни велико геотермальное месторождение, залегающее на большой глубине, и как ни высока его температура, при существующем уровне техники его рентабельность определяется стоимостью глубокого бурения. В настоящее время самая глубокая в мире геотермальная скважина, расположенная в Долине Больших Гейзеров в Калифорнии, имеет глубину ~ 3 км. Наибольшая глубина скважин в обозримом будущем, возможно, достигнет 10 км.

И наконец, нужно понимать, что, хотя все геотермальные аномалии означают концентрацию тепловой энергии, для функционирования геотермальных систем в естественных условиях требуется циркуляция воды. Эта вода служит естественным теплоносителем, передающим тепло от глубинного вулканического источника в неглубоко залегающий геотермальный бассейн, откуда теплоноситель можно из-

влечь на поверхность с помощью буровых скважин. В связи с этим геотермальный бассейн будет функционировать в естественных условиях при наличии пористости и проницаемости пород. При отсутствии одного из этих двух факторов потребуется искусственное стимулирование с помощью гидравлического разрыва, взрывов, теплового растрескивания и ряда других методов, рассматриваемых в других главах. Может также потребоваться закачка в бассейн использованного теплоносителя или поверхностных вод. Более того, если даже "сухие" геотермальные бассейны и существуют на глубине, доступной для бурения, методов обнаружения таких бассейнов значительно меньше, чем методов обнаружения естественно действующих систем.

Рассмотрение геологических факторов

Распределение геотермальных бассейнов в земной коре неравномерно. Залегающие сравнительно неглубоко высокотемпературные геотермальные бассейны, к которым относятся практически все разрабатываемые в настоящее время месторождения, располагаются у окраин литосферных плит /62/, в тех местах, где, по мнению ученых, происходит процесс образования или исчезновения земной коры /21/. В обоих случаях образуется магма, быстро поднимающаяся вверх сквозь земную кору. Тепло интрузивных пород передается путем теплопроводности конвекционным системам подземных вод атмосферного происхождения. Окраины литосферных плит представляют собой тектонически активные области, часто характеризующиеся вулканизмом новейшего времени и региональными или местными высокими тепловыми потоками.

Однако существует ряд крупных бассейнов, расположенных в осадочных породах вдали от границы литосферных плит, в которых содержится огромное количество горячей воды, как правило, на глубине более 3 км обычно при давлении выше гидростатического. Имеются описания таких бассейнов, расположенных на побережье Мексиканского залива в США /47/, Венгрии /9/ и СССР /57/. Относительно высокие геотермические градиенты в этих районах обусловлены сочетанием сравнительно высокого теплового потока и относительно низкой теплопроводности (гл. 4).

Области континентальных щитов (образований докембрийского периода) особенно малоперспективны для разведки геотермальных месторождений. Они, как правило, характеризуются низкими тепловыми потоками, тектонически малоактивны, не обнаруживали вулканической деятельности в недавнем прошлом и состоят из древних метаморфических и вулканических пород с низкой проницаемостью.

Расположение геотермальных систем определяется глубоко залегающими вулканическими очагами (возможно, на глубине более 3–5 км), которые представляют собой вероятные источники тепла,

вызывающие конвекцию в находящихся над ними атмосферных водах /76/. Вследствие этого режим аномально высокой температуры в верхнем слое толщиной в несколько километров над этими горячими очагами не зависит от возраста и типа слагающих его пород, т. е. не зависит от того, являются ли они осадочными, вулканическими или метаморфическими. Примером такого месторождения является Долина Больших Гейзеров, где геотермальная система четвертичного возраста расположена в францисканских метаосадочных и метавулканических породах юрского и мелового возраста. Однако характер образованных таким образом геотермальных систем в сильной степени зависит от пористости и проницаемости пород бассейна. Более того, геометрия конвективной системы в значительной мере определяется структурными и стратиграфическими особенностями пород верхнего слоя. Горячая вода поднимается вверх в том направлении, в котором она встречает наименьшее сопротивление; это направление не обязательно является вертикальным, и, следовательно, грифоны горячей воды могут оказаться смещенными в сторону от источника тепла на несколько километров.

Наличие высокотемпературной системы, в которой происходит конвективный перенос тепла водой, оказывает сильное влияние на минералогию и физические характеристики пород /10, 69/. Обычно горячие воды содержат растворенный кремнезем, вынесенный из глубинных пород /25/. По мере продвижения этих вод вверх и охлаждения кремнезем отлагается в виде кварца, β -кристобалита или опала, создавая натечные образования на более холодных границах гидротермального грифона /7, 8, 24, 78/. В геотермальном бассейне Солтон-Си отложения дельты реки Колорадо под действием гидротермальных условий превратились в твердую плотную кремнистую породу типа зеленого сланца /61/.

Методы разведки

В соответствии с любой геотермальной программой поисковых работ после выявления геотермального месторождения оценивается объем, температура и проницаемость пород на определенной глубине, чтобы определить тип системы (т. е. будет ли она производить сухой пар или пароводяную смесь), а также возможный химический состав теплоносителя. Поскольку в каждом случае приходится иметь дело с уникальным сочетанием геологических, гидрологических, геохимических, геофизических, технических и экономических характеристик, не существует единого метода изысканий для всех ситуаций. Метод, полезный в одном случае, может оказаться малоэффективным в другом. В связи с этим, прежде чем воспользоваться сложными методами разведки, следует осуществить ряд логически связанных предварительных стадий. Предлагается следующая последовательность,

составленная по принципу усложнения и удорожания работ: подбор и проработка литературы; аэрофотосъемка; геологическая и гидрологическая съемки; геохимическая съемка; геофизическая съемка; бурение скважин. Рассмотрим в отдельности каждую из этих стадий.

Подбор и проработка литературы

Для многих районов уже имеется определенная информация об их топографии, гидрологии, метеорологии, геологии, геохимии и геофизике, и прежде чем начинать новые исследования, необходимо оценить имеющиеся данные. Эта информация может исключить необходимость проведения той или иной съемки и помочь оценить другие данные, полученные в ходе изысканий.

Аэрофотосъемка

Одним из первых шагов геотермальных изысканий является оценка данных, полученных с помощью аэрофотосъемки. Аэрофотосъемка помогает в проведении структурного анализа и составлении геологических карт местности, а в областях, где топография недостаточно четко отражает структуру, играет важную роль для географической ориентации в процессе геофизической съемки.

Если региональная структура и стратиграфия изучены недостаточно, сравнительно недорогим способом получения дополнительной информации может оказаться аэромагнитная съемка. Столь же полезным для составления карт тепловых проявлений месторождения может оказаться инфракрасная аэрофотосъемка. Но если подобная информация имеется, то аэромагнитная или инфракрасная фотосъемки становятся излишними, поскольку они почти не дают непосредственной информации ни о распределении геотермального месторождения под землей, ни о его характере¹⁾.

Геологическая и гидрологическая съемки

Полевые работы естественно начинать с региональной геологической и гидрологической съемок /41/. Цель этих съемок – установить географические границы геотермальной области. В связи с этим основное внимание в ходе геологической съемки следует уделить тектонической структуре области и стратиграфии, новейшей тектонике, распределению и возрасту молодых вулканических пород, местоположению и характеру тепловых проявлений, включая изменения по-

¹⁾ Эти соображения кажутся нам недостаточно обоснованными, так как информация соответствующего характера может быть получена при постановке работ по определенной методике (см. предисловие редактора перевода). – *Прим. ред.*

роды под действием геотерм. Гидрологическая съемка должна включать измерения температуры и расхода горячих и холодных источников, их химический анализ (см. разд. Геохимическая съемка), определение уровня грунтовых вод в имеющихся скважинах, а также оценку режима поверхностных и подповерхностных вод. Следует также учитывать основные метеорологические данные, такие, как температура, влажность, количество осадков и т. п., поскольку эта информация является важной при планировании последующих геофизических работ и бурения.

По мере выявления перспектив геотермального месторождения эти региональные исследования постепенно превращаются в подробное изучение потенциальных объектов бурения с целью определения геологических и гидрологических условий, с которыми придется столкнуться на глубине. Для определения активных тектонических нарушений (сдвигов и сбросов), которые могут стать потенциальными объектами бурения /31/, значительный интерес представляют тепловая инфракрасная и радиолокационная съемки, а также аэрофотосъемка, особенно цветная инфракрасная и цветная. Кроме того, определению границ геотермальной области может способствовать изучение растительности, вид и характер которой зависит от температуры почвы.

На основе геологических и гидрологических наблюдений необходимо разработать реальную структурную, стратиграфическую, петрографическую и гидрологическую модель, которая определит ход дальнейшего исследования и разработки.

Геохимическая съемка

Применение геохимического анализа в процессе разведки геотермальных ресурсов подробно описывается в работе /78/. Геохимический анализ включает отбор проб и анализ воды и газов из горячих источников и фумарол в исследуемом районе. Полученные данные используются затем для определения роли в геотермальной системе горячей воды и пара, а также оценки минимальной температуры на глубине: оценка гомогенности воды позволяет определить химический состав теплоносителя на глубине и источник восстановления воды в бассейне.

Для определения типа геотермальной системы (с преобладанием горячей воды или пара) можно провести анализ на содержание хлоридов. Концентрация хлоридов более 0,005% характерна для большинства высокотемпературных систем с преобладанием воды, в то время как источники, относящиеся к системам с преобладанием пара, как правило, содержат менее 0,002% хлоридов /78/.

О минимальной температуре геотермального бассейна с преобладанием горячей воды можно судить по ее химическому составу и со-

отношению отдельных компонентов. Показательным является содержание SiO_2 , соотношение $\text{Na}-\text{K}-\text{Ca}$ отношение содержания Cl к содержанию $\text{HCO}_3 + \text{CO}_3$ или к содержанию F , а также содержание Mg /78/. В работах /25, 26/ содержание SiO_2 и соотношение между Na , K и Ca послужили основой для количественной оценки температуры бассейна.

Измерение содержания изотопов водорода и кислорода позволяет определить, откуда поступает вода, и оценить гидрологию района. Например, исследования, проведенные в долине Импириал-Валли, показали, что большую часть геотермальных вод в центральной и южной частях мульды Солтон-Троф образуют грунтовые воды, питающие реку Колорадо /19/, в то время как геотермальный раствор бассейна Солтон-Си образован водами, стекающими с гор Чоколит /20/.

Геофизическая съемка

Геофизическая съемка используется в основном для выявления областей, подходящих для бурения. Геотермальный бассейн можно обнаружить на основе косвенных измерений различных физических параметров на глубине, таких, как температура, электропроводность, скорость распространения упругих волн, плотность и магнитная восприимчивость. Наибольшее применение в геотермальных изысканиях находят такие геофизические методы, как измерения температуры, или геотермического градиента, определения теплового потока, измерения электропроводности. Кроме того, используются пассивные сейсмические методы, такие, как измерения микроземлетрясений или регистрация сейсмических шумов. Эти методы позволяют определить границы геотермальных бассейнов и дают информацию о подземных тепловых процессах. Активные сейсмические, гравиметрические и магнитные измерения могут оказаться полезными при уточнении региональной геологической модели, но, как правило, не дают полезной информации для определения границ геотермального бассейна.

Методы измерения тепловых параметров. Средний по всей территории земного шара кондуктивный тепловой поток равен $6,1 \times 10^{-6}$ Дж/(см²·с) /51, 67/. Тепловые потоки, слегка превышающие норму, могут вызываться экзотермическими химическими реакциями, высоким содержанием радиоактивных веществ, трением вдоль разломов или миграцией вод разного происхождения в областях почти нормального геотермального градиента. Повышение теплового потока под действием этих факторов, как правило, весьма ограничено по величине и имеет временный характер. Однако геотермальные районы, которые представляют экономический интерес в современных условиях, иногда обладают тепловыми потоками, в несколько тысяч раз превышающими средний уровень /77/ и не истощаются в течение многих тысяч лет /76/. Тепловые потоки такой величи-

ны могут существовать столь длительное время только там, где поблизости имеется порода при температуре, близкой к температуре магмы /76/.

Измерения тепловых характеристик позволяют непосредственно оценить размер и потенциал геотермальной системы. В порядке возрастания стоимости их проведения они располагаются следующим образом:

1. Измерение температуры на поверхности и на небольшой глубине, не превышающей 6 м.
2. Измерение геотермического градиента, осуществляемое обычно на глубинах 15–100 м.
3. Определение величины теплового потока, как правило, на глубине не менее 100 м.

Измерения температуры и геотермического градиента на глубине порядка 1 м /27а/ производятся быстро, стоят недорого и могут быть использованы для обнаружения аномально горячих областей. Однако на эти измерения оказывают существенное влияние поверхностные факторы, такие, как наличие теплоизолирующих пород, особенности топографии, выпадающие осадки и движение грунтовых вод. Особенно важен последний из перечисленных факторов, поскольку сравнительно медленное передвижение грунтовых вод через область даже значительной тепловой аномалии может отвести кондуктивный тепловой поток, сместить распределение температуры на поверхности и значительно исказить результаты измерений геотермического градиента.

Зависимости температуры от глубины для скважин глубиной от 15 до 150 м использовались целым рядом исследователей в ходе геотермальных изысканий /13, 14, 16, 18, 22, 52/. Большинство тепловых возмущений, возникающих вблизи поверхности, не достигает этих глубин, и измерения геотермического градиента являются достаточно точными и надежными. Тем не менее всегда необходимо учитывать возможное влияние латерального движения грунтовых вод. На территории большинства геотермальных районов, представляющих экономический интерес, геотермический градиент на этой промежуточной глубине превышает 7 град/100 м по сравнению с обычным геотермическим градиентом 3 град/100 м.

Несмотря на то что измеренные геотермические градиенты действительно дают представление о протяженности тепловых аномалий, следует проявлять известную осторожность при их экстраполяции на большую глубину. Линейная экстраполяция оказывается, как правило, завышенной по следующим двум причинам. Во-первых, с глубиной меняется теплопроводность породы. В районе осадочных пород, например в долине Импириал-Валли (Южная Калифорния), пористость существенно изменяется с глубиной /12/. Вследствие того что тепло-

проводность минеральных солей в 3–10 раз превышает теплопроводность воды, суммарная теплопроводность сильно возрастает с глубиной и уменьшающейся пористостью. Поскольку плотность теплового потока равна произведению градиента температуры на коэффициент теплопроводности, градиент с глубиной должен уменьшаться по мере увеличения теплопроводности. Во-вторых конвекция играет еще большую роль в снижении геотермических градиентов на глубине. Конвекция создает высокие кондуктивные градиенты в породе над конвекционной ячейкой и очень низкие геотермические градиенты внутри нее. В условиях, когда в пористых породах возможна конвекция воды, экстраполяция высоких геотермических градиентов, измеренных вблизи поверхности, очевидно, неправомерна и может привести к ошибочным представлениям о наличии высоких температур на глубине.

В тех случаях, когда средняя теплопроводность пачки пластов почти постоянна на длине всей скважины, измеренные геотермические градиенты, очевидно, пропорциональны тепловым потокам. Основное преимущество измерений теплового потока в дополнение к измерениям одного геотермического градиента состоит в том, что тепловой поток не зависит от локальной теплопроводности данного типа породы. В связи с этим в неоднородных пластах только измерения тепловых потоков позволяют получить точную информацию о потенциально продуктивной зоне /66/.

Поиски, опирающиеся исключительно на измерения геотермического градиента, часто считаются достаточными для выявления геотермальной области в целом. Даже самые низкие градиенты, измеренные над геотермальной аномалией, в 5–10 раз превышают среднюю величину регионального геотермического градиента. Но для того чтобы выделить центральную продуктивную зону и ее менее продуктивные окраины, необходимы измерения теплового потока, которые позволят наметить места бурения. Это положение хорошо иллюстрируется на примере геотермального бассейна сухого пара в районе Лардерелло (Италия), для которого данные о тепловых потоках позволяют определить границы продуктивной зоны более точно, чем это возможно сделать только на основе информации о геотермическом градиенте /9/.

Обширные области с аномально высоким тепловым потоком можно охарактеризовать с помощью нескольких измерений теплового потока в тщательно выбранных точках, например в породах фундамента на границах осадочного бассейна. Если региональный тепловой поток, определенный таким образом, значительно превышает нормальный, но тепловой поток, измеренный в породах фундамента, соответствует норме, это может указывать на наличие в данном районе гидротермальной конвективной системы и (или) молодой горячей интрузивной

породы. В этом случае желательно провести более детальное исследование.

За последние несколько лет были предприняты попытки составить карту тепловой активности путем измерения теплового излучения главным образом в ближней и средней инфракрасной области спектра /27, 29, 43, 45, 63/. Приборы, регистрирующие инфракрасное излучение, обычно имеют рабочий диапазон в области "окон" прозрачности атмосферы 3-5 и 8-14 мкм. Получение теплового инфракрасного изображения затруднено из-за наличия тепловых помех. Большая часть обнаруженных таким образом "тепловых" аномалий фактически обусловлена выходами пород, экспозицией и углами склонов, влажностью почвы, туманом или конденсацией влаги, различием в характеристиках пород, растительностью и т. д. Современная техника измерения инфракрасного теплового излучения позволяет достаточно точно определить аномальные тепловые потоки, только если их величина превышает в 100-150 раз нормальный поток /43, 63, 79/.

Методы измерения электрических и электромагнитных характеристик. С помощью электрических и электромагнитных методов в ходе геотермальной разведки измеряется электропроводность глубоко залегающих пород. В геотермальных бассейнах температура, пористость, содержание минеральных солей в заполняющих трещины растворах, а также содержание глин и цеолитов выше, чем в окружающей породе. Вследствие этого электропроводность геотермального бассейна является относительно высокой. Однако только в месторождении Уайракей (Новая Зеландия) имеется достаточное число буровых скважин, расположенных в зоне аномального сопротивления и за ее пределами, чтобы можно было установить точное соотношение между низким кажущимся сопротивлением и высокой температурой под землей.

Существует целый ряд электрических и электромагнитных методов, с помощью которых можно измерить кажущееся электрическое сопротивление глубоко залегающих пород. Теллурический и магнитно-теллурический методы основаны на измерении колебаний естественного электрического или электромагнитного полей. Существует ряд методов электроразведки, основанных на пропускании тока в земле между двумя электродами и измерении возникающего потенциала на двух других электродах. Различные электромагнитные методы основаны на создании переменного магнитного поля и определении электрического или магнитного полей, образующихся в результате наводимого в земле тока /48/.

Большинство опубликованных данных, полученных с помощью электрических методов при разработке геотермальных бассейнов, относятся к Новой Зеландии. Опыт последнего десятилетия показывает, что при определении границ месторождения в вулканической

зоне грабена Таупо наиболее эффективным оказывается метод вертикального электрического зондирования по схеме Веннера или Шлюмберже /1, 37/. Эффективная глубина измерения растет с увеличением расстояния между электродами; по-видимому, самым удачным является размещение электродов по схеме Шлюмберже (AB/2) с шагом 500 м, которое позволяет проводить эффективные измерения на глубине 700 м. Этот метод был с успехом использован для определения границ целого ряда геотермальных районов в вулканической зоне Таупо /37/ и для точного определения границ месторождений Уайракей, Бродлендс и Каверау /1, 54, 64/. Метод постоянного тока при измерении сопротивления предпочтительнее метода переменного тока, при котором в случае большого расстояния между электродами возникают поверхностные эффекты.

Все более широкое применение в разведке геотермальных ресурсов находит метод дипольного зондирования. С помощью этого метода Риск и др. /64/ определили границы месторождения Бродлендс на глубине от 1 до более 3 км. Согласно /48/, для достижения большей глубины требуются очень мощные источники и исключительно хорошо заземленные электроды. Эффективные исследования с применением этого метода связаны со сложным анализом и тщательной обработкой данных, но в принципе метод прост и нечувствителен к неровностям местности /36/.

Электромагнитные методы стали применяться при разведке геотермальных месторождений лишь в последние 5 лет. Хотя эти методы требуют сложной аппаратуры и связаны со сложной обработкой данных, они обладают двумя принципиальными преимуществами по сравнению с электрическими методами /48/: при использовании метода индукции (метода бесконечно длинного кабеля) сигнал растет с уменьшением сопротивления, что облегчает проведение измерений и делает их более точными; с другой стороны, не происходит ухудшения результатов под действием расположенных вблизи поверхности зон с высоким сопротивлением. При разработке геотермальных месторождений до сих пор применялись три электромагнитных метода: 1) метод двойной рамки, который был использован в Новой Зеландии и в Чили для исследований на глубине 15–50 м /53/; 2) магнитно-теллурический метод на звуковой частоте, который применялся в Новой Зеландии, Никарагуа, Индонезии и Кении и оказался эффективным, быстрым и легким способом разведки /36, 48/, и 3) метод индукции с использованием бесконечно длинного кабеля и рамки-детектора, который был применен Келлером для исследований в вулканической зоне Таупо на глубине от 10 до 30 км /48/.

Электрические и электромагнитные методы эффективны при изыскании геотермальных ресурсов в вулканической зоне Таупо, где величина удельного сопротивления в геотермальных районах в 5–20 раз

ниже величины удельного сопротивления за их пределами. Труднее обрабатывать данные, полученные с помощью этих методов в таких районах, как Кизильдер (Турция) /22/ и Импириал-Валли (Калифорния) /58/. В этих двух районах сопротивление в геотермальных зонах отличается от сопротивления за их пределами всего лишь в 2-4 раза, поскольку геотермальная система с относительно высоким содержанием солей в растворах располагается в осадочных породах с большим количеством сланцев.

Пассивные сейсмические методы. Многие геотермальные бассейны характеризуются частыми микроземлетрясениями и относительно высоким уровнем сейсмического (фоновое) шума. Вследствие этого точное определение местоположения таких подземных толчков и сейсмического шума может облегчить определение границ трещиноватых и проницаемых зон геотермальных областей.

Пассивный сейсмический метод заключается в регистрации локальных микроземлетрясений естественного происхождения и определении таким путем разрывов в породах, которые могут быть связаны с геотермальными системами. Микроземлетрясения, которые, как полагают, возникают в результате смещений по сбросам в геотермальных областях, описаны в работах /35, 50/ для Долины Больших Гейзеров (Калифорния), в работах /72, 74/ для Исландии, в работе /11/ для Импириал-Валли и в работе /73/ для Ауачапан (Сальвадор). Подземные толчки могут участиться вследствие откачки горячей воды или закачки сбросовой воды, и может оказаться необходимым постоянный контроль за разрабатываемым участком.

Другой пассивный сейсмический метод заключается в обнаружении сейсмического или геотермального шума по картине акустических шумов в определенных диапазонах частот. Измерение сейсмических шумов, по-видимому, является весьма простым способом обнаружения геотермальных областей определенного типа и составления соответствующих карт /15, 28, 80/. Согласно предварительным исследованиям, каждая геотермальная система обладает собственной сейсмической характеристикой. Полученные данные также свидетельствуют о том, что существует некое эмпирическое соотношение между глубиной залегания бассейна, высокими температурными градиентами и высоким уровнем сейсмических шумов. Если это соотношение окажется достоверным, то метод обнаружения геотермальных шумов, возможно, найдет широкое применение в будущих геотермальных изысканиях вследствие своей относительной быстроты, мобильности и экономичности.

Другие геофизические методы. Существует еще одна категория методов, которые применительно к разведке геотермальных месторождений принято называть "структурными" или "косвенными". К ним относятся активные сейсмические методы, гравитационная и магнит-

ная разведки /7, 37/. Эти методы отличаются от описанных выше измерений тепловых, электрических и электромагнитных свойств теплоносителей тем, что изучают поведение и характер вмещающей породы.

В активных сейсмических методах используются взрывы для генерирования упругих волн. Метод отражения основан на отражении волн от подземных поверхностей раздела пород с различными физическими свойствами. Метод рефракции основан на преломлении сейсмических волн, распространяющихся вдоль поверхностей раздела пород, в результате которого они возвращаются обратно на поверхность. Оба метода используются для определения структуры, конфигурации и глубины залегания пород фундамента. Хайякава /38/, используя метод общей глубинной точки, проанализировал затухание отраженных сейсмических волн в геотермальном районе Мацукава (Япония).

Гравитационная съемка используется как для определения основных структурных особенностей, так и для определения границ локальных положительных аномалий, которые могут быть связаны с геотермальной системой. Такие локальные положительные аномалии могут вызываться местными подъемами структуры, погребенной вулканической породой, интрузивными породами или породами, измененными под действием гидротермальных условий /5, 44, 49/. Однако, поскольку причиной появления локальной положительной аномалии может быть не только активная геотермальная система, гравитационная съемка может послужить основанием для совершенно ошибочных выводов, если она не дополняется информацией, полученной другими методами.

Из всех геофизических методов в целом, вероятно, наименее пригодной для определения объектов бурения в геотермальном районе является магнитная съемка. В некоторых районах отрицательные магнитные аномалии, по-видимому, вызываются геотермальным превращением магнитного железняка в железный колчедан /70/. В других – положительные магнитные аномалии можно объяснить присутствием очень молодых интрузивных и вулканических пород, связанных с геотермальной системой /32/. Однако в большинстве случаев характер магнитной карты зависит от такого большого числа факторов, что истолковывать ее с точки зрения наличия геотермальных ресурсов весьма трудно.

Бурение

Геофизические методы исследования поверхности и пластов, расположенных вблизи поверхности, служат главным образом для определения местоположения будущих скважин глубиной до 3 км. Конечной стадией любого геотермального изыскания является бурение разведочных скважин, без которых нельзя определить действи-

тельные характеристики геотермального бассейна и тем самым оценить его потенциальные возможности для производства тепла, энергии, минеральных солей или пресной воды. Данные, полученные с помощью таких скважин, должны включать информацию о глубинном распределении температуры и давления, проницаемости и пористости пород, минералогическом составе и строении пород, а также о химическом составе геотермального раствора. Полный набор геофизических данных, полученных при проходке скважин в сочетании с эксплуатационными испытаниями, дает всю необходимую информацию и позволяет оценить геотермальную площадку.

Информация, которую можно получить только с помощью буровой скважины, необходима:

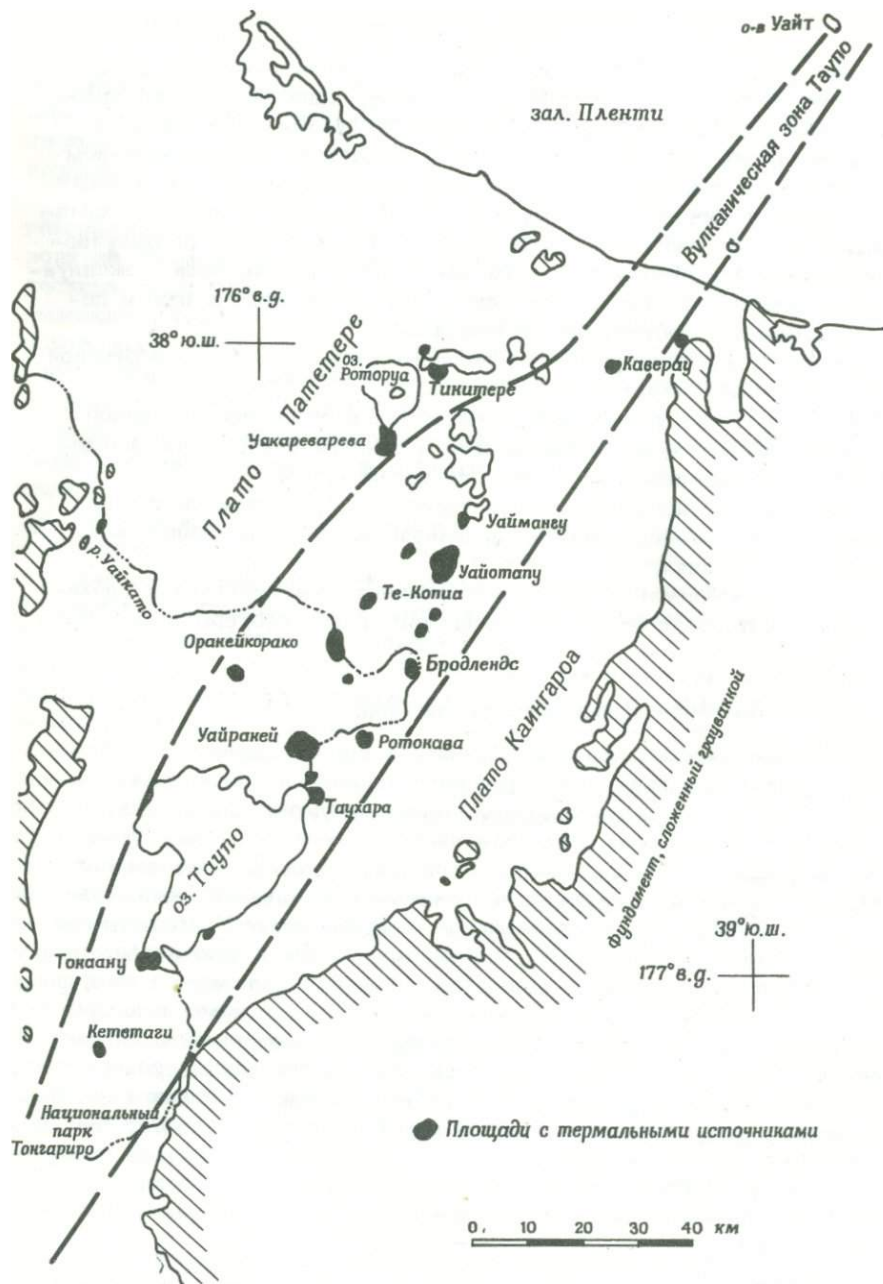
- 1) для оценки возможности геотермального бассейна производить достаточное количество энергии в течение длительного времени, чтобы обеспечить рентабельность предприятия;
- 2) для классификации разных типов геотермальных систем с целью точного предсказания их производительности в разных эксплуатационных условиях;
- 3) для уточнения и усовершенствования геофизических и геохимических методов поисков и определения границ геотермальных систем.

Описание двух геотермальных месторождений

Геотермальное месторождение Бродлендс, Новая Зеландия. Лишь немногие геотермальные месторождения описаны в литературе, да и те неполно. Возможно, наиболее полная документация относится к двум месторождениям, расположенным в Новой Зеландии, где в течение последних 25 лет ведутся широкие научные исследования геотермальных месторождений, получившие отражение в значительном числе публикаций. Геотермальное месторождение Уайракей подробно описано в работе /30/. Месторождение Бродлендс исследуется с начала 60-х годов; разведочное бурение там было начато в 1965 г. и в 1971 г. все еще продолжалось. Хотя новозеландским правительством не было опубликовано ни одной монографии, посвященной этому месторождению, большое количество данных содержится в материалах симпозиума по разработке и использованию геотермальных ресурсов, который проводился в сентябре 1970 г. в итальянском городе Пиза¹⁾.

Ниже приводится краткое описание месторождения Бродлендс, основанное главным образом на материалах, представленных на симпозиуме в Пизе.

¹⁾ Эти материалы публикуются в виде специальных выпусков недавно созданного журнала <<Geothermics>>.



Ф и г. 1. Карта вулканической зоны Таупо (Новая Зеландия) [40].

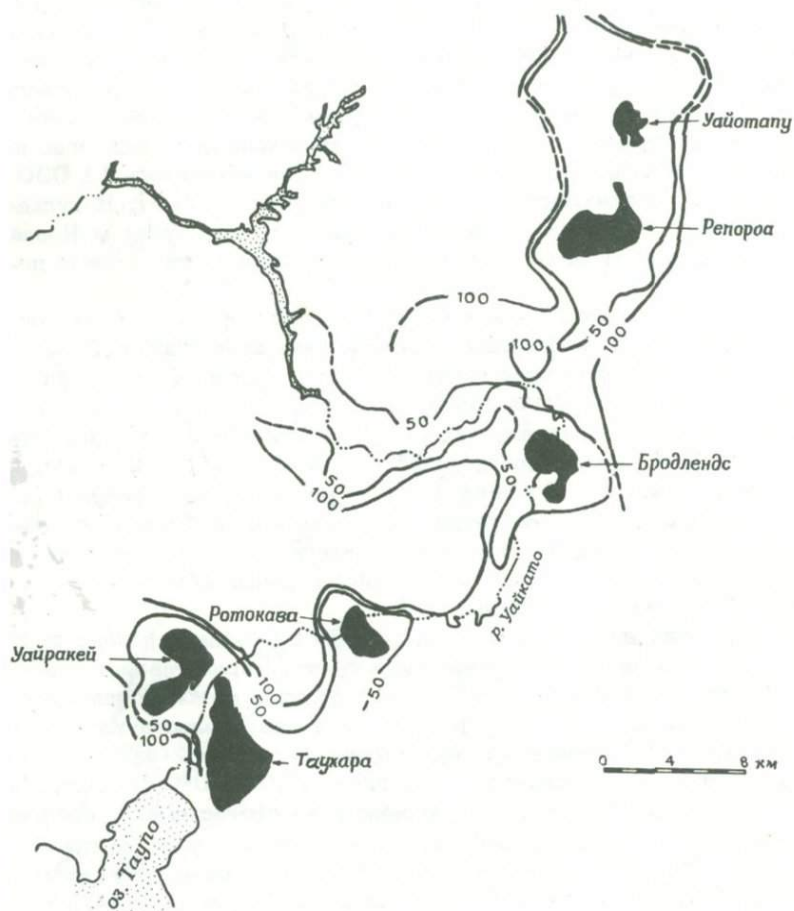
Геотермальное месторождение Бродлендс расположено в южной части вулканической зоны Таупо на острове Северный Новой Зеландии. Эта зона представляет собой вулcano-тектоническую впадину, простирающуюся на 260 км от действующих вулканов Национального парка Тонгариро до вулкана на острове Уайт в заливе Пленти (фиг. 1). Из трещин в земной коре, расположенных в этой зоне и вблизи нее, в период от плиоцена до голоцена изверглось 11 000 км³ лавы и туфов преимущественно риолитного состава /39/. В вулканической зоне Таупо расположены все действующие вулканы Новой Зеландии, все ее горячие источники и все крупные термальные поля /40/.

Бродлендс – всего лишь один по меньшей мере из дюжины основных геотермальных районов вулканической зоны Таупо. Вслед за разведкой и разработкой геотермального месторождения Уайракей в 50-е и начале 60-х годов /30/ район Бродлендса был выбран как объект изыскательских работ на основе данных, полученных путем измерения сопротивления постоянному току /37, 68/. Эта съемка (фиг. 2 и 3) показала, что геотермальный район Бродлендс охватывает большую территорию, чем можно было предположить на основе скудных тепловых проявлений месторождения на поверхности, и, более того, что латеральные границы бассейна на глубине 3/4 км являются резкими.

Химический анализ воды из 9 горячих источников района показывает, что глубинный геотермальный раствор представляет собой рН-нейтральный хлоридо-бикарбонатный раствор малой концентрации. Содержание кремнезема и отношение Na/K свидетельствуют о том, что минимальная температура на глубине достигает 200°C, а фактическая температура, вероятно, составляет 250–260°C /56, стр. 53/.

Геологический анализ, подкрепленный аэрофотосъемкой, послужил основанием для предположения, что выход горячей воды на поверхность обусловлен современными активными разломами (фиг. 4). Близость к разломам, а в особенности к местам их пересечения, является важным моментом при выборе места для бурения промышленных скважин /30/.

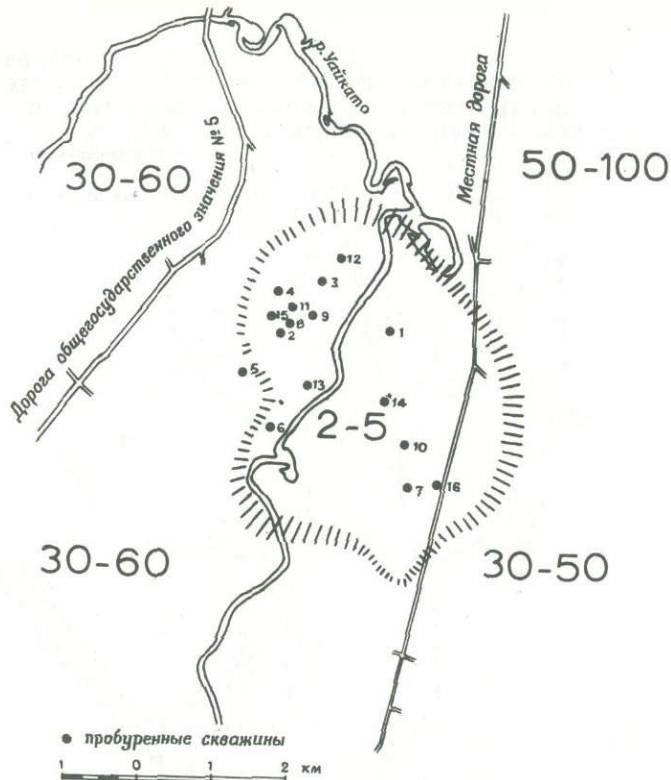
При использовании метода рефракции сейсмических волн /44/ обнаружен резко выраженный раздел сред на глубине 50–400 м. Петрологический анализ бурового керна и грунта впоследствии показал, что этот раздел приблизительно соответствует верхней поверхности риолитовых куполов (фиг. 5). Эти купола могут быть сопряжены с молодыми разломами, выраженными на поверхности /31/. Однако сейсмическая разведка почти не дала информации о глубине залегания фундамента, сложенного грауваккой, на котором покоится бродлендское месторождение, главным образом из-за сильного затухания сейсмических волн в горячих породах /44, стр. 344/.



Ф и г. 2. Карта распределения кажущегося сопротивления в южной части вулканической зоны Таупо [37, фиг. 6]

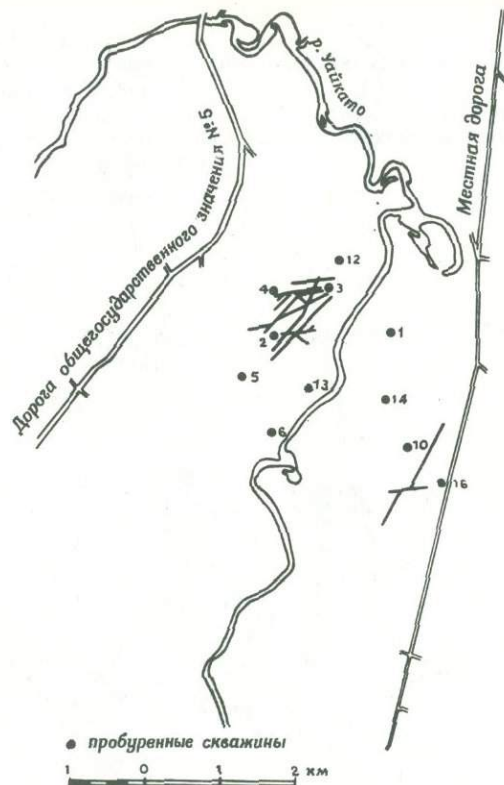
Расположение электродов на расстоянии $A = 550$ м по схеме Веннера. В зачерненных областях кажущееся сопротивление ниже 50 Ом/м .

Столь же малоэффективной при изучении рельефа фундамента оказалась и гравитационная съемка, главным образом вследствие маскировки латерального изменения плотности в разрезе вулканических пород [44]. В карту аномалии в редукции Буге была внесена поправка на смещение региональных аномалий (обусловленных изменением плотности на глубине более 5 км) и на влияние наклона поверхности фундамента. На полученной в результате гравитационной

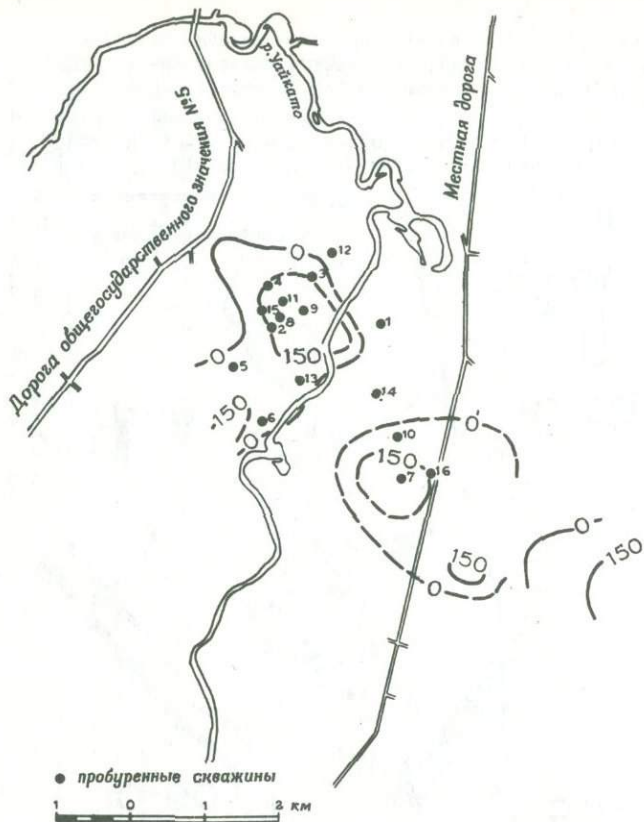


Ф и г. 3. Граница геотермального месторождения Бродлендс, полученная методом вертикального электрического зондирования [64].

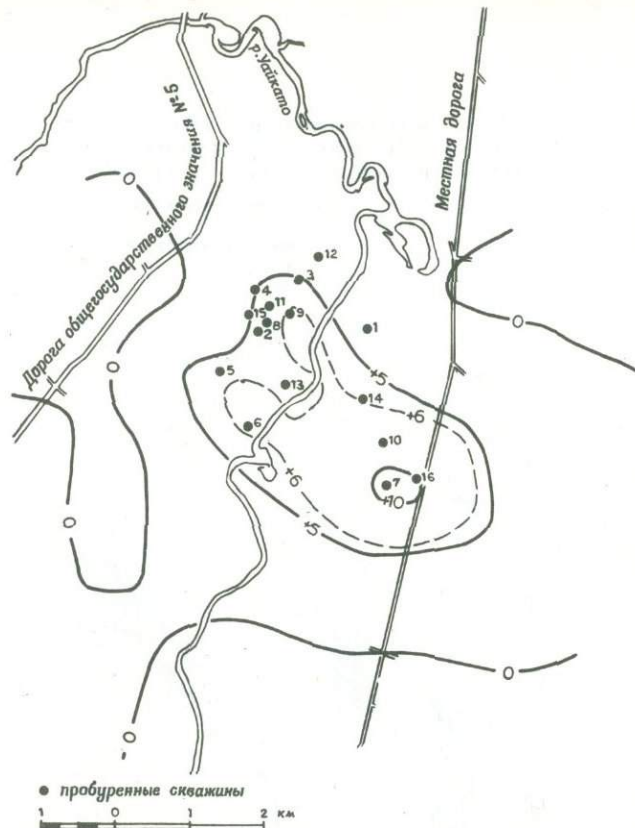
Расположение электродов на расстоянии 550 м по схеме Веннера. Средние значения кажущегося сопротивления приведены в Ом/м; эффективная глубина измерений 0,75 км.



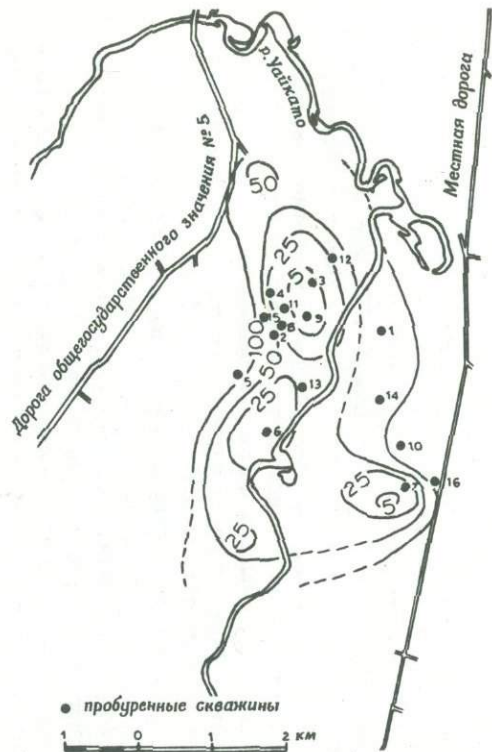
Ф и г. 4. Карта геотермального района Бродлендс с изображением разломов, определенных с помощью фотогеологии [24, фиг. 1].



Ф и Г. 5. Схема верхней поверхности риолитовых куполов геотермального месторождения Бродлендс [44, фиг. 1]. Числовые значения у контуров соответствуют высоте над уровнем моря в м.

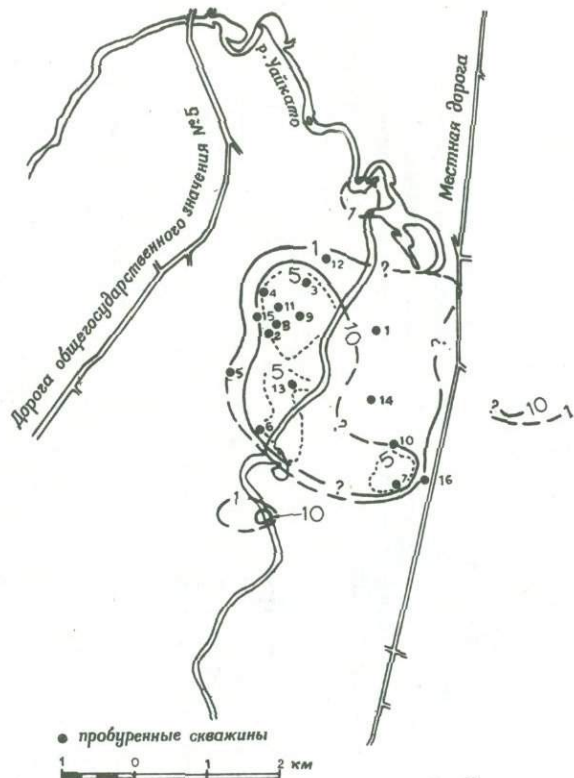


Ф и Г. 6. Контурная карта второго порядка распределения остаточной силы тяжести в геотермальном районе Бродлендс [44, фиг. 6]. Цифры у контуров соответствуют силе тяжести в мгал (10^{-5} м/с^2).



Ф и г. 7. Контурная карта распределения кажущегося сопротивления в геотермальном месторождении Бродлендс, составленная по данным электромагнитной разведки с помощью метода горизонтальных копланарных контуров [53, фиг. 5]

Числовые значения у контуров соответствуют удельному сопротивлению в Ом/м.



Ф и г. 8. Карта изотерм (в °С) на глубине 1 м (пунктирные линии) и на глубине 15 м (сплошные линии) геотермального месторождения Бродлендс [53, фиг. 5].

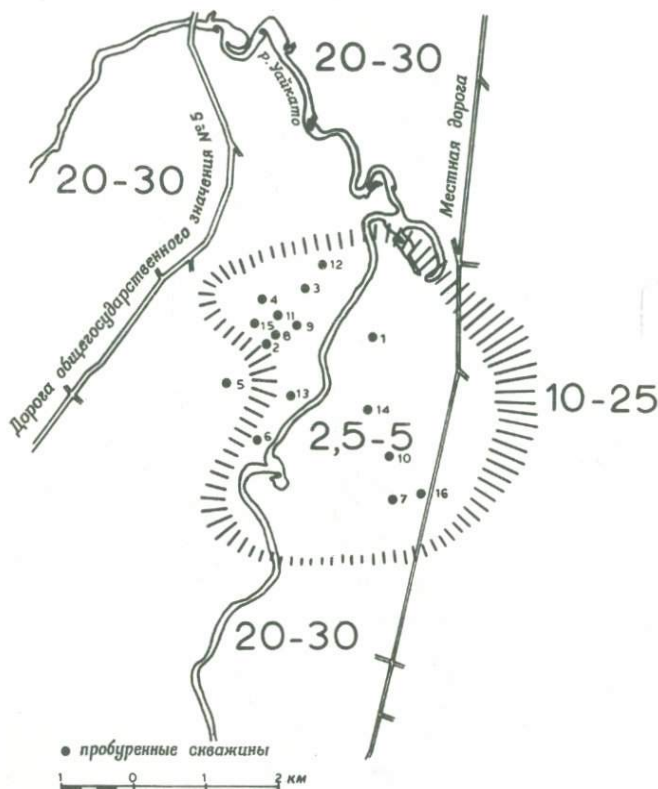
карте второго порядка (фиг. 6) указаны три положительные гравитационные аномалии. Только небольшую часть этих аномалий можно отнести на счет риолитовых куполов. Остальное, по мнению Хохштейна и Ханта /44/, следует объяснять местным увеличением плотности вулканических пород под действием геотермальных условий.

С помощью различных электрических и электромагнитных методов удается четко определить границы геотермальной системы Бродлендс. Электромагнитная разведка с использованием метода горизонтальных компланарных рамок /53/ оказалась быстрым и дешевым способом определения удельных сопротивлений на глубине до 30 м. На полученной этим методом карте (фиг. 7) можно обнаружить тесную связь между зонами с низким удельным сопротивлением и областями, где температура на глубине 15 м по крайней мере на 5°C превышает температуру окружающей среды (фиг. 8).

Возможно, самым эффективным методом определения границ данного геотермального бассейна на глубине следует признать метод электрического зондирования с расположением электродов по схеме Веннера при расстоянии между электродами $A = 550$ м (фиг. 3). Эффективная глубина измерений при таком расположении равна примерно 760 м /64, стр. 293/. Аналогичная съемка с расположением электродов на расстоянии $A = 180$ м (эффективная глубина измерений 250 м) дала результаты, более сходные с картой электромагнитных характеристик (фиг. 7).

Измерения с помощью дипольного зондирования использовались при определении границ месторождения на эффективной глубине от 1,5 до 3 км (фиг. 9). Однако анализ полученных данных очень сложен и возможны ошибочные выводы вследствие влияния граничных эффектов и изменения эффективной глубины измерений с изменением расстояний между электродами и ориентацией /64, стр. 293/. Риск определил границы месторождения, показанные на фиг. 9, отмечая точки резкого падения удельного сопротивления между соседними пунктами вдоль линии тока. Значения удельного сопротивления, полученные с помощью дипольного источника, расположенного за пределами месторождения, пришлось сократить вдвое, чтобы согласовать их с измерениями кажущегося сопротивления при расположении источника в пределах геотермального месторождения.

Магнитная съемка не достигла своей цели и не могла определить границы продуктивной зоны в области низкого удельного сопротивления /44/. Хотя возможно, что низкая величина напряженности магнитного поля в центре карты (фиг. 10) частично обусловлена гидротермальным изменением намагниченной породы, эта аномалия простирается далеко за пределы геотермального месторождения и представляет собой сложное явление, определяемое целым рядом факторов. В работе /44/ высказывается предположение, что

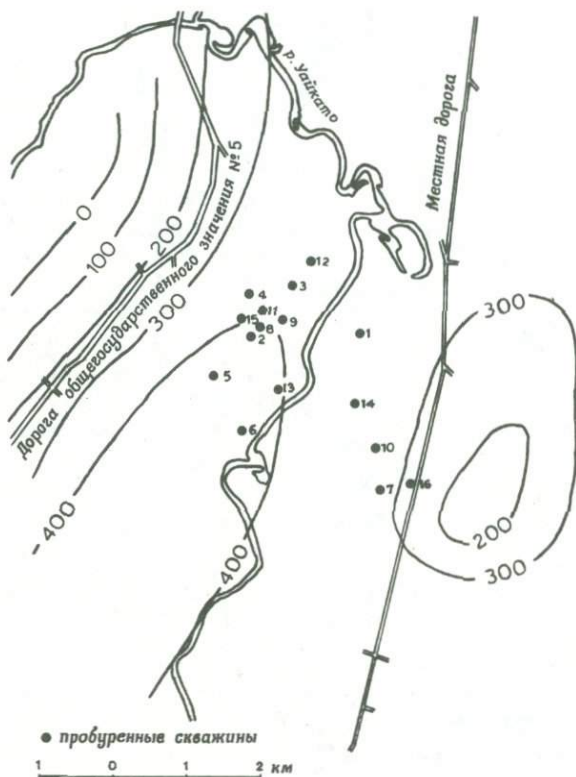


Фиг. 9. Граница геотермального месторождения Бродлендс, полученная с помощью дипольного зондирования на эффективной глубине измерения 3 км [64, фиг. 13].

Скорректированные значения кажущегося сопротивления даны в Ом/м.

положительная магнитная аномалия на востоке, возможно, объясняется отсутствием изменений в породе у восточного края риолитового купола.

К 1971 г. в области низких значений удельного сопротивления месторождения Бродлендс было пробурено 18 скважин. Во всех, кроме одной, была зарегистрирована температура выше 270°C [56, табл. 5], но часть скважин (№ 1, 10, 12 и 14) обладала низкой производительностью вследствие низкой проницаемости формации [68]. Только одна скважина в районе Бродлендса расположена вне зоны низкого удельного сопротивления. Эта скважина № 5 находится рядом с юго-западной границей низких значений сопротивления



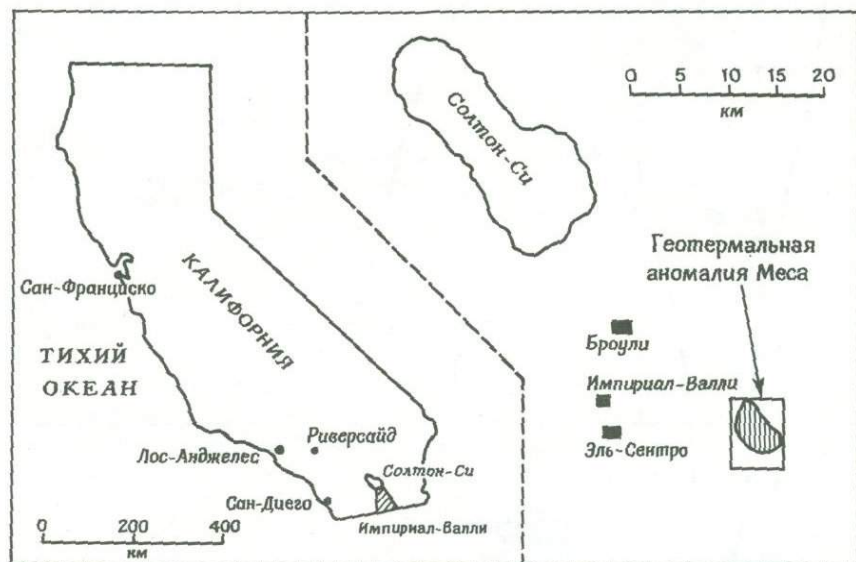
Ф и г. 10. Карта первого порядка результирующей напряженности магнитного поля в геотермальном районе Бродлендс [44, фиг. 10].

Числовые значения и контуры соответствуют напряженности в гаммах ($10^{-5} \text{ Э} = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ пА/см}$).

и имеет максимальную температуру 244°C , но характеризуется недостаточной проницаемостью пород.

Геотермальная аномалия Меса на юго-востоке Калифорнии. До недавнего времени геотермальные изыскания проводились главным образом в районах выхода на поверхность воды или пара. Одной из сложнейших и важнейших задач геотермальной разведки является поиск крупных рентабельных геотермальных бассейнов, которые не имеют проявлений на поверхности.

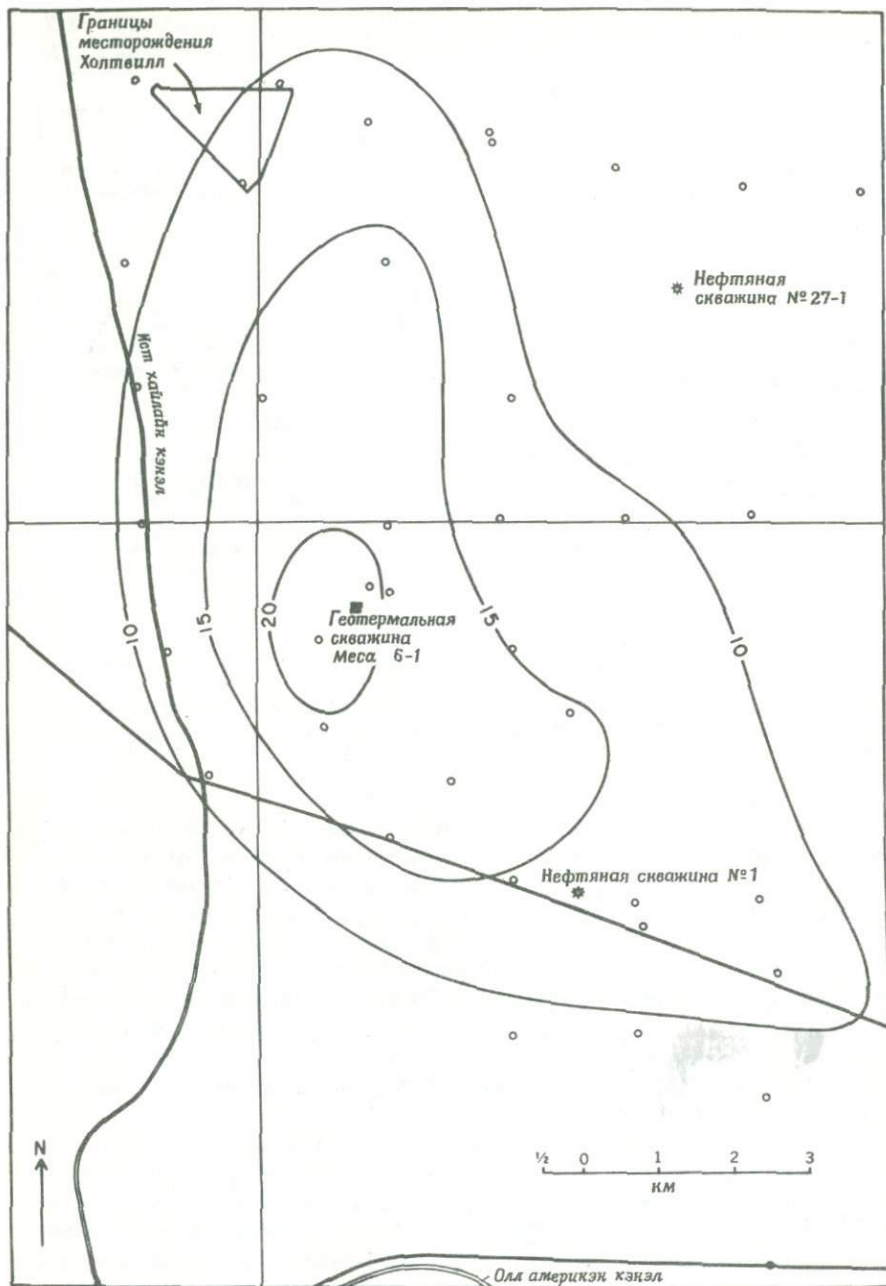
Геотермальная аномалия Меса, расположенная на восточной границе мульды Солтон-Троф, по-видимому, является именно таким скрытым бассейном (фиг. 11). Эта мульда, представляющая собой



Ф и г. II. Карта долины Импириал-Валли и геотермальной аномалии Меса. На последующих фигурах представлена зона, заключенная в прямоугольник.

северное продолжение Калифорнийского залива, заполнена слоем речных наносов позднего кайнозоя и осадочными породами мощностью 4 км, которые лежат на фундаменте, отличающемся более высокой скоростью распространения сейсмических волн /6/. Большая часть осадочных пород принесена из бассейна реки Колорадо /59, 60/. В области аномалии Меса не обнаружено ни вулканических пород, ни каких-либо тепловых проявлений. Ближайшие горячие источники и вулканические породы расположены на юго-восточной границе геотермального месторождения Солтон-Си /42, 61/, где осадочные слои позднего кайнозоя пронизаны на глубине большим количеством изверженных пород /6/.

Контуры, полученные методом рефракции сейсмических волн /6/, свидетельствуют, что кристаллические породы основания в районе аномалии Меса находятся на глубине 3,7 км. В 6 км к северо-востоку от этой аномалии на глубину 2444 м пробурена одна разведочная нефтяная скважина, а в 4,5 км к юго-западу – вторая на глубину 3238 м. Геологические разрезы обеих скважин указывают на чередование песка и глины, возможно, дельтового происхождения с преобладанием песка (В. Рэндел, частное сообщение, 1971).



Ф и г. 12. Карта распределения геотермического градиента в районе аномалии Меса.

○ разведочные геотермальные скважины; * поисковые нефтяные скважины. Числовые значения у контуров соответствуют градиентам в град/100 м. (Данные собраны и обработаны Дж. Комбсом.)

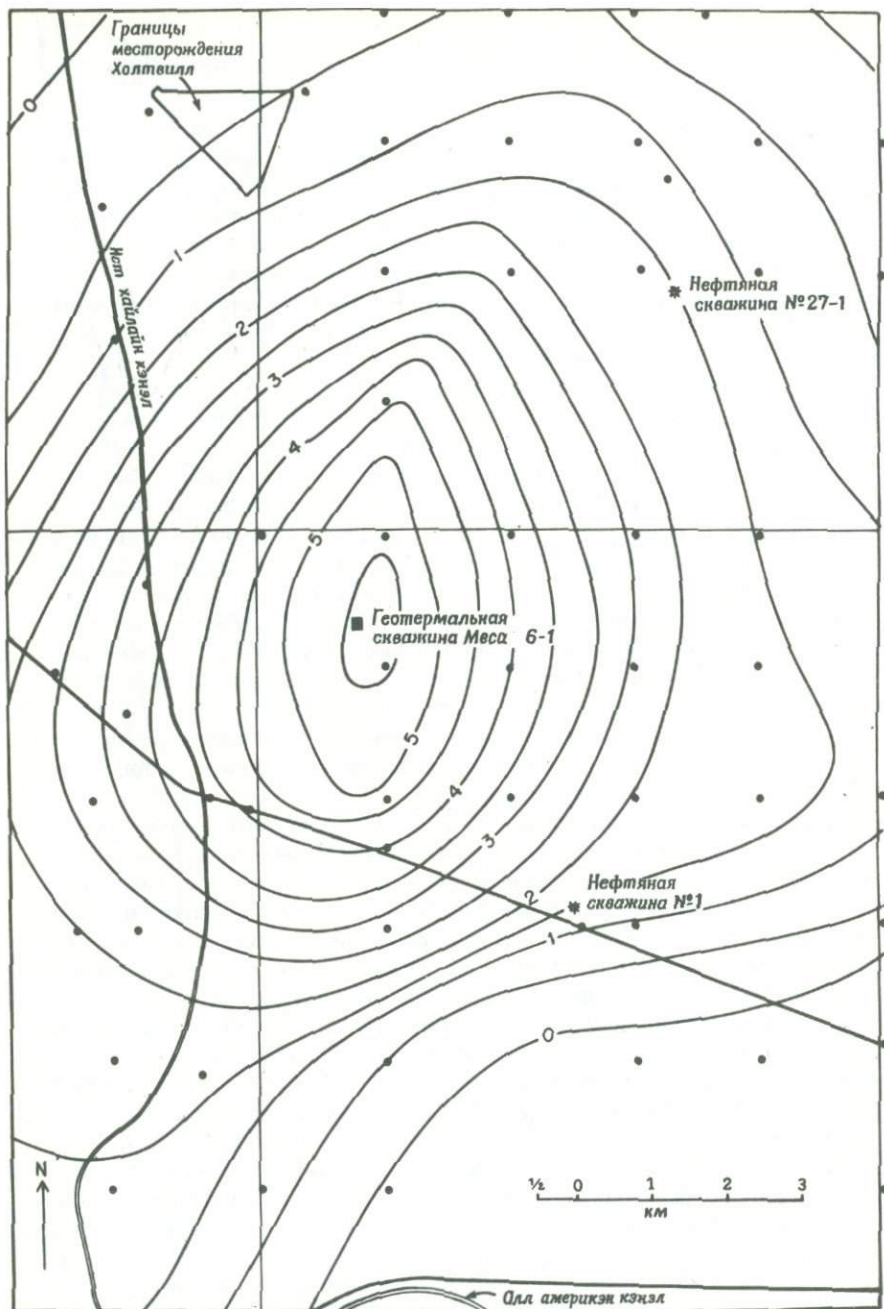
В течение 1969–1971 гг. в ходе полевых съемок были проведены следующие геофизические измерения: геотермического градиента примерно в 50 скважинах на глубине 30–450 м; силы тяжести со станций, расположенных на разном расстоянии друг от друга (от нескольких километров на большей части района Ист-Меса до 500 м в районе самой аномалии Меса); сейсмического шума на территории аномалии при расстоянии между наблюдательными пунктами в 1,5 км и удельного сопротивления постоянному току на далеко отстоящих друг от друга станциях.

На фиг. 12 представлена карта распределения геотермического градиента, показывающая рост температуры с глубиной. Измерения проводились в 37 буровых скважинах на глубине от 30 до 450 м /16/. Эти скважины бурились обычным роторным станком под трубой малого диаметра (1,9–5,1 см) с уплотнением забоя. Трубы закреплялись в скважине с помощью цемента, заполнялись водой и закрывались. Измерения температуры термистором повторялись до установления термического равновесия. Затем полученные данные обрабатывались и наносились на карту (фиг. 12). Карта дает общий вид приповерхностного распределения температур на аномалии Меса. Предварительный анализ указывает на наличие тепловых потоков, в 4–10 раз превышающих среднюю величину /17/. Эти высокие значения тепловых потоков – возможно, единственное проявление более глубоко расположенной и существенно более крупной конвективной гидротермальной системы.

Многочисленные измерения силы тяжести и геотермического градиента /5/, проведенные в долине Импириал–Валли, указывают на существование тесной связи в этом районе между семью областями со значительными максимумами силы тяжести, характеризующимися величинами 2–22 мгал, и областями высоких геотермических градиентов, которые превышают 11 град/100 м. Эти геофизические аномалии геологически не проявляются на поверхности.

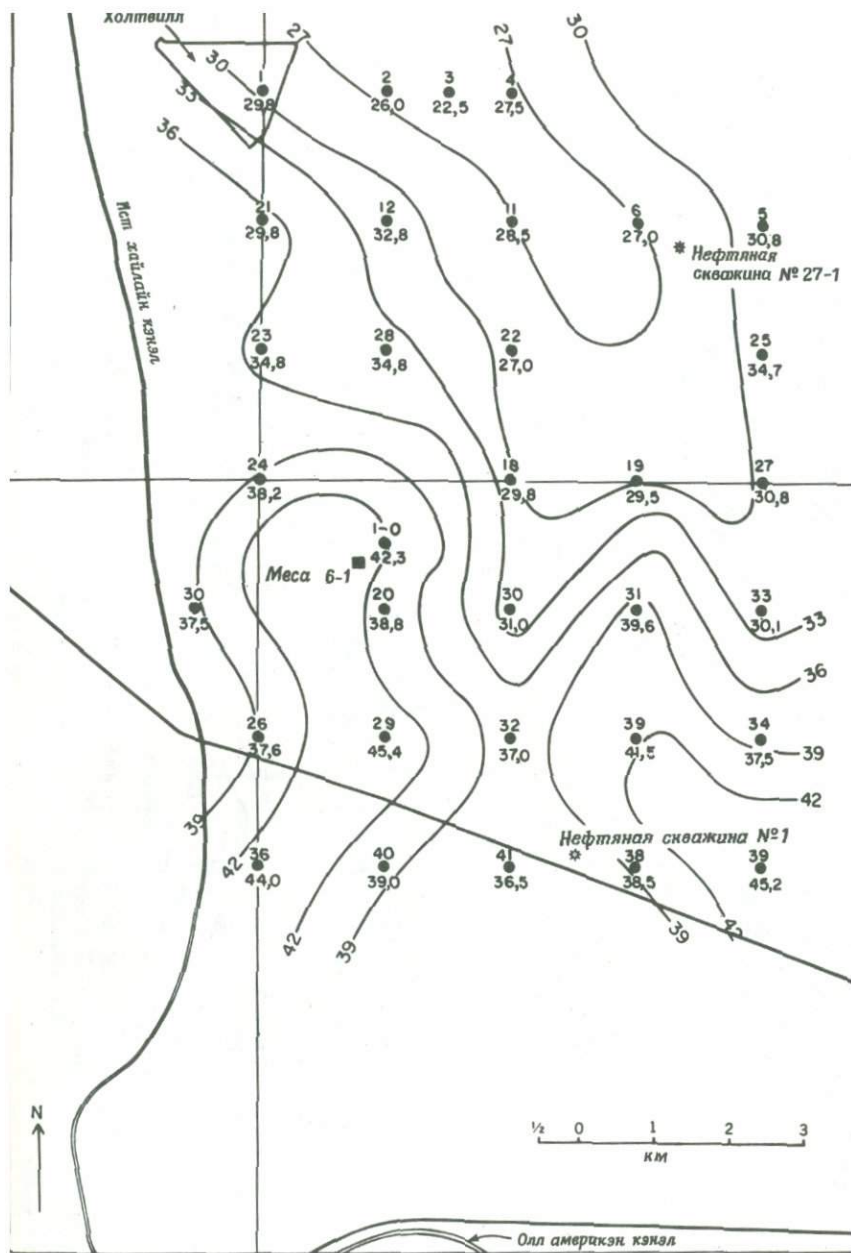
После внесения поправки на региональные эффекты, обусловленные влиянием пород фундамента верхней части земной коры /4/, карта остаточной силы тяжести района Меса (фиг. 13) характеризует проявление аномалии силы тяжести в 4 мгал на площади 2,5 км², где возможно присутствие избыточной массы на глубине. В работе /5/ постулируется, что более высокие значения силы тяжести вблизи термальной аномалии свидетельствуют либо об уплотнении осадочных пород вследствие цементации и термальном метаморфизме вследствие циркуляции горячего раствора, либо о наличии более плотных изверженных пород, либо о совместном влиянии обоих факторов.

На фиг. 14 приведены результаты измерений сейсмического фона, проведенных фирмой "Геледайн-Геотех" (Даллас, шт. Техас). Карта показывает высокий уровень сейсмического фона в южной и

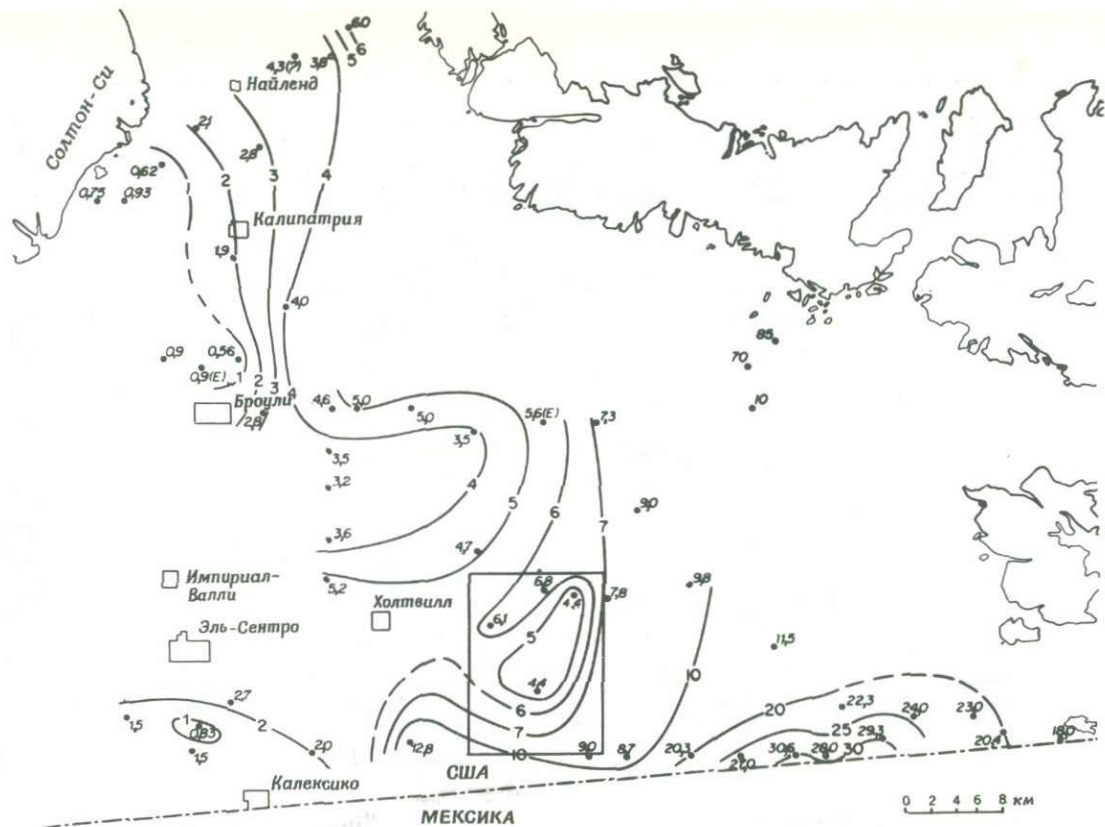


Ф и г. 13. Карта в редукции Буге аномалии силы тяжести района Меса [4, фиг. 5].

Интервал между соседними контурами равен 0,5 мгал. ● пункты измерений;
* поисковые нефтяные скважины.



Ф и г. 14. Карта сейсмического фона аномалии Меса.
 • пункты измерений; * поисковые нефтяные скважины. Числовые значения у контуров соответствуют децибелам, приходящимся на 10^{-3} (мм/с)²/Гц в интервале 3–5 Гц. (Данные собраны и обработаны под руководством Дузе, фирма <<Геледайн-Геотех>>, Даллас, шт. Техас, 1971 г.)



Ф и г. 15. Карта распределения кажущегося сопротивления в долине Импириал-Валли [58, фиг. 3].
 Расположение электродов по схеме Шлюмберже; $AB/2 = 1200$ м. ● места измерений сопротивления; числовые значения соответствуют кажущемуся сопротивлению в Ом/м. Область, заключенная в прямоугольник, указывает место обнажения породы основания.

юго-восточной частях аномалии Меса. Полученные результаты дают основание полагать, что существует связь между предполагаемым геотермальным бассейном, высокими геотермическими градиентами и высоким уровнем сейсмических шумов.

На большей части долины Импириал-Валли, включая аномалию Меса (фиг. 15), были проведены рекогносцировочные измерения методом вертикального электрического зондирования /58/ при расположении электродов по схеме Шлюмберже с расстоянием между электродами АВ/2 от 300 до 2500 м. Результаты указывают на наличие вокруг аномалии Меса площади 50 км² с сопротивлением 5 Ом/м, выделяемой также другими геофизическими методами. Вследствие большого расстояния между пунктами измерений эта электрическая съемка не дает возможности точно определить места для бурения в районе Ист-Меса.

На основе этих геологических и геофизических данных было выбрано место для разведочной геотермальной скважины 6-1 (фиг. 11). Работы осуществлялись Американским бюро по разработке недр. Бурение до глубины 2445 м было закончено в течение августа 1972 г. Через несколько дней после прекращения циркуляции грязевого потока, вызванного бурением, были произведены измерения температуры в забое скважины и получены нестационарные ее значения, близкие к 200°C.

ЛИТЕРАТУРА

1. Banwell C. J., Macdonald W. J. P., Resistivity surveying in New Zealand thermal areas, Eighth Commonwealth Mining and Metall. Congr., Australia and New Zealand, New Zealand Section, paper No.213, pp. 1 - 7, 1965.
2. Barnea J., Geothermal power, *Scientific American*, **226**, No.1, 70 - 77 (1972).
3. Beck A. E., Techniques of measuring heat flow on land, in W. H. K. Lee, ed., *Terrestrial heat flow*, Am. Geophys. Union Mon., ser. 8, 1965, pp.24 - 57.
4. Biehler S., Gravity studies in the Imperial Valley, in Cooperative geological-geophysical-geochemical investigations of geothermal resources in the Imperial Valley area of California, Univ. Calif. Riverside, Education Research Service, 1971, pp. 29 - 41.
5. Biehler S., Combs J., Correlation of gravity and geothermal anomalies in the Imperial Valley, Southern California (abs.), *Geol. Soc. Amer. Abstracts with Programs*, 4, No.3, p. 128 (1972).
6. Biehler S., Kovach R. L., Allen C. R., Geophysical framework of northern end of Gulf of California structural province, in T. H. Van Andel and G. G. Shor, Jr., eds., *Marine geology of the Gulf of California - a symposium* Amer. Assoc. Petrol. Geol., Mem. 3, 1964, pp. 126 - 143.
7. Bodvarsson G., Utilization of geothermal energy for heating purposes and combined schemes involving power generation, heating, and/or by-products,

- Proc. U. N. Conf. New Sources of Energy, Rome, 1961, v. 3, Geothermal Energy, 1964, pp. 429 - 436.
8. Bodvarsson G, Evaluation of geothermal prospects and the objectives of geothermal exploration, *Geoexploration*, **8**, 7 -17 (1970).
 9. Boldizsár T., Terrestrial heat flow in the natural steam field at Larderello, *Geofs. Pura Appl.*, **56**, 115 -122 (1963).
 - 9a. Болдичар Т., Получение геотермальной энергии из водоносных горизонтов осадочных пород в Венгрии, сб. "Изучение и использование геотермических ресурсов", под ред. Э. Тонджорджи, изд-во "Мир", 1975, стр. 122 - 144.
 10. Browne P. R. L., Ellis A. J., The Ohaki-Broadlands hydrothermal area, New Zealand, Mineralogy and related geochemistry, *Am. J. Sci.*, **269**, 97 -131 (1970).
 11. Brune J. N., Allen C. R., A micro-earthquake survey of the San Andreas fault system in southern California, *Seismol. Soc. Am. Bull.*, **57**, 277 -296 (1967).
 12. Bureau of Reclamation, Geothermal resource investigations, Imperial Valley, California, January 1972 -developmental concepts, U. S. Bur. Reclamation, 1972, p. 58.
 13. Burgassi R., Battini F., Mouton J., Prospection géothermique pour la recherche des forces endogènes, Proc. U.N. Conf. New Sources of Energy, Rome, 1961, v. 2, Geothermal Energy, 1964, pp. 134 -140.
 14. Burgassi P. D., Ceron P., Ferrara G. C., Sestini G., Toro B., Geothermal gradient and heat flow in the Radicofani region (east of Monte Amiata, Italy), *Geothermics*, special issue 2, 2 pt. 1, 443 -449 (1970).
 15. Clacy G. R. T., Geothermal ground noise amplitude and frequency spectra in the New Zealand volcanic region, *J. Geophys. Res.*, **73**, 5377 - 5383 (1968).
 16. Combs J., Heat flow and geothermal resource estimates for the Imperial Valley, in Cooperative geological-geophysical-geochemical investigations of geothermal resources in the Imperial Valley area of California, University of California, Riverside, Education Research Service, 1971, pp. 5 - 27.
 17. Combs J., Preliminary heat flow values and temperature distributions associated with Mesa and Dunes geothermal anomalies, Imperial Valley, southern California (abs.), *EOS*, **53**, No.4, 515 - 516 (1972).
 18. Combs J., Rex R. W., Geothermal investigations in the Imperial Valley of California (abs.), *Geol. Soc. Am. Abstracts with Programs*, **3**, No.2, 101 - 102 (1971).
 19. Coplen T., Isotopic geochemistry of water from the Imperial Valley, in Cooperative geological-geophysical-geochemical investigations of geothermal resources in the Imperial Valley area of California, University of California, Riverside, Education Research Service, 1971, pp. 113 - 118.
 20. Craig H., Isotopic composition and origin of the Red Sea and Salton Sea geothermal brines, *Science*, **154**, 1544 - 1548 (1966).

21. Dewey J. F., Bird J. M., Mountain belts and the new global tectonics, *Jour. Geophys. Res.*, **75**, 2625 – 2647 (1970).
22. Duprat A., Contribution de la geophysique a l'étude de la region geothermique de Denizli-Sarayköy, Turquie, *Geothermics*, special issue 2, **2**, pt. 1, 275 – 286 (1970).
23. Ellis A. J., Present-day hydrothermal systems and mineral deposition, Ninth Commonwealth Mining and Metall. Congr., Mining and Petroleum Geology Section, paper No.7, 1969, pp. 1 – 30.
24. Facca G., Tonani F., The self-sealing geothermal field, *Bull. Volcanol.*, **30**, 271 – 273 (1967).
25. Fournier R. O., Rowe J. J., Estimation of underground temperatures from the silica content of water from hot springs and wet-steam wells, *Am. Jour. Sci.*, **264**, 685 – 697 (1966).
26. Fournier R. O., Truesdell A. H., An empirical Na–K–Ca geothermometer for natural waters, *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 1973.
27. Friedman J. D., Williams R. S., Jr., Palmason G., Miller C. D., Infrared surveys in Iceland – preliminary report, U. S. Geol. Survey Prof. Paper 650-C, pp. C89 – C105, 1969.
28. Goforth T. T., Douze E. J., Sorrells G. G., Seismic noise measurements in a geothermal area, *Geophysical Prospecting*, **20**, 76 – 82 (1972).
29. Gomez Valle R. G., Friedman J. D., Gawarecki S. J., Banwell C. J., Photogeologic and thermal infrared reconnaissance surveys of the Los Negritos – Ixtlan de los Hervores geothermal area, Michoacan, Mexico, *Geothermics*, special issue 2, **2**, pt. 1, 381 – 398 (1970).
30. Grindley G. W., The geology, structure, and exploitation of the Wairakei geothermal field. Taupo, New Zealand, *New Zealand Geol. Survey Bull.*, **75**, 131 (1965).
31. Grindley G. W., Subsurface structures and relation to steam production in the Broadlands geothermal field, New Zealand, *Geothermics*, special issue 2, **2**, pt. 1, 248 – 261 (1970).
32. Griscom A., Muffler L. J. P., Aeromagnetic map and interpretation of the Salton Sea geothermal area, California. U. S. Geol. Survey Geophys. Inv. Map GP-754, 1971.
33. Grose L. T., Geothermal energy: Geology, exploration and developments. Part 1, Colorado School of Mines, *Mineral Industries Bull.*, **14**, No. 6, 1 – 14 (1971).
34. Grose L. T., Geothermal energy: Geology, exploration and developments. Part 2. Colorado School of Mines, *Mineral Industries Bull.*, **15**, No.1, 1 – 16 (1972).
35. Hamilton R. M., Muffler L. J. P., Microearthquakes at The Geysers geothermal area, California, *Jour. Geophys. Res.*, **77**, 2081 – 2086 (1972).
36. Harthill N., Geophysical prospecting for geothermal energy. *The Mines Magazine*, Colorado School of Mines, 13 – 18 (1971).

37. Hatherton T.; Macdonald W. J. P., Thompson G. E. K., *Geophysical methods in geothermal prospecting in New Zealand*, *Bull. Volcanol.*, **29**, 485 – 497 (1966).
38. Hayakawa M., The study of underground structure and geophysical state in geothermal areas by seismic exploration, *Geothermics*, special issue 2, **2**, pt. 1, 347 – 357 (1970).
39. Healy J., Structure and volcanism in the Taupo Volcanic Zone, New Zealand, in G. A. Macdonald and H. Kuno, eds., *The crust of the Pacific Basin*, *Am. Geophys. Union Mon.*, ser. 6, 1962, pp. 151 – 157.
40. Healy J., Volcanic mechanisms in the Taupo Volcanic Zone, New Zealand. *N. Z. Jour. Geol. and Geophys.*, **7**, No.1, 6 – 23 (1964).
41. Healy J., Pre-investigation geological appraisal of geothermal fields, *Geothermics*, special issue 2, **2**, pt. 1, 571 – 577 (1970).
42. Helgeson H. C., Geologic and thermodynamic characteristics of the Salton Sea geothermal system, *Am. Jour. Sci.*, **266**, 129 – 166 (1968).
43. Hochstein M. P., Dickinson D. J., Infrared remote sensing of thermal ground in the Taupo region, New Zealand, *Geothermics*, special issue 2, **2**, pt. 1, 420 – 423 (1970).
44. Hochstein M. P., Hunt T. M., Seismic, gravity and magnetic studies, Broadlands geothermal field, New Zealand, *Geothermics*, special issue 2, **2**, pt. 1, 333 – 346, 1970.
45. Hodder D. T., Application of remote sensing to geothermal prospecting, *Geothermics*, special issue 2, **2**, pt. 1, 368 – 380 (1970).
46. Jaffé F. C., Geothermal energy, a review, *Bull. Ver. Schweiz. Petrol.-Geol. u.-Ing.*, **38**, No.93, 17 – 40 (1971).
47. Джонс П., Геотермические ресурсы Северо-Мексиканского бассейна, сб. «Изучение и использование геотермических ресурсов», под ред. Э. Тонджорджи, изд-во «Мир», 1975, стр. 41 – 55
48. Keller G. V., Induction methods in prospecting for hot water, *Geothermics*, special issue 2, **2**, pt. 1, 318 – 332 (1970).
49. Kresl M., Novak V., Terrestrial heat flow in the territory of Czechoslovakia and the measurement of thermal conductivity with fully automatic apparatus, *Geothermics*, special issue 2, **2**, pt. 2 (1970).
50. Lange A. L., Westphal W. H., Microearthquakes near The Geysers, Sonoma County, *California. Jour. Geophys. Res.*, **74**, 4377 – 4378 (1969).
51. Lee W. H. K., Uyeda S., Review of heat flow data, in W. H. K. Lee, ed., Terrestrial heat flow, *Am. Geophys. Union Mon.*, ser. 8, 1965, pp. 87 – 190.
52. Lovering T. S., Goode H. D., Measuring geothermal gradients in drill holes less than 60 feet deep, East Tintic district, Utah, *U. S. Geol. Survey Bull.*, 1172 (1963).
53. Lumb J. T., Macdonald W. J. P., Near-surface resistivity surveys of geothermal areas using electromagnetic method, *Geothermics*, special issue 2, **2**, pt. 1, 311 – 317 (1970).

54. Macdonald W. J. P., Muffler L. J. P., *Recent geophysical exploration of the Kawerau geothermal field, North Island, New Zealand, N. Z. Jour. Geol. and Geophysics*, **15**, 303–317. (1972).
55. McNitt J. R., Review of geothermal resources, in W. H. K. Lee, ed., *Terrestrial heat flow, Am. Geophys. Union. Mon.*, ser. 8, 1965, pp. 240 – 266.
56. Mahon W. A. J., Finlayson J. B., The chemistry of the Broadlands geothermal area, New Zealand, *Am. Jour. Sci.*, **272**, No. 1, 48 – 68.
57. Makarenko F. A., Mavritsky B. F., Lokchine B. A., Kononov V. I., Geothermal resources of the USSR and prospects for their practical use, *Geothermics, special issue 2*, **2**, pt. 2 (1970).
58. Meidav T., Furgerson R., Electrical resistivity for geothermal exploration in the Imperial Valley, in *Cooperative geological-geophysical-geochemical investigations of geothermal resources in the Imperial Valley area of California*, University of California, Riverside, Education Research Service, 1971, pp. 43 – 88.
59. Merriam R., Bandy O. L., Source of upper Cenozoic sediments in Colorado delta region, *Jour. Sed. Pet.*, **35**, 911 – 916 (1965).
60. Muffler L. J. P., Doe B. R., Composition and mean age of detritus of the Colorado River delta in the Salton Trough, southeastern California, *Jour. Sed. Pet.*, **38**, 384 – 399 (1968).
61. Muffler L. J. P., White D. E., Active metamorphism of upper Cenozoic sediments in the Salton Sea geothermal field and the Salton Trough, southeastern California, *Geol. Soc. Am. Bull.*, **80**, 157 – 182 (1969).
62. Muffler L. J. P., Geothermal energy, *The Science Teacher*, **39**, No. 3, 40 – 43 (1972).
63. Pálmason G., Friedman J. D., Williams R. S., Jr., Jónsson J., Saemundsson K., Aerial infrared surveys of Reykjanes and Torfajökull thermal areas, Iceland, with a section on the cost of exploration surveys, *Geothermics, special issue 2*, **2**, pt. 1, 399 – 412 (1970).
64. Risk G. F., Macdonald W. J. P., Dawson G. B., D. C. resistivity surveys of the Broadlands geothermal region, New Zealand, *Geothermics, special issue 2*, **2**, pt. 1, 287 – 294 (1970).
65. Sass J. H., The earth's heat and internal temperatures, in I. G. Gass, P. J. Smith, and R. C. L. Wilson, eds., *Understanding the earth*, Sedgwick Park, Eng., Artemis Press, 1971, pp. 81 – 87.
66. Sestini G., Heat-flow measurement in non-homogeneous terrains. Its application to geothermal areas, *Geothermics, special issue 2*, **2**, pt. 1, 424 – 436 (1970).
67. Simmons G., Horai K., Heat flow data 2, *Jour. Geophys. Res.*, **73**, 6608 – 6629 (1968).
68. Смит Дж., Исследование и использование геотермальных ресурсов в Новой Зеландии, сб. «Изучение и использование геотермических ресурсов», под ред. Тонджорджи, изд-во "Мир", 1975, стр. 192 – 227.

69. Steiner A., Clay minerals in hydrothermally altered rocks at Wairakei, New Zealand, *Clays and Clay Minerals*, **16**, 193 – 213 (1968).
70. Studt F. E., Geophysical prospecting in New Zealand's hydrothermal fields, Proc. U. N. Conf. New Sources of Energy, Rome, 1961, v. 2, Geothermal Energy, 1964, pp. 380 – 385.
71. Thompson G. E. K., Banwell C. J., Dawson G. B., Dickinson D. J., Prospecting of hydrothermal areas by surface thermal surveys, Proc. U. N. Conf. New Sources of Energy, Rome, 1961, v. 2, Geothermal Energy, 1964, pp. 386 – 401.
72. Ward P. L., Björnsson S., Microearthquakes, swarms, and the geothermal areas of Iceland, *Jour. Geophys. Res.*, **76**, 3953 – 3982 (1971).
73. Ward P. L., Jacob K. H., Microearthquakes in the Ahuachapan geothermal field, El Salvador, Central America, *Science*, **173**, 328 – 330 (1971).
74. Ward P. L., Pálmason G., Drake C., Microearthquake survey and the mid-Atlantic ridge in Iceland, *Jour. Geophys. Res.*, **74**, 665 – 684 (1969).
75. White D. E., Geothermal energy, U. S. Geol. Survey Circular 519, 1965.
76. White D. E., Hydrology, activity, and heat flow of the Steamboat Springs thermal system, Washoe County, Nevada, U. S. Geol. Survey Prof. Paper 458-C, 1968, p. 109.
77. White D. E., Rapid heat-flow surveying of geothermal areas, utilizing individual snowfalls as calorimeters, *Jour. Geophys. Res.*, **74**, 5191 – 5201 (1969).
78. White D. E., Geochemistry applied to the discovery, evaluation, and exploitation, of geothermal energy resources, *Geothermics*, special issue 2, **1** (1970).
79. White D. E., Miller L. D., Calibration of geothermal infrared anomalies of low intensity in terms of heat flow, Yellowstone National Park (abs.), *Am. Geophys. Union Trans.*, **50**, No.4, 348 (1969).
80. Whiteford P. C., Ground movement in the Waiotapu geothermal region, New Zealand, *Geothermics*, special issue 2, **2**, pt. 1, 478 – 486 (1970).

6. ДОБЫЧА ВОДЯНОГО ПАРА В ДОЛИНЕ БОЛЬШИХ ГЕЙЗЕРОВ

Ч. Ф. Бадд мл.¹⁾

Добыча геотермальной жидкости сходна с добычей нефти и газа. Система отбора пара представляет собой скважину, обсаженную колонной труб, сохраняющих ее постоянное сечение, и оснащенную оборудованием для регулирования расхода и транспортировки теплоносителя к месту использования. Известно, что теплоноситель существует либо в жидкой, либо в паровой фазе. Большинство известных геотермальных систем – это бассейны с горячей водой при высоких температуре и давлении, в которых пар образуется только при вскипании ее вследствие снижения давления в скважине /4/. Ряд систем, в которых давление существенно ниже гидростатического, содержат насыщенный водяной пар и воду. Преобладающая фаза, пар или вода, определяет эксплуатационные особенности месторождения, а также методы регулирования и технику добычи. В Долине Больших Гейзеров, расположенной на севере округа Сонома в Калифорнии, преобладающей является паровая фаза, что характерно лишь для немногих эксплуатируемых геотермальных полей, таких, как Лардерелло в Италии и Мацукава в Японии.

Фирма "Юнион ойл оф Кэлифониз" занимается освоением геотермального поля в Долине Больших Гейзеров, с тех пор как она в 1967г. объединила свои усилия с фирмами "Магма пауэр" и "Термал пауэр", которые первыми начали разработку месторождения. За это время установленная мощность электростанции возросла с 54 до 302 МВт, а разведанная мощность месторождения – с 192 до 750 МВт. В настоящее время ведется поисковое бурение с целью расширения границ продуктивной площади. Продолжение бурения на уже разведанной площади увеличивает производственную мощность на 100 МВт ежегодно при сохранении производительности пара на уровне, необходимом для работы электростанций.

¹⁾ Бадд Ч. Ф. мл., сотрудник фирмы << Юнион ойл оф Кэлифониз >>, электростанция << Большие Гейзеры >>, Кловвердейл.

Планирование и подготовительные работы

Добываемый в Долине Больших Гейзеров пар покупает фирма "Тэсифик гэз энд электрик". Пар используется в конденсационных турбинах, вращающих роторы электрогенераторов. Пар, поднимаясь из бассейна к поверхности, расширяется и охлаждается; при этом избыточное давление снижается от $3,24 - 3,58 \text{ МН/м}^2$ до величины порядка $0,89 \text{ МН/м}^2$ в устье скважины, в связи с чем турбины проектируются на избыточное входное давление $0,6 - 0,7 \text{ МН/м}^2$. Из-за больших тепловых потерь при передаче пара по трубопроводу его необходимо использовать в непосредственной близости от парового поля. Следовательно, производственное оборудование нужно располагать непосредственно у скважин. В связи с этим на ранней стадии проектирования необходима договоренность между потребителем и производителем относительно выбора места для строительства электростанции.

Для работы турбины с оптимальной мощностью требуется постоянный расход пара. Каждый из устанавливаемых в настоящее время в Долине Больших Гейзеров турбогенераторов мощностью 55 МВт обладает пропускной способностью 126 кг/с перегретого пара. Так как средняя начальная производительность одной скважины составляет примерно 19 кг/с, для каждого энергоблока требуется семь скважин. По мере истощения скважин в систему будут вводиться новые скважины, что обеспечит подачу пара к турбогенератору с постоянным расходом. Учитывая непрерывную потребность в бурении новых скважин для поддержания постоянного расхода пара, производитель и потребитель должны договориться о минимальном сроке службы каждого энергоблока, с тем чтобы обеспечить его достаточной продуктивной площадью. Отведенная площадь должна прилегать к участку, первоначально закрепляемому за данным энергоблоком, чтобы новые скважины можно было легко подключить к существующей системе паропроводов.

Общая мощность геотермального поля определяется числом расположенных на нем энергоблоков. Габариты каждого энергоблока непосредственно связаны с выходной мощностью турбогенератора и сроком службы оборудования, который потребитель и производитель договариваются считать сроком амортизации капиталовложений. При разведке геотермальных месторождений границы потенциально продуктивных зон определяются весьма приблизительно (гл. 5). Например, известная гравитационная аномалия в Долине Больших Гейзеров /3/ охватывает площадь в 160 км^2 . В пределах этой аномалии находятся четыре широко разнесенные скважины, пробуренные на глубину более 2100 м, которые тем не менее не дают пара, возможно, из-за отсутствия проницаемости пород в пределах парового бассейна. Как в нефтедобывающей и газовой промышленности, при разработке

геотермальных месторождений последним и решающим инструментом разведки геотермального месторождения является бур, который должен пройти сквозь формацию и установить наличие тепла, теплоносителя и проницаемость пород, являющиеся необходимыми компонентами рентабельного геотермального бассейна.

Детальная разведка и выявление необходимой для энергоблока мощности производятся в определенной последовательности. В настоящее время для Долины Больших Гейзеров строятся электростанции мощностью 110 МВт, состоящие из двух энергоблоков по 55 МВт каждый. Ежегодно планируется вводить в строй одну такую установку. Общая площадь для каждой электростанции определяется поисковым бурением. Границы участка, который предполагается отвести под строительство электростанции, устанавливаются бурением нескольких скважин для определения глубины залегания и производительности парового бассейна. Эти предварительные исследования позволяют инженерам определить, какую продуктивную площадь следует отвести под строительство электростанции, сколько скважин следует пробурить первоначально и сколько скважин потребуется для поддержания их производительности на уровне, необходимом для работы станции. Для этого достаточно двух широко разнесенных скважин.

По существующему ныне законодательству шт. Калифорния потребитель обязан подавать заявку на необходимую для него строительную площадку за год до начала строительства, т. е. практически за 4 года до предполагаемого ввода в эксплуатацию станции, сооружаемой в Долине Больших Гейзеров. Кроме того, за год необходимо представить сведения о требуемом расходе пара, с тем чтобы учесть его при сооружении паропровода. Таким образом, от открытия месторождения и оценки его размеров до ввода в эксплуатацию проходит 5 лет. Все эти задержки снижают рентабельность работ.

Бурение скважин и подготовка их к эксплуатации

При бурении паровых геотермальных скважин возникают проблемы, которые не встречаются при бурении нефтяных и газовых скважин. Первая из них связана с самой формацией месторождения. В Долине Больших Гейзеров продуктивная зона представляет собой граувакковый песчаник Францисканской формации. (В нефтеносных районах Францисканскую формацию называют породами основания.) Граувакковый песчаник представляет собой метаморфическую породу, почти не поддающуюся бурению даже буром для твердых горных пород. Бурение с глинистым раствором вызывает "остаточную циркуляцию" в зонах проницаемости при давлениях теплоносителя, гораздо меньших гидростатического. При бурении с воздухом повышаются скорости бурения и снимаются проблемы, связанные с "остаточной

циркуляцией", но такое бурение можно применять только ниже горизонтов, в которых основные водоносные пласты обсажены трубами, так как вода может проникнуть вверх по скважине и вызвать оплывание породы. Высокие температуры и твердые породы разрушают буровое оборудование. Как только бур достигает паросодержащих пород, давление циркулирующего воздуха возрастает и окружная скорость достигает скорости звука, что приводит к эрозионному износу инструмента в местах стыка, обусловленному столкновениями с высокоскоростными частицами. Чтобы избежать механических повреждений уже пробуренной скважины, необходимо тщательно разработать конструкцию обсадной колонны и подобрать цементирующие материалы с учетом условий, существующих в скважине.

Диаметры скважины и обсадных труб определяют производительность готовой паровой скважины; скважины могут иметь большой расход пара, но сопротивление трения обсадной колонны и скважины ограничивает расход.

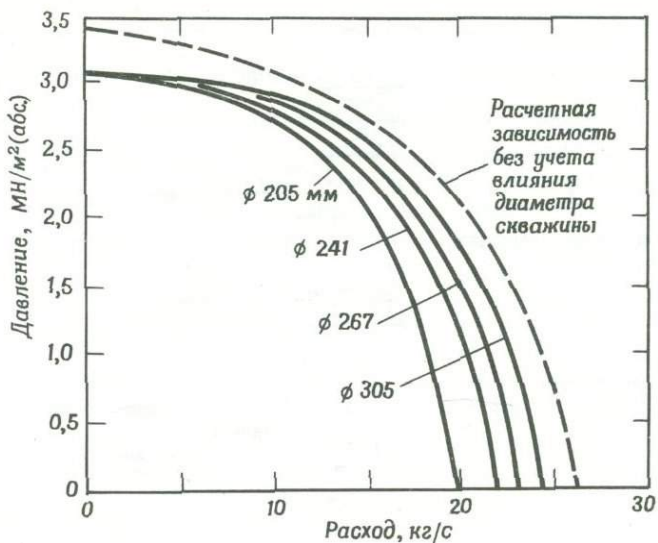
Много внимания уделялось разработке и осуществлению программ оптимального бурения в Долине Больших Гейзеров, чтобы обеспечить благоприятный баланс между стоимостью и производительностью скважины. Путем испытаний с противодавлением /1/ и из изохронных испытаний /2/ было установлено, что производительность паровой скважины в Долине Больших Гейзеров описывается классической формулой

$$W = C (P_{СТ}^2 - P_{СКВ}^2)^n, \quad (1)$$

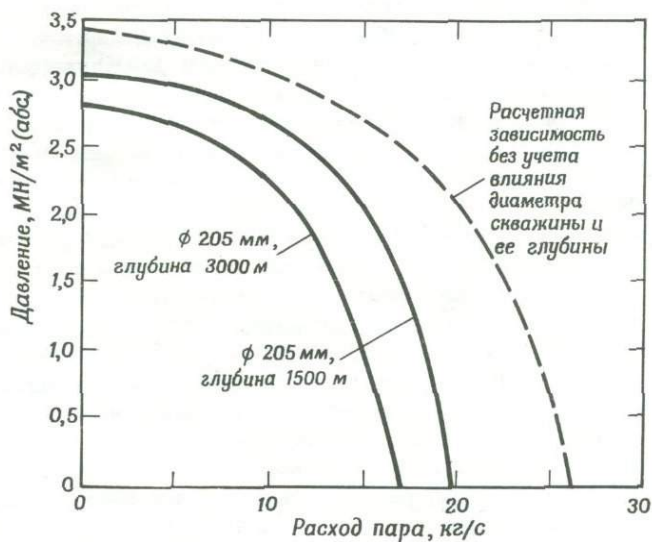
где W — паропроизводительность; C — коэффициент, зависящий от времени, состава источника, свойств теплоносителя, расхода, условий в скважине и т. д.; $P_{СТ}$ — статическое давление в бассейне; $P_{СКВ}$ — давление пара на входе в скважину; n — показатель степени, постоянная величина при обычных производительностях, заключенная в пределах $0,5 \leq n \leq 1$.

Следовательно, производительность W зависит от давления в забое скважины $P_{СКВ}$, которое складывается из напора в устье скважины, потерь давления на преодоление сопротивления трения и веса столба жидкости. На фиг. 1 представлено изменение расчетных параметров в зависимости от диаметра обсадной колонны и скважины для подготовленной к эксплуатации типичной геотермальной паровой скважины в Долине Больших Гейзеров. При прочих равных условиях уменьшение диаметра обсадной колонны приводит к росту потерь на трение и уменьшению производительности пара.

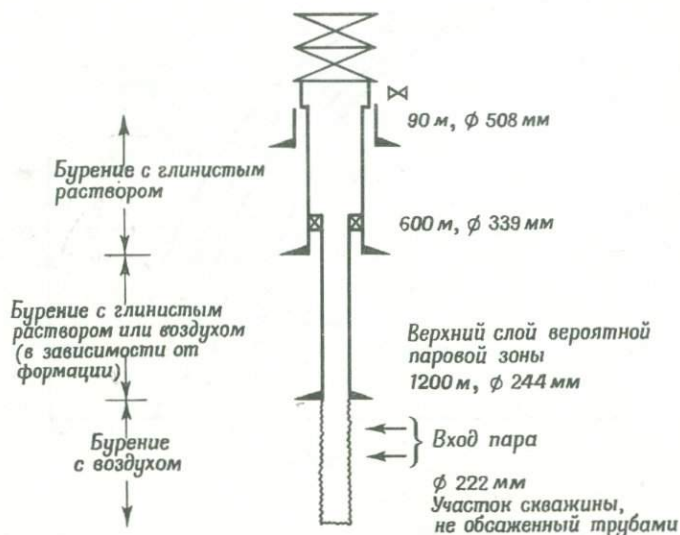
В Долине Больших Гейзеров стоимость бурения быстро возрастает с глубиной, причем глубина скважин составляет от 200 до 2700 м. Вероятность найти экономически выгодную паропроизводительную скважину, обеспечивающую быстрый оборот капиталовложений, резко умень-



Ф и г. 1. Расход пара в зависимости от рабочего давления в устье скважины при различных эквивалентных диаметрах труб для типичной паровой скважины глубиной 1500 м в Долине Больших Гейзеров.



Ф и г. 2. Расход пара в зависимости от рабочего давления в устье скважины для двух глубин в Долине Больших Гейзеров.



Ф и г. 3. Схема типичной скважины, подготовленной к эксплуатации, в Долине Больших Гейзеров.

шается с глубиной из-за увеличения длины паропровода. При прочих равных условиях скважина глубиной 3000 м производит пара на 20% меньше, чем такая же скважина глубиной 1500 м (фиг. 2). Таким образом, задача заключается в определении размеров скважин, обеспечивающих максимальное количество пара на каждый доллар, затраченный на бурение. Оптимальный вариант для Долины Больших Гейзеров показан на фиг. 3. До глубины 600 м ствол скважины обсажен трубами диаметром 339 мм, а затем участок в 600 м — диаметром 244 мм и, наконец, самый глубокий участок длиной 600 м — диаметром 222 мм, через который пар поступает в скважину, трубами не закрепляется. Очевидно, что оптимальные размеры можно подобрать только после разбуривания скважины и проведения испытаний для определения величины констант, входящих в уравнение производительности паровой скважины. По-видимому, невозможно предсказать производительность скважины в Долине Больших Гейзеров, так же как и в Лардерелло, прежде чем она будет пробурена, а следовательно, нельзя точно предсказать величины C и n . Таким образом, расчеты оптимальных скважин должны опираться на типичные значения, полученные для типичных скважин, при условиях, близких к средним.

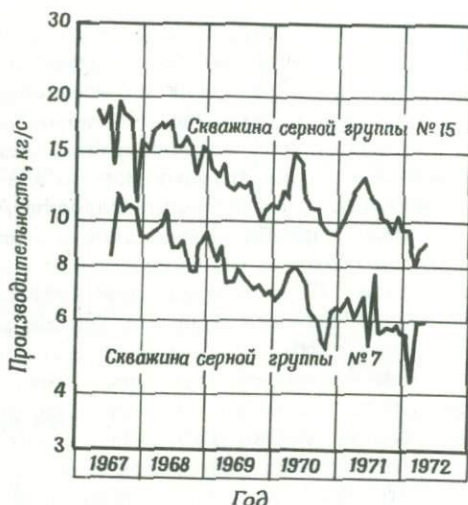
Эксплуатационные характеристики геотермального бассейна

Так же как при эксплуатации нефтеносных и газовых месторождений, потенциальные запасы энергии геотермального поля можно предсказать только после определения эксплуатационных характеристик подземного геотермального бассейна. Можно ожидать, что каждое геотермальное месторождение, подобно нефтеносному и газовому, обладает индивидуальными свойствами породы и теплоносителей, а следовательно, и индивидуальными эксплуатационными характеристиками. Бассейн системы с преобладанием пара в Долине Больших Гейзеров с 1967 г. был объектом постоянного исследования фирмой "Юнион ойл" и ряда других /5/. Эксплуатация месторождения показала, что дебит отдельных скважин падает и для поддержания снабжения энергоблоков паром требуются дополнительные скважины. Об этом же свидетельствует и опыт эксплуатации геотермального поля Лардерелло, где требуются все новые скважины для поддержания мощности электростанции на уровне 365 МВт.

В случае газовых и нефтяных разработок новые месторождения часто оцениваются путем сравнения эксплуатационных характеристик новых скважин с характеристиками аналогичных скважин в месторождениях, эксплуатируемых в течение длительного времени, часть из которых находится на стадии истощения. Геотермальные системы с преобладанием паровой фазы сравнивать не с чем. Хотя геотермальное поле Лардерелло, крупнейшее геотермальное месторождение с преобладанием паровой фазы, эксплуатируется с начала нашего столетия, его производительность довольно мала по сравнению с его емкостью и запасами. В связи с этим Лардерелло нельзя считать исчерпывающей моделью продолжительно эксплуатируемого месторождения. Кроме того, регистрация дебита скважины, статического давления в бассейне и испытания по повышению давления здесь стали проводиться только с недавних пор.

В Долине Больших Гейзеров регистрация дебита и давления до середины 1967 г. также не проводилась. Но изучение данных, извлеченных из старых дневников и писем, позволило инженерам фирмы "Юнион ойл" составить вполне достоверную историю дебита и изменения давления в скважинах, работавших до этого времени. Эти данные и ведущиеся с середины 1967 г. записи составили исчерпывающее описание системы с преобладанием паровой фазы. Применение основных физических законов для описания этой системы позволило создать основу для изучения бассейна, с тем чтобы предсказать возможности его дальнейшей эксплуатации.

На фиг. 4 представлены изменения производительности двух эксплуатационных скважин в Долине Больших Гейзеров. Эти две скважины вместе с другими эксплуатационными скважинами являются частью энергоблока, с 1967 г. обеспечивающего паром турбогенератор № 3.



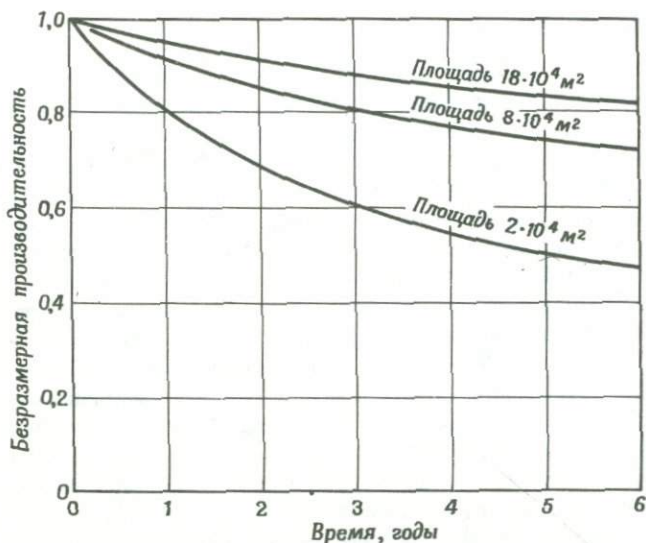
Ф и г. 4. Производительность паровых скважин в Долине Больших Гейзеров в зависимости от времени.

Средняя плотность размещения скважин равна $1/2 \cdot 10^4 \text{ м}^{-2}$, и, как видно из фиг. 4, производительность обеих скважин со временем уменьшается.

На протяжении всего срока службы напор в устьях обеих скважин приблизительно постоянен. Таким образом, колебания и уменьшение производительности не связаны с изменением условий на поверхности. В этих скважинах с февраля 1967 г. периодически проводятся измерения давления. Эти измерения указали на отсутствие изменений проницаемости, что имело бы место в том случае, если бы уменьшение производительности было вызвано образованием корки на стенках скважины либо закупоркой скважины или породы.

Из этих данных следует, что одним из факторов, снижающих производительность скважин, является уменьшение давления в бассейне. Измерения статического давления в бассейне по всей площади поля подтвердили это предположение.

На площади расположения этих двух скважин наблюдалось еще одно явление – взаимозависимость давления в скважинах, обусловленная проницаемостью пород. Состояние соседних скважин оказывает сильное влияние на работу каждой скважины. Статическое давление в закрытых скважинах уменьшается при эксплуатации соседних скважин. При перекрытии действующих скважин статические давления в расположенных рядом закрытых скважинах обычно становятся близ-



Ф и г. 5. Влияние плотности размещения скважин на производительность пара, определенное с помощью математической модели бассейна.

1 — плотность размещения скважин $1/18 \cdot 10^4 \text{ м}^{-2}$; 2 — $1/8 \cdot 10^4 \text{ м}^{-2}$; 3 — $1/2 \cdot 10^4 \text{ м}^{-2}$.

кими к статическому давлению в бассейне и, наоборот, производительность действующих скважин уменьшается при эксплуатации соседних скважин и увеличивается, когда соседние скважины перекрыты. Разработана математическая модель состояния парового бассейна. Модель позволяет оптимально расположить скважины при будущем расширении поля. На основе этой модели создана программа разработки месторождения, предусматривающая ввод в эксплуатацию минимального количества новых скважин в течение срока службы проекта при максимальном использовании всех потенциальных возможностей поля.

Типичные варианты размещения скважин приведены на фиг. 5. Как и предполагалось, взаимное влияние становится наиболее сильным в случае максимальной плотности размещения скважин — $1/2 \times 10^4 \text{ м}^{-2}$. Как было показано ранее, точная форма каждой кривой производительности скважин зависит от глубины бурения и метода ввода в эксплуатацию скважин. Наиболее низкая производительность наблюдается у близко расположенных скважин. Эти данные позволяют выбрать оптимальное размещение скважин и оставить в резерве разведанную площадь для бурения дополнительных скважин, с тем чтобы общий дебит скважин держался на уровне, необходимом для работы электростанций в течение всего срока службы.

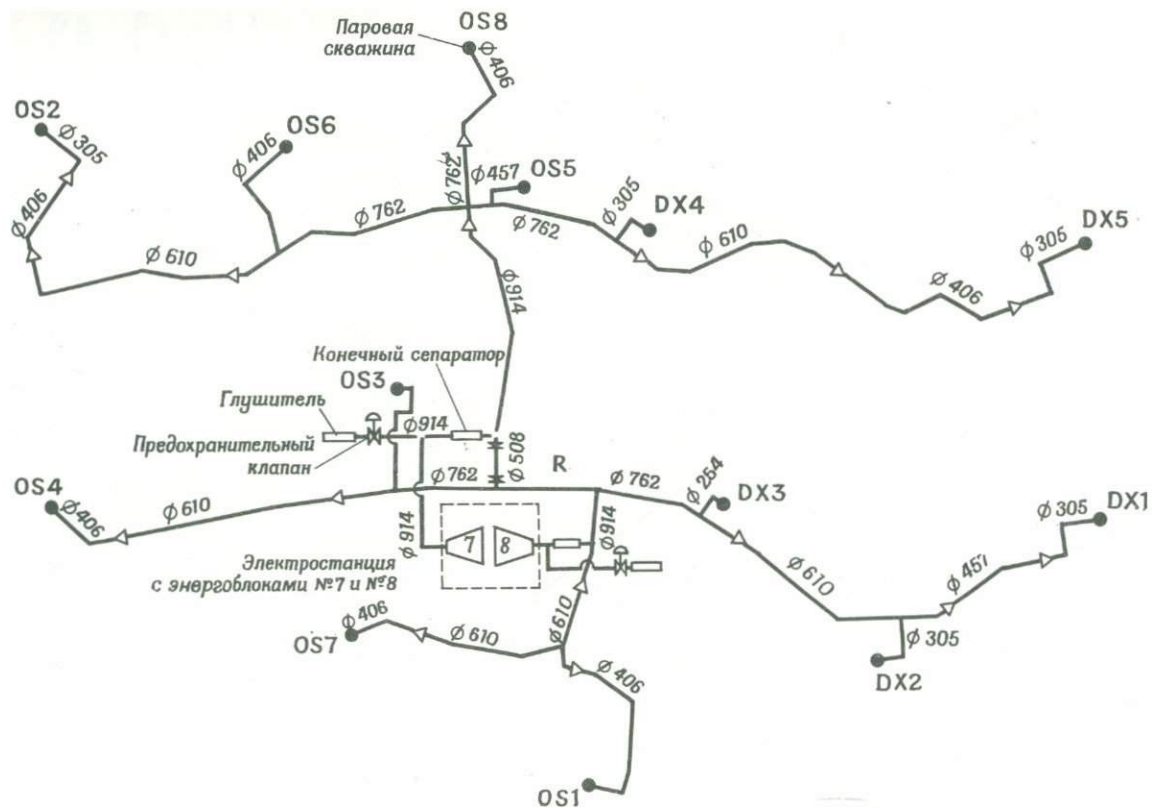
Наземное оборудование

Осушенный и освобожденный от твердых частиц пар из нескольких скважин по паропроводам подается к электростанции по возможности с наименьшими тепловыми потерями. Паропроводы должны быть теплоизолированными и иметь размеры, определенные из условия минимального сопротивления потоку пара. Система паропроводов оборудована сепараторами для отделения жидкости и удаления твердых частиц, а также предохранительными устройствами для понижения давления в случае остановки станции. Вся система должна быть спроектирована таким образом, чтобы свести к минимуму число участков, не имеющих выхода в общую сеть, где водяной пар, оказываясь в ловушке, охлаждается и конденсируется. Конденсат не должен просачиваться в паропровод и снижать энергию пара. Общая планировка паровой магистрали должна учитывать вероятный рост системы и возможность подключения дополнительных скважин.

Размеры паропровода следует выбирать с учетом влияния площади боковой поверхности и диаметра труб на тепловые потери и понижение давления. Задача сделать расход пара максимальным, а тепловые потери и стоимость добычи пара минимальными требует компромиссного решения. С увеличением диаметра трубопроводов повышается расход пара, снижаются потери на трение, уменьшается давление в устье скважины и пар можно извлекать из большего объема породы в бассейне. Но с увеличением диаметра, т. е. с увеличением площади поверхности, возрастают тепловые потери и стоимость паропровода. При использовании паропроводов малого диаметра увеличиваются потери на трение, падение давления и уменьшается расход пара.

В Долине Больших Гейзеров была разработана система, которая в значительной степени оптимизирует эти параметры (фиг. 6). Она обеспечивает подачу 25,4 кг/с сухого перегретого пара через две сепарационные системы к двум энергоблокам, которые в сумме вырабатывают 110 МВт электроэнергии. Окольный маршрут трассы паропровода обусловлен гористой местностью площади. Наибольшего диаметра (914 мм) достигают участки паропровода, расположенные на входе двух отдельных турбин; диаметр паропровода к периферии системы постепенно уменьшается до 254 мм в некоторых скважинах. Большой диаметр главного паропровода позволит подключить к нему линии от дополнительных скважин, когда снизится производительность основной группы, состоящей из 14 скважин.

Вблизи каждой скважины расположен резервуар для отделения пара от жидкости и твердых частиц. Поскольку пар, добываемый в Долине Больших Гейзеров, сухой и перегретый, сепарация жидкости необходима только в тех редких случаях, когда повреждена обсадка скважины. Однако паром непрерывно выносятся мельчайшие твердые



Ф и г. 6. Схема системы паропроводов в Долине Больших Гейзеров.

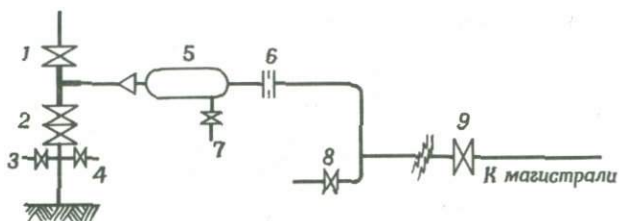
частицы, состоящие главным образом из пыли породы и коррозионно-активных веществ. Эти частицы удаляются с помощью горизонтальных центробежных сепараторов, эффективность которых в случае частиц диаметром 10 мкм и более равна 99%.

Производительность и рабочее давление в устье каждой скважины непрерывно регистрируются счетчиком. Эта информация нужна не только для начисления арендной платы землевладельцу, но и для сбора данных о производительности при долгосрочном изучении бассейна. Наконец, измерение теплосодержания, определение состава пара, а также содержания твердых частиц являются обычными операциями, которые проводятся с помощью обычного оборудования и аппаратуры, приспособленных для этих целей.

Когда скважина перекрыта, избыточное давление в устье скважины достигает $3,3 \text{ МН/м}^2$. При остановке электростанции это давление действует на стенки трубопроводов. Чтобы предохранить линию от недопустимого повышения давления, у входа трубопровода на станцию устанавливаются пневматические предохранительные клапаны. При повышении давления в трубопроводе от номинального избыточного значения $0,69-0,83 \text{ МН/м}^2$ до $0,99 \text{ МН/м}^2$ они стравливают пар в атмосферу. Эта система клапанов рассчитана на полный расход паропровода, т. е. на расход пара от всех скважин при избыточном давлении $1,18 \text{ МН/м}^2$. Дополнительная безопасность обеспечивается предохранительными диафрагмами, установленными в определенных точках паропровода, которые разрываются при избыточном давлении более $1,26 \text{ МН/м}^2$. Выхлопные трубы предохранительных клапанов оборудованы глушителями для ослабления шума. Во время стравливания пара из системы с большим расходом и при низком давлении возникает низкочастотный шум высокой интенсивности. Ослабить этот шум довольно трудно, и было проведено множество дорогостоящих экспериментов, с тем чтобы уменьшить его вредное действие.

В отдельных местах паропровода устанавливаются грязеуловители, где оседают крупные частицы. Грязеуловитель представляет собой тройник, в котором поток пара поворачивает на 90°C . Одно из колен тройника заглушено и образует ловушку для тяжелых частиц. Открыв вентиль, можно продуть грязеуловитель, чтобы удалить осевшие частицы.

Устье скважины оборудовано тройником, через который скважина соединяется с атмосферой и продувается перед подачей пара в трубопровод, пока давление в ней не снизится до рабочего давления в магистрали. Эта мера предотвращает попадание крупных частиц (величиной с кулак) в систему паропровода в начальный период продувки. Использование продувочных тройников и грязеуловителей в значительной степени снизило чрезмерную эрозию, из-за которой раньше выходили из строя энергоблоки на электростанции "Большие Гейзеры".



Ф и г. 7. Схема паропровода в устье типичной скважины.

1 — заслонка ϕ 254 мм; 2 — заслонки ϕ 305 мм; 3 — вентиль ϕ 76,2 мм; 4 — вентиль ϕ 25,4 мм; 5 — сепаратор; 6 — расходомер; 7 — дренаж; 8 — грязеуловитель; 9 — главная паровая задвижка.

На фиг. 7 представлена схема размещения оборудования в устье типичной скважины и паропровода, включающая продувочный тройник, центробежный сепаратор, расходомер и грязеуловитель. Она используется в настоящее время на всех новых установках электростанции "Большие Гейзеры". По этой схеме постепенно переоборудуются и старые установки.

Организация эксплуатации

Когда энергоблок вместе с требуемым количеством скважин и паропроводом, а также электростанция уже созданы, эксплуатация геотермального месторождения должна осуществляться в тесном взаимодействии между производителем и потребителем пара.

Разогрев паропровода начинается за 24–36 ч до подачи пара на электростанцию. Все скважины последовательно открываются через продувочные тройники в атмосферу, чтобы отвести твердые частицы, камни и конденсат, которые всегда сопутствуют первому выбросу пара. Действие теплового удара на породу и обсадку скважины сводится к минимуму постепенным снижением давления и температуры. По мере освобождения скважин от камней и влаги напоры в системе снижаются до рабочего избыточного давления 0,69–0,83 НМ/м², продувочные тройники перекрываются и пар направляется в паропровод. При закрытой главной паровой задвижке на станции главный предохранительный клапан автоматически выпускает пар через глушители в атмосферу. Влага, которая накапливается в линии, удаляется через дренажные трубы по мере достижения рабочих температур.

Когда пар из скважин поступает в систему паропровода и паропровод нагревается до необходимой температуры, электростанция готова к отбору пара для продувки собственных линий и для привода

турбин. Оператор электростанции, регулируя подачу пара из скважин, не должен слишком быстро увеличивать нагрузку, поскольку это привело бы к мгновенному опустошению линии, уменьшению давления и температуры в скважинах и к выбросу новой порции пыли, грязи и осколков породы из ствола скважины. Для уменьшения этой опасности рекомендуется открыть одновременно все скважины, связанные с паропроводом, а не две или три, даже если станция работает с уменьшенной нагрузкой, подобно тому как это делается в момент пуска энергоблока для проверки баланса турбины, причем излишек пара сбрасывается в атмосферу. Распределение потребления пара таким образом снижает вероятность воздействия на скважины внезапной утечки пара из паропровода, вызванной ошибкой в системе или обслуживающего персонала.

После пуска обслуживание системы сводится к периодическому съему показаний счетчиков и регулярной продувке сепараторов. Однако возможны плановые и внеплановые остановки. Когда остановка происходит внезапно, как, например, в случае неисправности оборудования электростанции, вызывающей временный простой, предохранительные клапаны открываются при увеличении избыточного давления на $0,07-0,1 \text{ МН/м}^2$. При этом давление в паропроводе увеличивается незначительно и не вызывает сильных пульсаций давления и температуры в скважинах. Было установлено, что это наилучший способ сохранения чистоты теплоносителя, необходимой для работы электростанции. При длительной остановке, например для капитального ремонта энергоблока, в Долине Больших Гейзеров принято использовать простой для измерения роста давления в перекрытых скважинах и статического давления в подземном бассейне, с тем чтобы использовать эти данные для исследования ресурсов эксплуатации паропровода.

Закачка отработанного конденсата

Отработанный на электростанции конденсат содержит около 25% общего количества конденсированного пара; остальной конденсат испаряется в градирнях. Этот конденсат содержит растворимые в воде химические вещества и не может быть сброшен в поверхностные воды, которые используются в бытовых и агротехнических целях. Следовательно, его необходимо закачивать через скважины в паросодержащий пласт.

Низкое избыточное давление в бассейне $3,56 \text{ МН/м}^2$ и высокая проницаемость породы обеспечивают закачку с большими расходами, в некоторых случаях более $3,8 \text{ м}^3/\text{мин}$. Закачка стала применяться в Долине Больших Гейзеров с апреля 1969 г. Закупоривания или снижения расхода закачиваемой жидкости до сих пор не наблюдалось. За это время еще две не действующие паровые скважины были пере-

оборудованы для закачки и сейчас весь отработанный на станции конденсат возвращается в бассейн. Весьма вероятно, что этот конденсат будет снова испаряться, а пар снова будет поступать в скважину, удлиняя срок службы геотермального месторождения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Craft B. C., Hawkins M. F., Jr., Applied petroleum reservoir engineering, New York, Prentice-Hall, 1959, pp. 326 – 327.
2. Cullender M. H., The isochronal performance method of determining the flow characteristics of gas wells, *Trans. AIME*, **204**, 137 (1955).
3. Garrison L. E., Geothermal steam in The Geysers-Clear Lake region, California, *Geological Society of America Bull.*, **83**, 1449 – 1468 (1972).
4. Koenig J. B., The world-wide status of geothermal exploration and development, Compendium of first-day papers presented at the first conference of the Geothermal Resources Council, 1972, pp. 1 – 4.
5. Ramey H. J., Jr., *Petitioners vs. Commissioner of Internal Revenue*, Tax Court of The United States, 52 T. C., No.74., 1970.

7. УСТРОЙСТВО И РАБОТА ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ «БОЛЬШИЕ ГЕЙЗЕРЫ»

Дж. П. Финней¹⁾

Вот уже в течение 15 лет фирма "Пэсифик гэз энд электрик" занимается вопросами разработки, проектирования и эксплуатации геотермальных энергоблоков, работающих на сухом паре в Долине Больших Гейзеров в Калифорнии. В данной главе описаны исследования, выполненные фирмой на электростанции "Большие Гейзеры", а также рассматриваются возможности усовершенствования ныне действующего оборудования.

Электростанция "Большие Гейзеры" расположена в гористой местности на северо-востоке графства Сонома, примерно в 130 км севернее Сан-Франциско. Начиная с 1960 г., когда электростанция вступила в строй, фирма "Пэсифик гэз энд электрик", а также ряд добывающих фирм, основных поставщиков пара для электростанции, возглавляемых Калифорнийским отделением фирмы "Юнион ойл", непрерывно расширяют производство.

Восемь блоков турбогенераторов электростанции вырабатывают 290 МВт полезной мощности. Еще два блока мощностью по 53 МВт каждый должны быть пущены в 1973 г, а в 1974 г. после ввода в эксплуатацию еще одного блока с установленной мощностью 106 МВт общая полезная мощность электростанции "Большие Гейзеры" достигнет 502 МВт, и эта электростанция станет крупнейшей в мире геотермальной станцией.

Первая попытка использовать геотермальную энергию для выработки электроэнергии в Долине Больших Гейзеров была предпринята в 20-х годах /1/. С помощью генераторов, приводимых в движение двумя небольшими паровыми машинами, пар к которым поступал из неглубоких скважин, обеспечивалось освещение курорта "Большие Гейзеры". Первая крупная разработка была начата спустя 30 лет. В 1955 и 1956 гг. фирмы "Магма пауэр" и "Термал пауэр" получили в аренду земли с естественными выходами пара вблизи курорта и приступили к бурению. В 1957 г. фирмой "Пэсифик гэз энд

¹⁾ Финней Дж. П. — сотрудник фирмы «Пэсифик гэз энд электрик», Сан-Франциско.

электрик" были проведены испытания всех шести пробуренных здесь скважин и было установлено, что они могут обеспечить рентабельную работу небольшого турбогенератора при стоимости электроэнергии $\sim 0,0025$ долл/(кВт·ч) /4/. В следующем году фирма "Пэсифик" заключила контракт с фирмами "Магма" и "Термал" на установку и пуск агрегата мощностью 11 МВт, предусматривающий установку и пуск дополнительных агрегатов в дальнейшем, при условии что проект окажется удачным.

Блок №1 был пущен в 1960 г. /3/, а блок №2 с расчетной мощностью 13 МВт был введен в эксплуатацию в 1963 г. Блоки №3 и 4 каждый мощностью по 27 МВт были пущены соответственно в 1967 и 1968 гг. /2/.

В 1967 г. фирмы "Юнион ойл оф Кэлифорниэ", которая также являлась владельцем геотермальных участков, присоединилась к совместному проекту, осуществляемому фирмами "Магма" и "Термал", и в настоящее время разработки ведутся на площади 60 км². К 1970 г. фирма "Пэсифик" заключила новый контракт с этим объединенным предприятием с тем, чтобы планомерно увеличивать мощность, вырабатываемую в геотермальных районах. Блоки №5 и 6 были введены в строй в 1971 г., а блоки №7 и 8 – в 1972 г. Как только поставщикам пара удастся доказать наличие дополнительных резервов пара в месторождении сухого пара, которое в настоящее время является крупнейшим в мире, ежегодно можно будет вводить в строй по 100 МВт мощности /5/.

Энергоблок №1 представлял собой опытно-промышленную установку. Хотя в то время имелась некоторая информация относительно опыта работы геотермальных электростанций Италии и Новой Зеландии, существовало мнение, что только путем сооружения и эксплуатации энергоблока удастся доказать конкурентоспособность геотермальной электростанции. С тех пор были проведены обширные исследования конструкционных материалов, схемы энергетического цикла и оборудования станции. В настоящее время продолжают исследования конструкционных материалов, а также ведется исследование воздействия работы электростанции на окружающую среду /4/.

Исследование энергетических циклов и схем электростанций

Задача первых исследований заключалась в определении запасов пара. В то время требовалось доказать возможность обеспечения необходимого расхода пара от скважин для подачи его в турбогенератор энергоблока №1. При различном давлении пара в скважинах давление в устье уменьшается с ростом производительности. Избыточное давление пара в перекрытой скважине равно 3,1–3,45 МН/м² при постоянной энтальпии, равной 2,76–2,77 МДж/кг.

Для полного использования энергии пара оказались пригодными паровые конденсационные турбины с давлением на выходе ниже атмосферного. Так как в этом районе нет воды для охлаждения конденсатора, пришлось включать в цикл градирни в качестве теплоприемников. Было установлено, что тепло источника используется наиболее экономично при давлении на входе в турбину $0,69 \text{ МН/м}^2$ (изб.) и давлении на выходе $13,5 \text{ кН/м}^2$ (абс.). При таких условиях работы турбины мощность скважин в устье близка к максимальной. При более высоких давлениях снижение производительности скважины превышает увеличение к. п. д. установки. При более низких давлениях увеличение производительности скважины компенсируется более низким к. п. д. преобразования энергии пара в электроэнергию. Более того, стоимость и габариты паровых турбин и вспомогательного оборудования быстро увеличиваются с понижением давления. Оказалось, что при любых атмосферных и рабочих условиях расход пара через турбину превышает массовую скорость испарения в градирне. При рабочих условиях количество пара, испаряющегося в градирне, составляет 80% количества пара, протекающего через турбину. Это означает, что в качестве подпиточной воды в градирне может быть использован конденсат турбины.

Следовательно, при такой конструкции электростанции можно использовать турбину со смешивающим конденсатором. Этот конденсатор дешевле конденсатора, который используется на обычных электростанциях на органическом топливе, где требуется высокая чистота конденсата для возврата в котел. В смешивающем конденсаторе пар конденсируется, смешиваясь с охлаждающей водой, когда он проходит каскад поддонов. Существуют два типа смешивающих конденсаторов: барометрический конденсатор и конденсатор без барометрической трубы. Барометрический конденсатор использовался в первых четырех блоках электростанции "Большие Гейзеры" /2/. В этом агрегате удаление смеси конденсата отработавшего в турбине пара и охлаждающей воды осуществляется самотеком через барометрическую колонку, уплотненную ниже уровня воды. Такая конструкция обладает двумя преимуществами: турбогенератор монтируется на уровне пола, и, следовательно, обеспечивается надежность в работе энергоблока, так как вода не может проникнуть в турбину. С другой стороны, эта конструкция требует значительных затрат, связанных с необходимостью сооружения большого тяжелого конденсатора на специальных металлоконструкциях значительно выше турбины и прокладки трубопровода большого диаметра от выхлопа турбины к верхней части конденсатора. В энергоблоке № 5 и в последующих блоках использовались смешивающие конденсаторы без барометрической трубы. В такой конструкции турбина монтируется на бетонном фундаменте, а конденсатор располагается на уровне пола непосредственно под выхлопом турбины. Вследствие более низкого

положения конденсатора для подачи в него охлаждающей воды не требуются насосы. Если подобрать определенную разность уровней размещения конденсатора и градирни, то разрежение в конденсаторе обеспечит подачу охлаждающей воды из бассейна градирни к конденсатору /5/.

В результате исследования состава геотермального пара из продуктивных скважин было установлено, что в паре содержится определенная доля неконденсирующихся газов, которая для различных скважин различна, но в среднем не превышает 1 вес.%. При расчете оборудования содержание газов принималось равным 1%. Интервал концентраций неконденсирующихся газов представлен в табл. 1. Для сравнения следует напомнить, что в обычных энергоблоках, использующих органическое топливо, количество неконденсирующихся газов в паре меньше 0,01 вес.%, причем присутствие этих газов в основном объясняется подсосом воздуха в конденсатор. Вследствие их низкой стоимости и безаварийной работы было решено использовать паровые эжекторы, а не механические вакуумные насосы. Двухступенчатые паровые эжекторы оказались наиболее эффективными при движении пара с начальным давлением, равным давлению на входе в турбину. В первой ступени происходит сжатие газов от давления на выходе 13,5 кН/м² до давления 34,5 кН/м² (абс.). Во второй ступени происходит сжатие газов до более высокого давления ~ 0,1 МН/м² (абс.) (на 6,9 кН/м² выше атмосферного давления) для отвода их через вытяжную трубу, возвышающуюся над зданием электростанции. Для конденсации пара эжекторов используются промежуточный конденсатор и выходной конденсатор, которые представляют собой смешивающие конденсаторы барометрического типа. Эжекторы расходуют около 5% потребляемого каждым энергоблоком пара.

Таблица 1

Содержание неконденсирующихся газов в природном паре

| Газ | Нижняя граница концентрации, % | Верхняя граница концентрации, % | Расчетная концентрация, % |
|-------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------|
| Двуокись углерода | 0,0884 | 1,90 | 0,79 |
| Сероводород | 0,0005 | 0,160 | 0,05 |
| Метан | 0,0056 | 0,132 | 0,05 |
| Аммиак | 0,0056 | 0,106 | 0,07 |
| Азот | 0,0016 | 0,0638 | 0,03 |
| Водород | 0,0018 | 0,0190 | 0,01 |
| Этан | 0,0003 | 0,0019 | - |
| | 0,120 | 2,19 | 1,00 |

Схема теплового баланса энергоблока №1 представлена на фиг. 1. За исключением расходов и небольших различий в компоновке оборудования, эта схема типична для первых четырех энергоблоков. Один энергоблок обслуживает группа скважин. Их совокупные продуктивные характеристики подбираются таким образом, чтобы обеспечить необходимый расход на входе в турбину и необходимое давление. На каждом паропроводе у скважины установлены центробежные сепараторы для удаления мелких осколков породы и пыли, захваченных паром, который поступает из скважин. Паропроводы от отдельных скважин объединяются в главный паропровод, подходящий к энергоблоку. Для быстрого сброса нагрузки турбогенератора главный паропровод должен иметь клапаны, регулирующие давление, или предохранительные клапаны. При нарастании давления в линии более $1,03 \text{ МН/м}^2$ (изб.) клапаны через глушители стравливают пар в атмосферу.

В главном паропроводе непосредственно перед турбиной установлен звездообразный фильтр, защищающий турбину от крупных частиц, которые могут пройти через сепараторы. Между фильтром и турбиной расположены один или несколько стопорных клапанов турбины, которые быстро перекрывают доступ пара в турбину в аварийных ситуациях. Далее стоят один или несколько обратных перекрывающих клапанов; их заслонка или тарелка фиксируется в открытом положении против потока пара. Эти устройства не используются в турбинных установках на органическом топливе, но в данной схеме они применяются для дополнительной защиты турбины, так как из-за наличия пыли в паре снижается надежность работы клапанов. На входе в турбину установлены один или несколько регулирующих клапанов. Они регулируют расход пара и тем самым нагрузку турбины. Эти клапаны с поворотными заслонками реже выходят из строя под действием частиц различных веществ, присутствующих в паре. Если используются несколько регулирующих клапанов, они включаются последовательно для обеспечения наилучшей регулировки.

Отработавший в турбине пар направляется в барометрический конденсатор при давлении $13,5 \text{ кН/м}^2$. Смесь конденсата и охлаждающей воды из сборника горячей воды конденсатора откачивается к градирне циркуляционным насосом. Используется стандартная градирня с принудительной вентиляцией. Холодная вода из бассейна градирни перекачивается в конденсатор еще одним циркуляционным насосом.

Постепенно на электростанции "Большие Гейзеры" монтировались все более крупные энергоблоки. Опыт, накопленный при эксплуатации пушенных ранее блоков, свидетельствует о надежности этого источника энергии, что оправдывает сооружение более крупных энергоблоков. Принимая во внимание непрерывный рост стоимости оборудования электростанции, ее строительства, эксплуатации, а также про-

изводства пара, единственным путем снижения производственных затрат является сооружение более крупных, рентабельных установок. Трудности, связанные с транспортировкой тяжелого станционного оборудования по крутым узким горным дорогам, несколько облегчились благодаря непрерывному улучшению качества общественных дорог, соединяющих строительство с железной дорогой, а также улучшением дорог, принадлежащих фирмам, добывающим пар. В 1974 г. должен был быть пущен в эксплуатацию единственный энергоблок мощностью 106 МВт (энергоблок № 11). Никакого дальнейшего существенного увеличения размеров энергоблоков не предвидится главным образом из-за трудностей транспортировки и увеличения длины паропроводов.

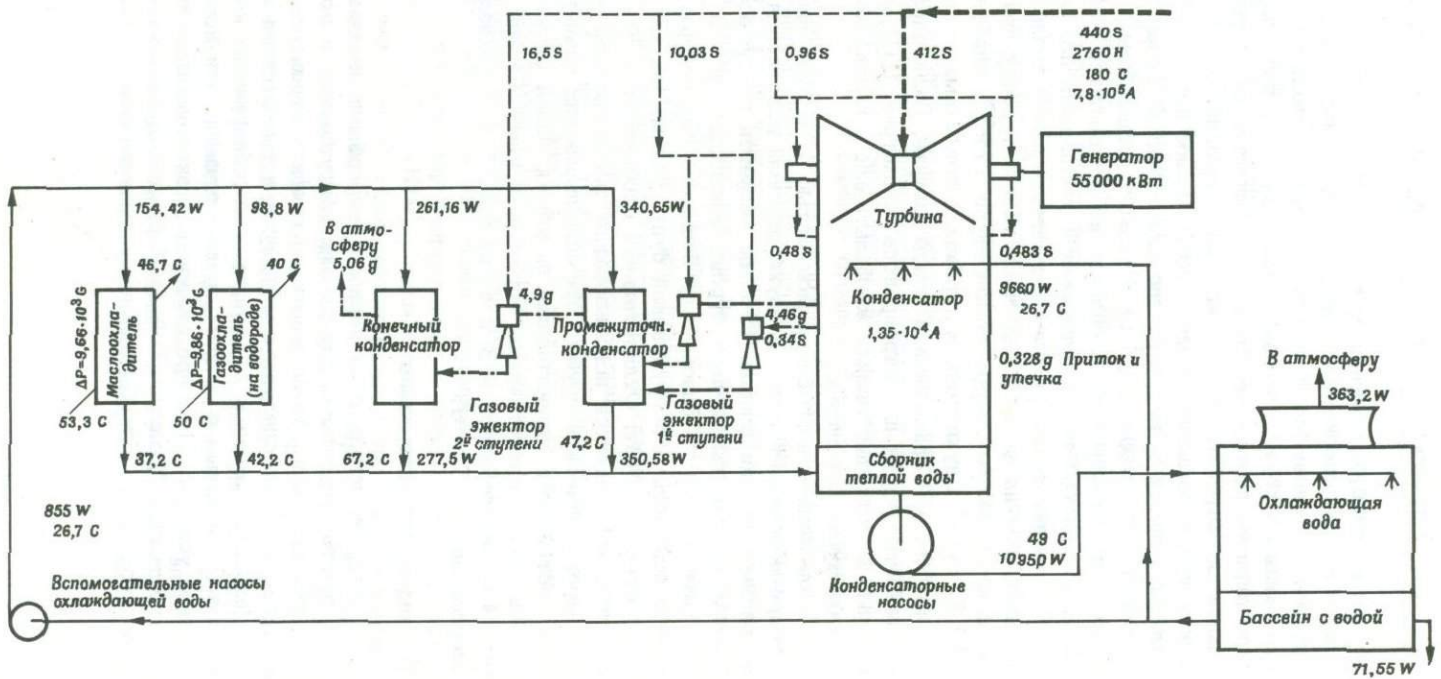
Схема теплового баланса для энергоблоков мощностью 53 МВт представлена на фиг. 2. Пар поступает в турбину при избыточном давлении $0,69 \text{ МН/м}^2$ и при температуре 179°C , давление на выходе $\sim 13,5 \text{ кН/м}^2$. Двухпоточная турбина с лопатками последней ступени длиной 584 мм заключена в одном кожухе. Вход пара в турбину осуществляется через два паропровода диаметром 610 мм, каждый из которых оборудован такими же фильтрами и клапанами, как на энергоблоках, пущенных ранее.

Сооружение энергоблока мощностью 106 МВт еще не завершено. Четырехпоточная турбина в двухкорпусном исполнении с лопатками последней ступени длиной 584 мм является по существу спаренным блоком, состоящим из двух турбин мощностью по 53 МВт каждая. Они установлены на одном валу большого генератора. Энергетический цикл и компоновка оборудования будут такими же, как на энергоблоках мощностью 53 МВт. Отличительной особенностью этих больших энергоблоков является использование смешивающего конденсатора без барометрической трубы. При использовании конденсатора этого типа достигается существенная экономия общей стоимости станции.

На фиг. 3 представлены фотографии энергоблоков № 1 и 2, на фиг. 4 – энергоблоков № 3 и 4, на фиг. 5 и 6 показаны фотографии энергоблоков № 5 и 6.

Исследования материалов

Перед строительством первого энергоблока была исследована пригодность материалов для работы оборудования в возможных условиях эксплуатации. Из-за жесткого графика строительных работ число проверок было сведено к минимуму и была использована ускоренная методика проверки [4]. Хотя были обнаружены непрогнозируемые эффекты, связанные с долгим сроком службы, эти испытания прошли в общем успешно. По мере введения в эксплуатацию новых очередей электростанции "Большие Гейзеры" было получено много данных о возможном сроке службы различных материалов.



Ф и г. 2. Схема теплового баланса при нормальной нагрузке (электроблоки №5 и 6, электростанция «Большие Гейзеры»).

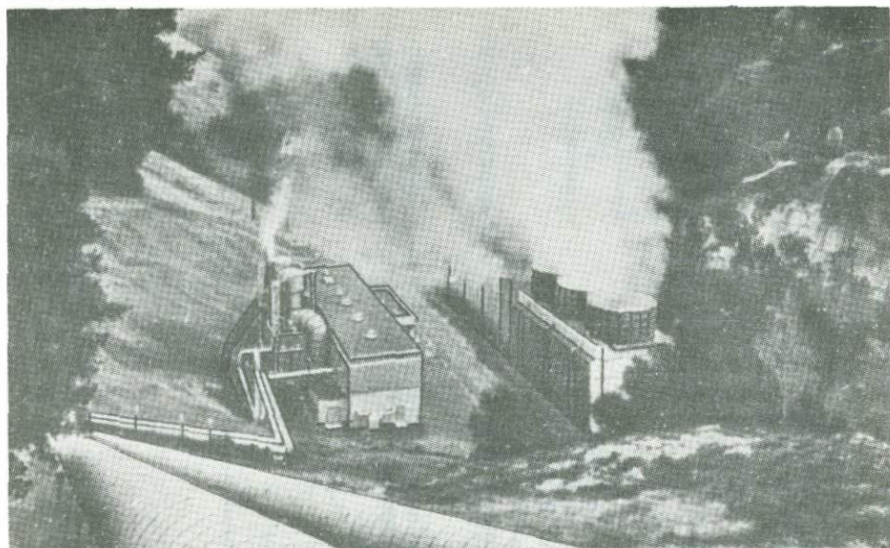
Рабочие характеристики

| | |
|--|--------------------|
| Расход через стопорный клапан | 410 т/ч |
| Выходная электрическая мощность генератора | 55 000 кВт |
| Электрическая мощность, потребляемая вспомога- | |
| тельным оборудованием, кВт: | |
| циркуляционные водяные насосы | 930 |
| вентиляторы градирни | 605 |
| возбудитель | — |
| остальное оборудование | 445 |
| Всего | 1980 |
| Выходная мощность энергоблока | 53 020 кВт |
| Подводимое тепло | 1,22 ТДж/ч |
| Суммарный расход тепла | 22,9 МДж/(кВт · ч) |
| Расчетная температура | 15,6° С |

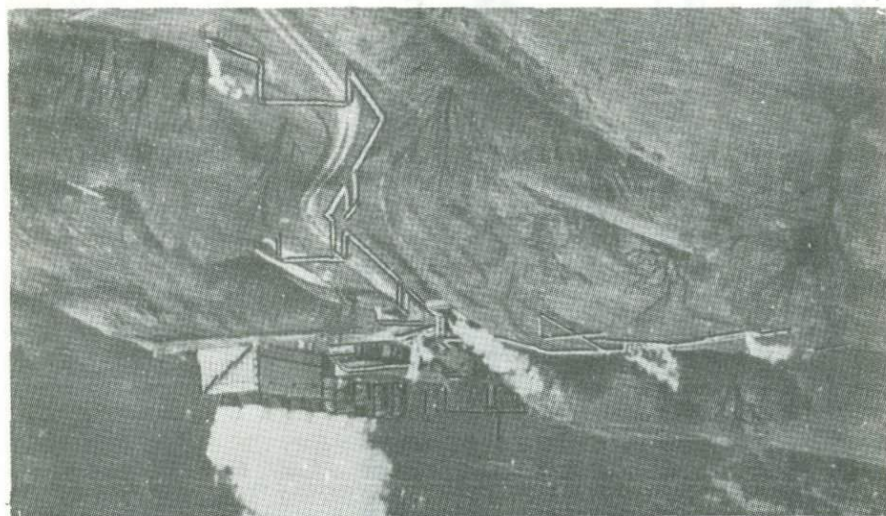
Коэффициент электрической мощности генератора 0,9; давление на выходе турбины 13,5 кН/м²; температура сухого термометра 26,7° С; температура мокрого термометра 18,3° С.

Все расходы пара содержат 1,0 % неконденсирующихся газов.

Обозначения: — — — главный паропровод; — — — водяная линия; - - - паровая линия; — — — газовая линия;
 \bar{S} — расход пара, т/ч; \bar{W} — расход воды, т/ч; \bar{g} — расход газа, т/ч; C — температура, ° С; H — энтальпия пара, Дж/кг;
 A — абсолютное давление, Н/м²; C — избыточное давление, Н/м².

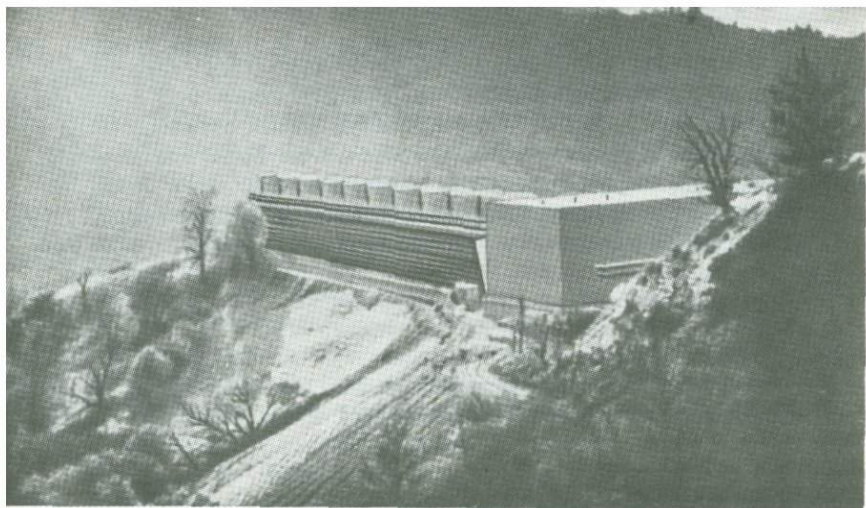


Ф и г. 3. Электростанция «Большие Гейзеры», энергоблоки №1 и 2.

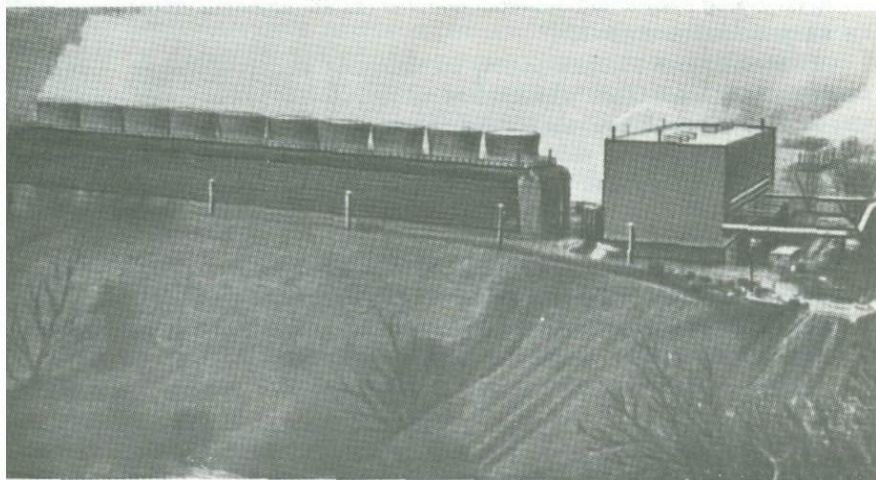


Ф и г. 4. Электростанция «Большие Гейзеры», энергоблоки №3 и 4.

Компенсационные петли (на переднем плане) компенсируют сжатие паропроводов во время остановки станции. Султаны пара поднимаются из пяти продувочных вентилях паропровода (слева); когда электростанция остановлена, пар стравливают через эти вентиля.



Ф и г. 5. Электростанция «Большие Гейзеры», энергоблоки №5 и №6 на стадии завершения. Главные паропроводы от продуктивных скважин еще не достроены.



Ф и г. 6. Электростанция «Большие Гейзеры», энергоблоки №5 и №6 в действии.

Главные паропроводы подведены к зданию справа. Энергоблоки №3 и №4 видны справа за линиями электропередачи.

Недавно было завершено продолжавшееся в течение четырех лет коррозионное испытание материалов, из которых была изготовлена конденсационная система. Работа проводилась совместно с фирмой "Интернэйшнл никель". Два набора испытываемых образцов были установлены в двух разных местах, чтобы можно было проанализировать коррозионные эффекты за два и четыре года. Один набор был установлен в зоне конденсации в верхней части конденсатора, а другой был погружен в турбулентный поток около горячей стенки конденсатора. На обоих наборах образцов, извлеченных из системы через два года, был обнаружен осадок, выпавший из конденсата. Коррозия материалов оказалась одинаковой, и в итоге можно было сделать следующие выводы: 1) наименьшему износу подвержены аустенитные нержавеющие стали; 2) сплавы алюминия и хромированные нержавеющие стали слабо подвержены общей коррозии, но подвержены точечной коррозии (во многих образцах появлялись отверстия); 3) сплавы меди, простая (нелегированная) углеродистая сталь и чугун имели существенные потери массы. Испытуемые образцы четырехлетней выдержки недавно были извлечены и сейчас изучаются. Для конденсационной системы планируются дополнительные коррозионные испытания. Материалы для окончательной оценки будут выбраны после полного анализа данных четырехлетнего испытания. Предполагается, что будут испытываться не только состав, но и способы получения материалов, а также влияние термообработки на различные составы.

В нескольких местах рядом со зданием электростанции около одного из блоков были размещены металлоконструкции для испытания на коррозионное воздействие местной атмосферы. Конструкции из различных сплавов алюминия и нержавеющей стали выдерживаются уже в течение года. Планируется проверка в этих условиях различных методов покрытия и дополнительные испытания нескольких других металлов.

Известно, что в Долине Больших Гейзеров существуют бактерии, перерабатывающие серу, но никаких коррозионных повреждений, связанных с их присутствием, не обнаружено. Планируется продолжить исследования с целью изучения возможного влияния этих бактерий.

Главный паропровод, клапаны и фильтры изготовлены из углеродистой стали, которая под действием сухого геотермального пара заметно не корродирует. Турбины являются стандартными агрегатами для работы на паре с низкими температурой и давлением. Однако были приняты специальные меры, чтобы обеспечить безотрывное течение парового потока. Лопатки турбины изготавливаются из стали с содержанием хрома 13%, чтобы свести к минимуму эрозию ло-

патов под действием твердых частиц в паре. В ступенях низкого давления, где в расширяющемся паре увеличивается содержание влаги, применяются обычные методы ее удаления.

При соприкосновении с воздухом пара, сконденсированного в конденсаторе или градирне, некоторое количество сероводорода, окисляясь, превращается в сульфат, который в сочетании с другими химическими соединениями, присутствующими в конденсате, становится чрезвычайно коррозионно-активным. Все смачиваемые части конденсатора, включая его внутреннюю поверхность, и смачиваемые поверхности конденсатных насосов выполняются из аустенитной нержавеющей стали. Корпуса конденсаторов изготовлены из углеродистой стали, армированной аустенитной нержавеющей сталью. Трубопроводы для конденсаторов изготавливаются из аустенитной нержавеющей стали и алюминия.

Градирни имеют стандартную конструкцию, но в них используются специальные материалы. Все смачиваемые металлические части выполнены из нержавеющей стали 304 или алюминия. В тех случаях, когда единственно приемлемым материалом является чугун, он покрывается сверху толстым слоем эпоксидной смолы или другим пластическим материалом. Материалом насадка градирни являются породы красного дерева, полистирол, полипропилен или поливинилхлорид. Из них наиболее предпочтительным является из-за его прочности и невоспламеняемости поливинилхлорид. Все трубопроводы для конденсата и охлаждающей воды выполнены из нержавеющей стали, алюминия или футерованы пластиком. Теплообменники изготавливаются из алюминия или аустенитной нержавеющей стали. Бетонные поверхности, которые находятся в контакте с водой, покрываются составами с эпоксидной смолой или синтетической резиной. В настоящее время в одной из градирен испытываются несколько новых материалов покрытий.

Сероводород, присутствующий в атмосфере станции, создает ряд проблем, связанных с работой электрооборудования, из-за его коррозионной активности по отношению к сплавам меди и серебру. Поэтому линии электропередач и все крепежные узлы выполняются в основном из алюминия. Хотя лужение частично уменьшает коррозию, оно не дает удовлетворительных результатов. Электрические контакты особенно чувствительны к коррозии. Платиновые и золотые вставки, а также платинирование, по-видимому, являются удачным решением проблемы коррозии контактов. В новых энергоблоках наиболее важные электрические реле вынесены в отдельное помещение с незагрязненным воздухом. В этом помещении поддерживается небольшое избыточное давление, а подводимый воздух очищается в фильтрах с активированным древесным углем.

Исследования воздействия на окружающую среду

Небольшое количество сероводорода, содержащегося в паре, частично окисляется во время энергетического цикла, превращаясь в чистую серу и сульфат, однако большая его часть (около 2/3) выбрасывается в атмосферу из градирен, а остаток из газовых эжекторов. Присутствие сероводорода в воздухе не представляет никакой опасности для здоровья человека, однако может создавать неприятный запах и может вызывать коррозию оборудования и материалов. В Долине Больших Гейзеров сероводород выделяется из ряда естественных паровых скважин; исследователи, открывшие Долину Больших Гейзеров в 1847 г., отмечали сильный запах и назвали ручей, пересекающий долину, Биг-Сульфуркрик (Большой серный ручей). Интересно отметить, что если скважина эксплуатируется несколько лет, концентрация сероводорода и других неконденсирующихся газов с течением времени снижается. Это позволяет предположить, что неконденсирующиеся газы собираются в верхних зонах продуктивных слоев и со временем их запасы истощаются. Фирма "Пэсифик гэз энд электрик" ведет исследования с целью разработать метод снижения количества сероводорода, выбрасываемого энергоблоками в атмосферу, но еще слишком рано предсказывать успех.

В энергетическом цикле количество пара, испаряющегося в градирне, составляет 80% количества пара, проходящего через турбину, а остальной пар конденсируется и сбрасывается в виде раствора, содержащего бор, аммиак, бикарбонат, сульфат и тонко измельченную серу. При эксплуатации первых энергоблоков эта вода сбрасывалась в Биг-Сульфуркрик. После пуска энергоблока № 4 количество сбрасываемой воды увеличилось настолько, что содержащиеся в ней химические вещества не могли полностью растворяться в ручье, а ряд химических процессов, которые изучались с целью удаления этих вредных веществ, оказались недопустимо дорогими. Фирмы, добывающие пар, проводили параллельные исследования по закачке сбросовых вод обратно в бассейн через непродуктивные скважины. Это оказалось действенным способом отвода сбросовых вод, который ныне нашел широкое применение.

Эксплуатация

В связи с тем что на электростанции "Большие Гейзеры" нет котлов с обычным для них сложным вспомогательным и регулирующим оборудованием, ее эксплуатация значительно проще эксплуатации обычных электростанций на органическом топливе. В этом смысле геотермальная электростанция больше напоминает гидроэлектростанцию. Она не требует постоянного наблюдения за работой оборудования, и всего шестнадцать человек осуществляют обслуживание и ре-

монт шести энергоблоков. Один или два оператора переходят от блока к блоку в дневную смену и по крайней мере один дежурит вечером и ночью.

Очень важным моментом для нормальной эксплуатации турбогенератора является чистота пара. Опыт последних лет показывает, что для экономичной эксплуатации бассейна и станционного оборудования требуется тесное взаимодействие между потребителями и поставщиками пара. Внезапные изменения в потреблении пара приводят к изменению его расхода из скважин, что вызывает выбросы осколков породы и частиц песка из скважин и возможное засорение ими паропроводов и турбин. Следовательно, пусковой момент, работа под нагрузкой и остановка турбогенератора должны быть согласованы с поставщиками пара, которых нужно предупредить за сутки перед пуском, чтобы они смогли очистить скважины, предварительно открытые в атмосферу, от остатков воды и осколков пород, прогреть систему паропроводов, слить из нее конденсат и довести расход пара до номинального. Опыт показывает, что для получения пара высокого качества требуется определенное механическое оборудование в устье скважины и системе паропроводов (гл. 6).

Каждый раз при подключении скважины фирма "Пэсифик гэз энд электрик" ставится в известность. Поставщиками пара осуществляется постоянный контроль температуры пара и дренаж паропровода с целью установления наличия воды и грязи в паре. При первых признаках загрязнения турбогенератор отключается для предотвращения повреждений. В настоящее время в главном паропроводе вблизи турбин устанавливаются новые системы контроля качества пара. ИзокINETические пробоотборники пара будут извлекать пробы в поперечном сечении главного паропровода. Отобранный пар будет конденсироваться и анализироваться на содержание грязи с использованием нефелометра, который измеряет помутнение по рассеянию света. При работе на постоянном режиме содержание примесей в паре составляет не более 0,0001%, в переходных режимах содержание примесей гораздо выше. Из-за длительных и сложных пусковых процедур геотермальные энергоблоки следует использовать в качестве энергоблоков базовой нагрузки и не использовать в качестве энергоблоков пиковой нагрузки.

Отложение на лопатках турбины пыли может привести к снижению к. п. д. турбины и снижению расхода пара через нее вследствие уменьшения проходного сечения сопла. Еще более серьезная опасность связана с тем, что пыль может накапливаться на бандажах лопаток турбин в таком количестве, что центробежная нагрузка этого осадка ослабит бандажи, в результате чего начнется разрушение лопаток турбины. Осадок, по-видимому, состоит из тонкодисперсных кварцевых частиц, внедренных в основу из стекловидных соединений

бора. Поскольку этот осадок частично растворяется водой, более толстый слой накапливается на ступенях турбины, где давление высокое и пар сухой. В настоящее время на турбинах устанавливается оборудование для промывки водой в надежде на то, что отложения можно будет удалять в процессе работы, т. е. без остановки и капитального ремонта. Сейчас еще рано предсказывать успех такого мероприятия.

Пока еще накапливается опыт по правильному выбору периода эксплуатации между профилактическими ремонтами. Считается, что можно обеспечить непрерывную эксплуатацию в течение более чем 2 лет. Однако еще предстоит определить, в какой степени рассмотренные выше проблемы эксплуатации обусловлены непрерывной работой, а в какой являются следствием неправильной практики пуска. Можно надеяться, что после того как установленный порядок пуска и выхода на нагрузку для энергоблоков просуществует в течение нескольких лет, интервал между профилактическими ремонтами можно будет продлить до 5–6 лет, как это принято на электростанциях, работающих на органическом топливе.

Заключение

Работа электростанции "Большие Гейзеры" доказала ее техническую и экономическую эффективность. Стоимость вырабатываемой ею электроэнергии сравнима со стоимостью производства электроэнергии электростанциями на органическом топливе, принадлежащими той же фирме. Проблемы, связанные с наличием частиц в паре и коррозионной активностью конденсата, могут быть уменьшены с помощью улучшений конструкции, обслуживания и эксплуатации. В настоящее время исследуется возможность уменьшения выделения сероводорода в процессе работы энергоблоков. Фирмой "Пэсифик гэз энд электрик" и поставщиками пара существенно усовершенствованы способы снижения шума.

Планируется ежегодное введение в строй дополнительных мощностей, что сделает уже в 1974 г. электростанцию "Большие Гейзеры" крупнейшей геотермальной электростанцией в мире. Кроме того, планируется введение дополнительных мощностей по мере освоения новых месторождений пара и получения на это разрешения от Комиссии коммунальных услуг шт. Калифорния.

ЛИТЕРАТУРА

1. Allen E. T., Day A. L., Carnegie Institute of Washington, publication No. 378, 1927.
2. Barton D. B., Current status of geothermal power plants at The Geysers, Sonoma County, California, USA, Paper for the United Nations Symposium on the

- Development and Utilization of Geothermal Resources, Pisa, Italy agenda item, IX 18, 1970.
3. Bruce A. W., Experience generating geothermal power at The Geysers power plant, Sonoma County, California, USA Paper for the United Nations Conference on New Sources of Energy, Rome, Italy, agenda item II. A. 2(b), 1961.
 4. Bruce A. W., Albritton B. C., Power from geothermal steam at The Geysers power plant, Paper 2287, J. Power Div., *Proc. Am. Soc. Civil Engineers*, **85**, No. PO 6 (1959).
 5. Finney J. P., The Geysers geothermal power plant, *Chem. Eng. Progr.*, **68**, No. 7, 83 – 86 (1972).

8. ЦИКЛ ПАРОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Дж. Г. Андерсон¹⁾

В течение многих тысячелетий люди знали, что недра Земли горячее, чем ее поверхность. Но только в последние столетия они поняли, что путем передачи тепла от нагретого тела к холодному можно получить механическую энергию. На этом принципе основан тепловой двигатель. Исходя из этих двух принципов, естественно предположить о возможности получения энергии путем передачи тепла из горячих недр Земли к ее более холодной поверхности. Но это уже область геотермики. В недрах Земли содержится достаточное количество тепла для удовлетворения потребностей в энергии в течение миллионов лет при современном мировом уровне ее потребления.

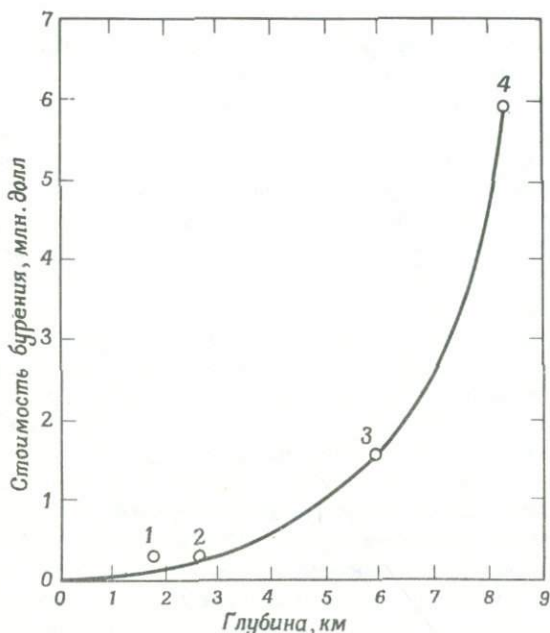
Если использовать только геотермальную энергию, то пройдет около 41 млн. лет, прежде чем температура Земли понизится всего на 0,5°C. Практически проблема сводится к двум основным вопросам: насколько доступны рентабельные источники тепла и как сделать процесс получения геотермальной энергии конкурентоспособным по сравнению с другими процессами получения энергии?

Термический к. п. д. идеальной тепловой машины определяется по формуле

$$\text{к. п. д.} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

где T_1 - абсолютная температура горячего тела (теплодатчика), а T_2 - абсолютная температура холодного тела (теплоприемника). Из этого соотношения ясно, что к. п. д. возрастает с ростом температуры горячего тела. На земном шаре известно много мест, где на глубинах, доступных бурению, существуют достаточно высокие температуры. Однако стоимость бурения зависит от глубины. Например, в Оклахоме на глубине 7350 м были обнаружены температуры 180°C, причем стоимость бурения составила 6 млн. долл. /8/. В

¹⁾ Андерсон Дж. Г. - инженер-консультант, Йорк, шт. Пенсильвания.



Ф и г. 1. Стоимость бурения скважины в зависимости от ее глубины.

1 - Импириал-Валли; 2 - Долина Больших Гейзеров; 3 - Западная Виргиния; 4 - Оклахома.

Импириал-Валли была зарегистрирована температура 200°C в скважине глубиной 780 м, стоимость бурения которой значительно дешевле. На фиг. 1 показан рост стоимости бурения скважин в зависимости от глубины. Хотя цены на бурение весьма различны /2, 4/, они быстро растут с увеличением глубины скважины более 3-4,5 км. Из-за ограничений, налагаемых на производительность размерами и глубиной скважины (гл. 6), вряд ли эксплуатация скважины глубиной более 4,5 км будет выгодной для получения геотермальной энергии. Согласно фиг. 1, бурение скважины на глубину 4,5 км обходится в 800 тыс. долл. Если эта скважина обеспечивает выработку 10 МВт полезной мощности, стоимость каждого киловатта равна 80 долл, что может оказаться нерентабельным. При более высоких дебитах скважины цена киловатта, однако, может понизиться. Таким образом, неглубокие скважины с максимальным дебитом наиболее перспективны для выработки электроэнергии.

Поскольку холодный теплоприемник находится на поверхности земли, а горячее рабочее тело залегает под землей, необходимо най-

ти способы передачи тепла от источника к поверхности, где оно превращается в полезную энергию. И поскольку вода представляет собой самый распространенный и дешевый теплоноситель, то естественно остановить свой выбор именно на ней. Более того, сама природа позаботилась о том, чтобы обеспечить нас этим теплоносителем, создав подземные резервуары горячей воды, нагретые теплом горных пород в различных местах земного шара. В центральных районах США, например, обнаружены тысячи горячих источников.

Существует несколько способов применения воды в качестве теплоносителя.

1. Вода в горячих пористых породах превращается в пар. Пар через скважину выводится на поверхность, где он расширяется в паровой турбине, вырабатывающей электроэнергию. В Долине Больших Гейзеров в Калифорнии подземный бассейн горячей воды перекрыт огромным "чехлом" пара, который запирает вышележащие непроницаемые горные породы. Для создания таких условий давление пара в бассейне должно быть меньше гидростатического. В этом случае пар становится перегретым. Сухой пар со слабой коррозионной активностью может использоваться в обычной паровой турбине. Однако бассейны с низким давлением пара требуют уникальных геологических условий (гл. 4) и природные паровые геотермальные месторождения - явление довольно редкое.

2. Во многих районах холодные подземные воды залегают достаточно высоко над горячей зоной. Эти холодные воды оказывают гидростатическое давление на расположенную под ними сильно перегретую воду. Если пройти скважиной зону холодной воды и снизить давление в скважине, то перегретая вода сможет подняться к поверхности, мгновенно превращаясь в пар. Так как плотность пароводяной смеси ниже плотности воды, смесь поднимается к поверхности. Эта смесь находится при температуре насыщения, соответствующей определенному давлению. Следовательно, температура смеси по мере движения потока к поверхности земли снижается, что приводит к потерям ее энергии. На поверхности пар сепарировается от воды и расширяется в турбине. Но использование пара для подъема воды неэффективно и приводит к большим потерям располагаемой энергии. Кроме того, тепло, которое остается в горячей воде при давлении на входе в турбину, также не используется. Часть этого тепла можно извлечь, испаряя воду при пониженном давлении, но поскольку паровые турбины низкого давления дороги, то общая выгода этого метода часто сомнительна.

Иногда отсепарированный пар настолько коррозионно активен или содержит столь большое количество газов, что его невыгодно использовать в паровой турбине. В таких случаях его можно использовать для испарения воды в теплообменнике и уже затем чистый

пар подавать в турбину. Дополнительный теплообменник удорожает систему и еще больше снижает тепловую энергию пара. В результате стоимость турбины на киловатт мощности также повышается.

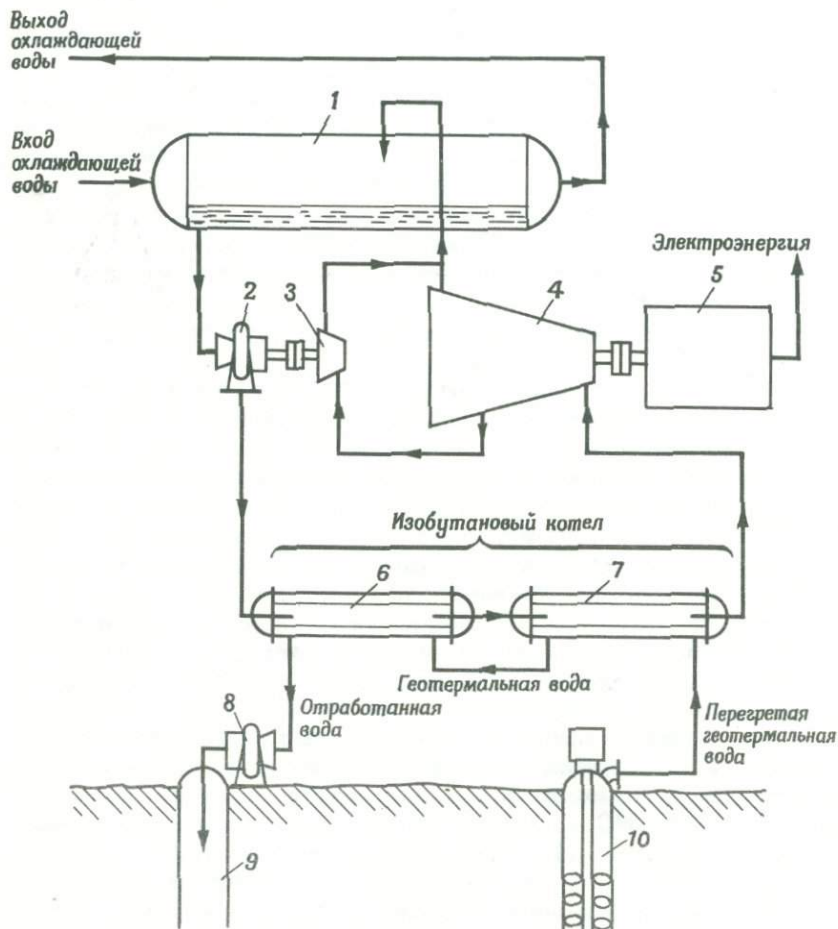
3. С целью устранения описанных выше недостатков был разработан новый паротурбинный цикл, отличный от обычных циклов геотермальных станций. В этом процессе горячая подземная вода поступает к поверхности и проходит через теплообменник, где отдает свое тепло воде, которая превращается в перегретый пар высокой плотности. Затем пар расширяется в турбине, вырабатывающей энергию, и опять возвращается в теплообменник. Преимущества этого процесса, вероятно, достаточны для того, чтобы потенциальные возможности геотермальной энергии сделать реальным достоянием человека.

Упрощенная схема цикла паротурбинной установки представлена на фиг. 2¹⁾. Вода подается на поверхность подземным насосом. В течение всего этого процесса давление поддерживается выше давления насыщенного пара, чтобы не происходило испарения и выделения растворенных в жидкости газов. Горячая вода, проходя через теплообменник, отдает свое тепло, вызывая нагрев, испарение и последующий перегрев вторичного теплоносителя. Охлажденная вода закачивается в соседнюю скважину, унося с собой все растворенные газы и большую часть растворенных солей. Эта вода поддерживает давление в подземном бассейне и, по всей вероятности, возвращается через пористые породы в горячую зону для повторного нагревания. Следовательно, в этом непрерывном цикле вода служит просто носителем тепла от горячих подземных пород к электростанции.

В этом энергетическом цикле могут быть использованы различные вторичные теплоносители. Самым выгодным при температуре воды $\sim 163^{\circ}\text{C}$ (163°C — температура воды на входе первой спроектированной нами станции) является изобутан, вследствие чего дальнейшее рассмотрение основано на этом теплоносителе. В Советском Союзе построена небольшая геотермальная электростанция, работающая на фреоне /7/.

Из фиг. 2 видно, что пары изобутана, расширяясь, вращают ротор турбины, который приводит в действие генератор. Отработанный пар конденсируется в конденсаторе с водяным охлаждением, откуда жидкий изобутан откачивается и подается затем в подогреватель и испаритель для повторения цикла. В связи с тем что для привода питающего насоса требуется значительное количество энергии, предусмотрена вспомогательная изобутановая турбина (фиг. 2).

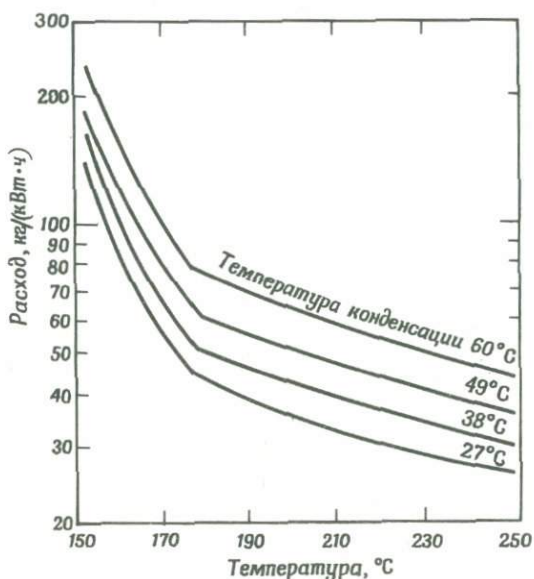
¹⁾ Этот цикл запатентован и получил название "Магмамакс", фирма «Магма энержи», Лос-Анджелес.



Ф и г. 2. Схема цикла паротурбинной установки.

1 – изобутановый конденсатор; 2 – питающий насос; 3 – изобутановая турбина для привода питающего насоса; 4 – основная турбина; 5 – генератор; 6 – секция нагрева жидкого изобутана; 7 – секция испарения и перегрева изобутана; 8 – насос для закачки сбросовой жидкости; 9 – скважина для закачки; 10 – подземный насос.

Для определения оптимальной стоимости электроэнергии необходимо рассчитать большое количество параметров цикла. Общая стоимость электростанции и системы добычи теплоносителя зависит от выбора рабочего тела, температуры и давления на входе в турбину, температуры конденсации, типа охлаждающей системы, глубины скважины и ряда других факторов. Например, при снижении температуры



Ф и г. 3. Расход горячей воды в зависимости от ее температуры для изобутанового цикла.

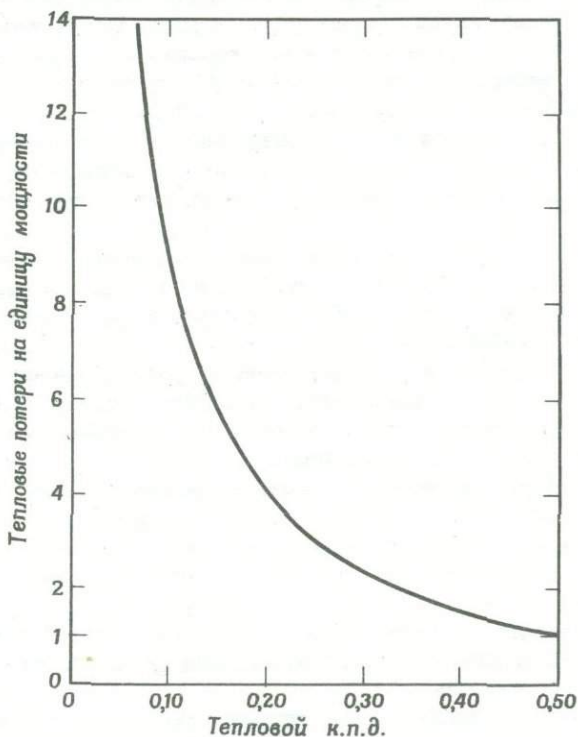
на входе в турбину увеличивается разность температур воды и изобутана, что приводит к уменьшению поверхности, требуемой для передачи данного теплового потока. Однако снижение температуры на входе в турбину вызывает уменьшение к. п. д. цикла и, следовательно, увеличение требуемого количества тепла на 1 кВт·ч выработанной электроэнергии. Для оптимизации стоимости электростанции следует принимать во внимание целый ряд других факторов.

На фиг. 3 представлены типичные расчетные кривые расхода воды на 1 кВт·ч энергии в зависимости от температуры воды в скважине /1/. Заметим, что для определения к. п. д. цикла не менее важной, чем температура подземной воды, является температура конденсации. Например, при температуре подземной воды 204°C и температуре конденсации 38°C требуемый расход воды на 1 кВт·ч электроэнергии равен 41,3 кг. Если температуру конденсации понизить до 27°C, то расход воды снизится до 34,5 кг/(кВт·ч). При температуре конденсации 38°C и том же расходе подземной воды /34,5 кг/(кВт·ч)/ необходимо увеличить ее температуру на 28°C, т. е. до 232°C. Таким образом, наиболее выгодным для геотермальной станции является использование конденсационной системы, рассчитанной на самые низкие, допустимые на поверхности температуры.

Одним из наиболее важных преимуществ использования такой паротурбинной установки является возможность применять более низкие температуры конденсации, чем температуры конденсации, экономически допустимые в пароводяных установках. Габариты любой турбины определяются главным образом диаметром рабочего колеса последней ступени и размером выхлопного патрубка на выходе турбины. Габариты турбины являются также важным фактором, определяющим стоимость. Как диаметр рабочего колеса последней ступени, так и размер выхлопного патрубка определяются объемным расходом потока через турбину. При температуре конденсации 27°C удельный объем водяного пара равен $39,5 \text{ м}^3/\text{кг}$, а удельный объем изобутана равен всего $0,1 \text{ м}^3/\text{кг}$. В связи с этим при низких температурах конденсации изобутановая турбина существенно меньше и дешевле паровой. Удельный объем пара при 38°C равен $21,8 \text{ м}^3/\text{кг}$. Отсюда следует, что площадь проточной части на выходе пароводяной турбины при температуре конденсации 27°C должна быть почти в два раза больше, чем при 38°C .

Хотя расход горячей воды на $1 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ выработанной электроэнергии снижается с ростом ее температуры, совсем не обязательно, что суммарная стоимость электростанции и системы добычи теплоносителя на $1 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ при этом тоже снижается. Для получения более высоких температур требуется более глубокое бурение, которое дорого. Для глубоких скважин требуются также более мощные и более дорогие насосы. Высокотемпературная геотермальная жидкость может быть более коррозионно-активной, в связи с чем потребуются более дорогостоящие материалы для насосов, трубопроводов и теплообменников. По этим причинам следует тщательно анализировать каждый случай, чтобы подобрать наилучший цикл. В этом направлении достигнуты большие успехи, и инженерный анализ по определению оптимального цикла для данной местности можно провести довольно быстро.

Важность проектирования электростанции с высоким тепловым к. п. д. понятна из фиг. 4, где представлен график зависимости неиспользованного тепла от к. п. д. электростанции. Следует обратить внимание на то, что при низком к. п. д. количество неиспользованного тепла резко возрастает. Например, на атомной электростанции с к. п. д. 30% при выработке $1 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ электроэнергии не используется $2,33 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ тепловой энергии. На геотермальной электростанции с к. п. д. 10% при выработке $1 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ электроэнергии не используется уже $9 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ тепловой энергии, т. е. почти в 4 раза больше. Стоимость оборудования для отвода неиспользованного тепла очень велика, и значительно повышает общую стоимость геотермальной электростанции. Проблема осложняется еще и тем, что многие геотермальные месторождения расположены в местах, где



Ф и г. 4. Тепловые потери в зависимости от теплового к. п. д.

недостаточно дешевой воды для охлаждения. Таким образом, одной из наиболее серьезных проблем при создании крупных геотермальных станций является проблема охлаждения.

Цикл паротурбинной установки с использованием изобутана или другого удобного рабочего тела имеет много преимуществ по сравнению с одноконтурным циклом с расширителем или с двухконтурным пароводяным циклом.

1. Горячая вода, которая откачивается из бассейна при давлении выше давления насыщенного пара, имеет температуру, близкую к максимальной температуре бассейна, в то время как при подъеме к поверхности паром жидкость сильно охлаждается.

2. При полном давлении газы, растворенные в воде, можно легко вернуть в бассейн без опасности загрязнения атмосферы.

3. При выделении из воды водяного пара и растворенных газов ее химический состав меняется, и следует ожидать выпадения твердых осадков и закупоривания скважин.

4. Поддержание повышенного давления при пропуске горячей воды через теплообменник позволяет разгрузить трубы теплообменника. Таким образом, уменьшается вероятность коррозии под давлением, часто являющейся основной причиной разрушения теплообменников с горячей водой при высокой температуре.

5. Поскольку паровая турбина (например, изобутановая) состоит из меньшего числа ступеней и объем пара в разных ступенях меняется меньше, такая турбина более экономична, чем турбина на водяном паре.

6. В связи с тем что окружная скорость рабочего колеса в изобутановой турбине меньше, чем в турбине на водяном паре, нагрузка, действующая на лопатки турбины, уменьшается. Это упрощает проектирование турбины.

7. Цикл изобутановой паротурбинной установки относительно бесшумен, тогда как при использовании цикла пароводяной турбины с расширителем требуется принимать меры по снижению шума, что связано с дополнительными расходами.

8. Изобутановые турбины на протяжении всего цикла работают при давлении выше атмосферного, что исключает возможность проникновения в турбину воздуха и кислорода, вызывающих коррозию или образование взрывоопасной смеси. Проникновение воздуха в вакуумированную систему является основной причиной коррозии в системах, использующих в качестве рабочего тела водяной пар.

9. Изобутан и аналогичные рабочие тела являются относительно простыми и недорогими.

10. По размеру изобутановые турбины меньше и, следовательно, дешевле, чем турбины на водяном паре с той же выходной мощностью.

11. Пар изобутана при расширении остается сухим, что исключает эрозию лопаток под действием капель воды, столь обычную в турбинах на водяном паре.

12. Поскольку изобутан совместим с маслами, в турбине могут быть использованы внутренние подшипники, что делает турбину более прочной и более дешевой и позволяет использовать только одно уплотнение вала со стороны соединительной муфты, в то время как для турбин на водяном паре требуются длинные сложные уплотнения вала.

13. В связи с тем что пары изобутана не вызывают коррозии, нет необходимости в дорогостоящих нержавеющих сталях, которые часто требуются для различных частей пароводяной турбины с расширителем.

14. Из-за более низкой плотности сконденсировавшегося изобутана и из-за меньшей скрытой теплоты его парообразования по сравнению с водяным паром в питательном насосе не возникает кавитационных повреждений.

15. В связи с пониженными требованиями по защите от коррозии изобутановый питательный насос может быть изготовлен из более дешевых материалов, чем водяной.

16. Из-за меньшего момента инерции в изобутановой турбине по сравнению с турбиной на водяном паре той же самой мощности проблема крутящего момента на ведомом валу при коротком замыкании фактически снимается.

17. Так как изобутановые турбины могут работать при более низких температурах конденсации, эффективность цикла повышается и расход геотермальной воды снижается по сравнению с турбинами на водяном паре.

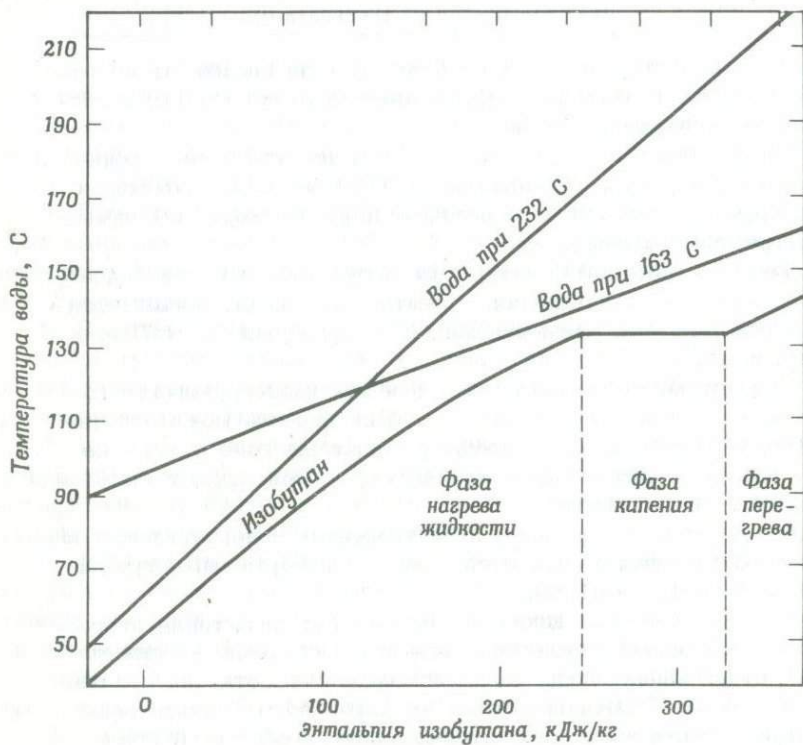
18. Вследствие отсутствия воздуха и неконденсирующихся газов в изобутановых конденсаторах их эффективность может достигать 100%; в пароводяных конденсаторах наличие газа в системе повышает давление, при котором происходит конденсация, и снижает эффективность конденсатора.

19. В турбинах на водяном паре требуется дополнительное оборудование для удаления газов, тогда как для изобутановых турбин такого оборудования не нужно.

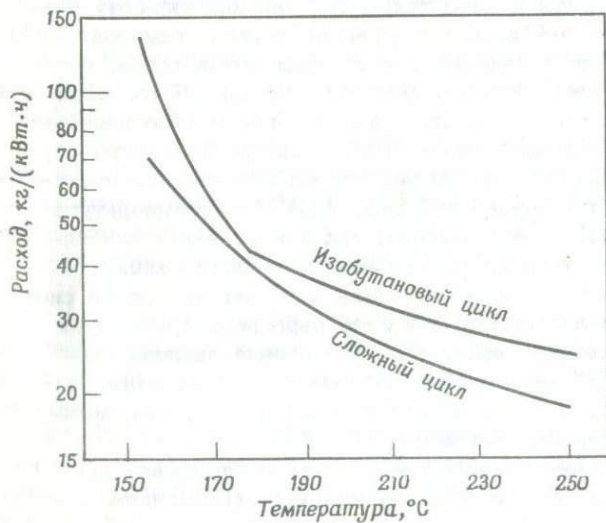
20. При изобутановом цикле эффективная передача тепла от геотермальной воды может осуществляться при достаточно низких температурах: отработанная вода может отводиться от станции при температуре всего 49°C. Использование же пароводяных циклов редко бывает экономически выгодным при температуре сбросовой воды ниже 100°C.

На фиг. 5 представлено соотношение, характеризующее передачу тепла от геотермальной воды к изобутану /1/. Так как скрытая теплота парообразования горячей воды примерно постоянна, температура меняется почти линейно в зависимости от количества тепла, переданного изобутану. Для изобутана скрытая теплота парообразования *не одинакова* в фазе нагрева жидкости, фазе кипения и фазе перегрева /6/. Следовательно, при постоянном отношении расхода горячей воды к расходу изобутана разность температур не может быть постоянной. При температуре геотермальной воды 163°C ее температура на выходе из системы достаточно высока, так как вблизи точки кипения изобутана разность температур становится слишком малой. При температуре воды 232°C разность температур на выходе из системы минимальна, а в фазе кипения и в фазе перегрева существует неоправданно высокая разница температур. Изменение наклона кривой проявляется в виде точки перелома на кривой расхода воды для цикла с изобутаном (фиг.5). Применяя более сложные циклы, можно отчасти снизить расход горячей воды (фиг. 6).

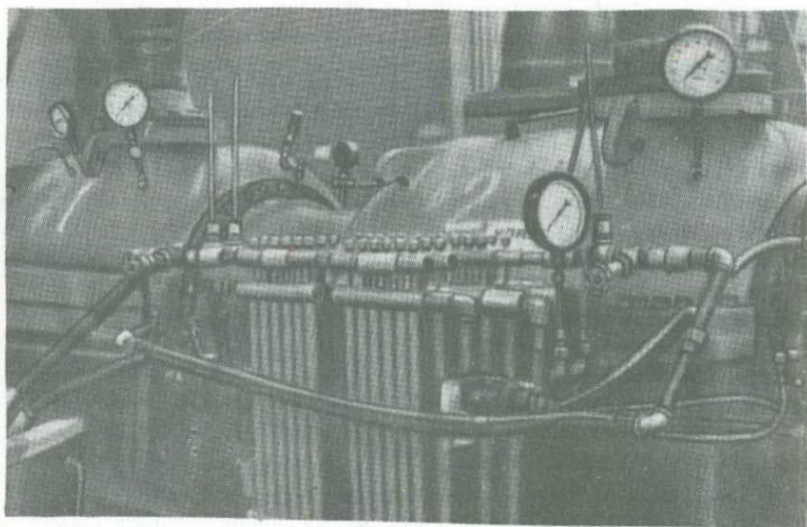
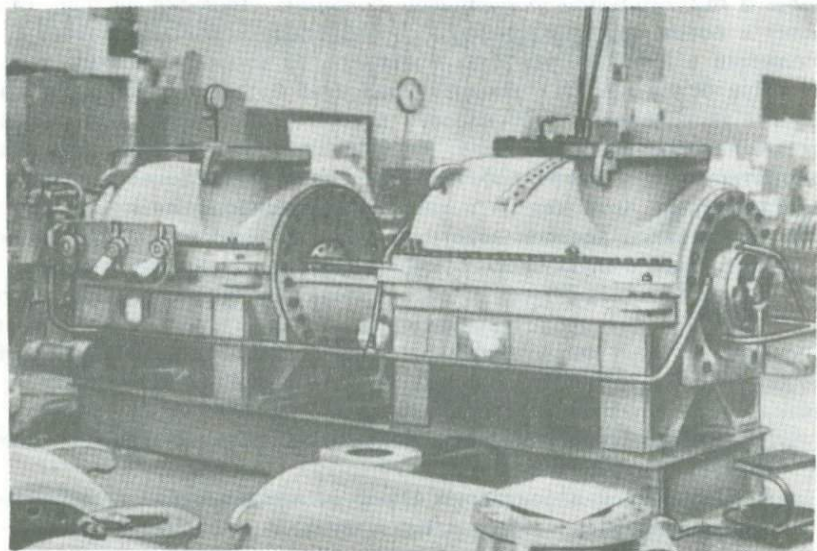
Подъем воды из скважин насосами усложняет и удорожает систему, но их использование с лихвой оправдывается увеличением до-



Ф и г. 5. Температура воды в зависимости от энтальпии изобутана.



Ф и г. 6. Расход горячей воды в зависимости от ее температуры.
Кривая, характеризующая изобутановый цикл, заимствована из фиг. 3.



Ф и г. 7. Изобутановая турбина мощностью 9000 кВт.

бычи и значительным увеличением полезной мощности на одну скважину и всеми другими преимуществами, перечисленными выше. В Исландии с 1961 г. успешно используются насосы ведомого вала /3/.

При более высоких температурах и на больших глубинах желательно использовать турбонасосы, которые меньше по размерам и проще насосов ведомого вала, гораздо легче устанавливаются или демонтируются и могут работать при значительно более высоких температурах. Хотя для их привода требуется большая мощность, чем для привода насосов ведомого вала, но даже эта мощность составляет лишь малую часть общей мощности на выходе системы. Первая изобутановая турбина изготовлена для фирмы "Магма энерджи" (фиг. 7). Это трехступенчатая радиальная турбина с 7000 об/мин. Ожидается, что в зависимости от условий цикла выработанная мощность составит ~9 МВт. Турбина имеет внутренние подшипники и только одно внешнее уплотнение вала, и практически не требует ухода в процессе эксплуатации. Внутренний диаметр корпуса всего 960 мм.

С разработкой эффективных паротурбинных циклов, усовершенствованного насосного оборудования, лучших конструкций теплообменников и более эффективных охлаждающих систем можно будет получать дешевую энергию из многих существующих геотермальных источников.

ЛИТЕРАТУРА

1. Anderson J. H., Geothermal heat, our next major source of power, Paper presented at meeting of the American Institute of Chemical Engineers, 1972.
2. Barnea J., Geothermal power, *Scientific American*, **226**, No. 1 (1972).
3. Bodvarsson G., Private correspondence, Reykjavik, Iceland, 1972.
4. Bowen R. G., Groh E. A., Geothermal-earth's primordial energy, *Technology Review*, 1971.
5. Canjar L. N., Manning F. N., *Thermodynamic properties and reduced correlations for gases*, Gulf Publishing Co., Houston, 1967.
6. *Handbook of Fundamentals*, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, 1967.
7. Moskvicheva V. N. Geopower plant on the Paratun'ka River, USSR Academy of Sciences. Pittsburgh Press, 1971.

9. ПОЛУЧЕНИЕ ПРЕСНОЙ ВОДЫ ИЗ ГИДРОТЕРМ

А. Д. К. Лейрд

Предотвращение прогнозируемой нехватки воды — одна из серьезных проблем во многих районах земного шара. Предлагаются различные пути решения данной проблемы, такие, как подвоз, очистка и опреснение воды. Но все это связано с большими расходами электроэнергии, ресурсы которой также ограничены. Кроме того, возникают дополнительные трудности в связи с загрязнением окружающей среды. Поэтому в последнее время сильно возрос интерес к геотермальной энергии, запасы которой огромны, а использование безвредно. Хотя общие оценки ресурсов геотермальной энергии зависят от исходных предположений (гл. 3), все они свидетельствуют об огромных запасах воды, которую можно получить при использовании этих ресурсов. В настоящее время выработка геотермальной энергии и получение пресной воды осуществляются в относительно небольших масштабах в нескольких районах земного шара, где вода выносит тепловую энергию из геотермальных бассейнов на поверхность (гл. 2). Конденсат на выходе из паровой турбины может использоваться в некоторых случаях в качестве источника пресной воды. Количество пресной воды можно увеличить, используя горячую воду из скважин, обычно содержащую соли. В связи с этим изучается промышленный процесс дистилляции геотермальной вод как часть схемы производства энергии.

В некоторых случаях можно выгодно использовать полученную таким образом электроэнергию для опреснения местной морской воды или воды низкого качества. В таких случаях опреснение воды с помощью мембран предпочтительней дистилляции. В данной главе описываются оба способа опреснения.

В связи с разнообразием типов геотермальных бассейнов возможны различные процессы производства воды. Геотермальные бассейны принято подразделять (гл. 4) на системы с преобладанием

¹⁾ Лейрд А. Д. К. — директор Лаборатории опреснения морской воды и профессор кафедры механики в Калифорнийском университете, Беркли.

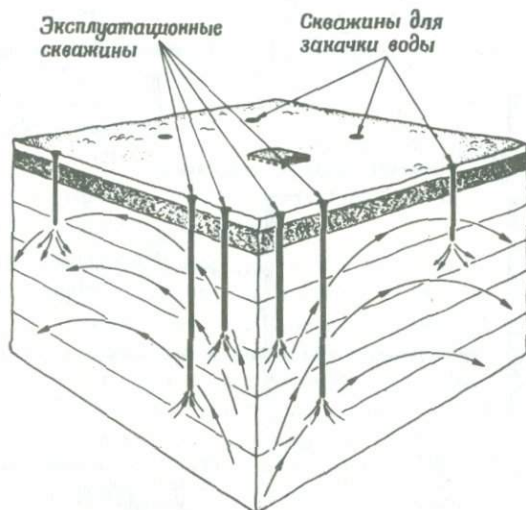
жидкой фазы и системы с преобладанием паровой фазы. С точки зрения производства воды бассейны с преобладанием жидкой фазы представляют наибольший интерес, поскольку они часто содержат большие запасы воды. Бассейны такого типа используются в нескольких местах земного шара (гл. 2). Возможности использования с той же целью бассейнов с преобладанием паровой фазы, таких, как в Долине Больших Гейзеров (гл. 6), весьма ограничены. В дополнение к существующим природным бассейнам имеется много районов с залежами горячих сухих горных пород, которые в будущем можно будет превратить в геотермальные бассейны того или иного типа при условии успешного завершения проводимых в настоящее время исследований. Тип искусственно созданного бассейна будет определяться наличием подходящих источников воды в данной местности и применяемыми методами. Однако в любом случае, если на базе такого бассейна будет организовано производство энергии, станет возможным и производство пресной воды.

Бассейны с преобладанием жидкой фазы, по-видимому, представляют в ряде случаев наибольший интерес. Они наиболее доступны для разработок и обеспечивают возможность выработки энергии, получения воды, регулирования водоснабжения и производства солей. Рассмотренные ниже способы опреснения геотермальных вод относятся главным образом к бассейнам с преобладанием жидкой фазы.

Схема бассейна с преобладанием жидкой фазы

На фиг. 1 показан схематический разрез геотермального бассейна с преобладанием жидкой фазы в виде слоистого блока со стороны в одну миллю. Бассейн перекрыт слоем водонепроницаемых пород. На переднем плане показана ось наиболее горячей части бассейна. Вследствие проницаемости пластов и разной плотности гидротерм, обусловленной градиентами температур, возникает циркуляция воды (гл. 4), моделированная для аналогичной системы в лабораторных условиях Шроком и др. [9]. Благодаря медленной циркуляции горячая вода поднимается к поверхности и может быть выведена эксплуатационными скважинами. Обезвоженные горизонты заполняются более холодной водой, которая закачивается через скважины, расположенные по периферии геотермального поля, и перемешивается под действием естественной конвекции ниже зоны горячих вод. Затем закачанная вода нагревается в горячих горизонтах бассейна и вновь выводится скважинами на поверхность.

Пароводяная смесь из эксплуатационных скважин обычно поступает на электрические и опреснительные станции для выработки электричества и получения пресной воды. Рассол сбрасывается в поверхностные воды или отводится в специальный резервуар для выпаривания или обратной закачки в геотермальный бассейн. Для сохранения

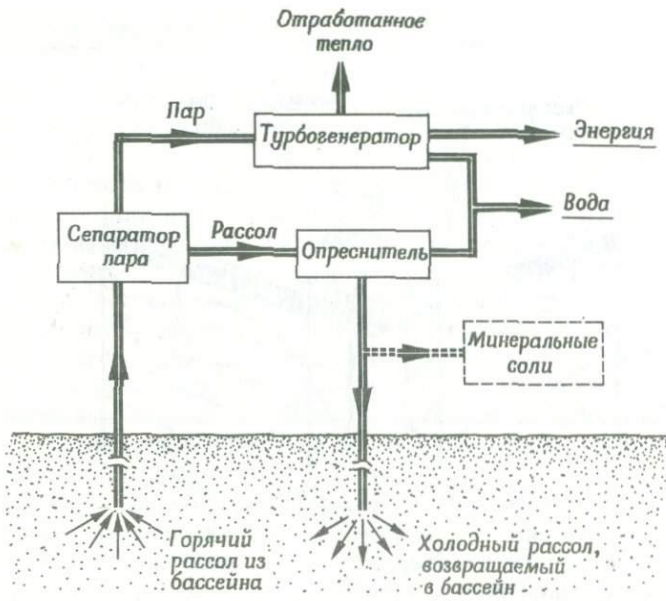


Ф и г. 1. Схема геотермального бассейна.

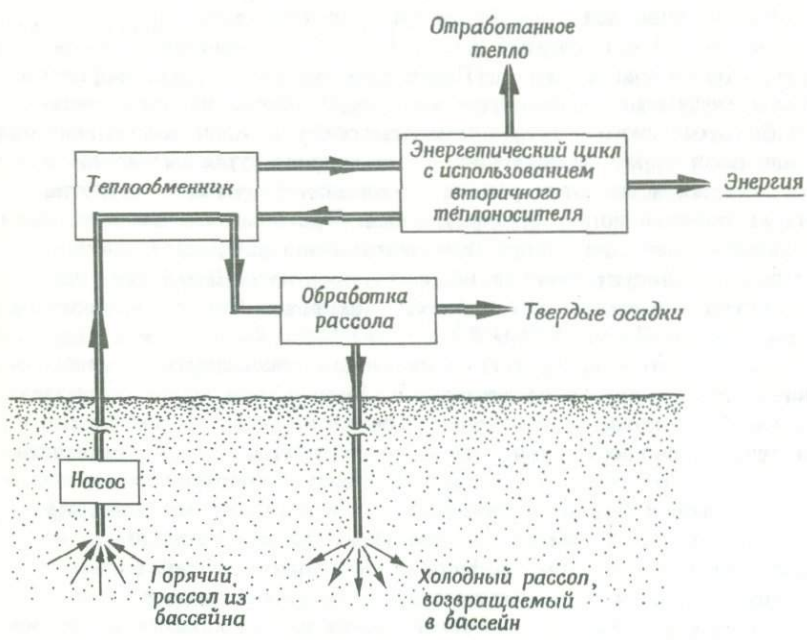
общего водного баланса в системе, возможно, потребуется закачка местной или привозной воды более низкого качества.

В системе с незамкнутым циклом (фиг. 2) пароводяная смесь сепарируется на пар и рассол. Пар используется в турбогенераторе, вырабатывающем электрическую энергию. Неиспользованное тепло может быть отведено в воду или в атмосферу с помощью испарительного или воздушного охлаждения. На выходе из турбины конденсируется пресная вода. Если рассол также используется в качестве источника пресной воды, он опресняется. При комплексном производстве минеральные соли могут быть получены непосредственно или как побочный продукт очистки воды. Система с незамкнутым циклом используется для производства электроэнергии в Новой Зеландии и Мексике (Серро-Прието) (гл. 2).

Однако в некоторых условиях система с незамкнутым циклом обладает определенными недостатками. Если при фазовых переходах происходит нежелательное выпадение солей из рассола, выделение газов или нарушение химического баланса, приводящее к значительной коррозии, предпочтительнее использовать систему с замкнутым циклом, в которой вся жидкость остается в системе, не совершая фазовых переходов. В такой системе (фиг. 3) специальный насос, расположенный в скважине, поддерживает давление, необходимое для предотвращения фазовых переходов при выходе раствора на поверхность, протекании его через теплообменник и возвращении в бассейн. Вторичный теплоноситель используется в качестве рабочего тела в



Ф и г. 2. Схема геотермальной электростанции и опреснительной станции с незамкнутым циклом.



Ф и г. 3. Схема геотермальной электростанции с замкнутым циклом.

турбогенераторе с замкнутым циклом. Как и в системе с незамкнутым циклом, может понадобиться очистка рассола и извлечение из него солей перед закачиванием обратно в бассейн. Пресная вода при этом не производится. Система с замкнутым циклом подробно описана в гл. 8. Здесь будет рассмотрена только система с незамкнутым циклом.

Получение воды и выработка электроэнергии.

Влияние некоторых параметров системы

Для рентабельного получения пресной воды из гидротерм требуется постройка энергетического комплекса, схема которого зависит от характеристик геотермального месторождения. В табл. 1 приведено несколько вариантов схем, которые иллюстрируют влияние различных параметров системы и выбранного процесса. Приведенные значения параметров соответствуют производительности скважины 454 т/ч смеси пара и горячего рассола.

Упрощенная схема установки и термодинамический цикл в диаграмме $T-S$ для варианта 1 представлены на фиг. 4. Принятые точки состояний и вычисленные значения приведены в табл. 2. Смесь пара и горячего рассола поступает в систему из устья скважины (1) и сепарируется на жидкость (2) и пар (7). Затем жидкость проходит через турбину влажного пара, производящую полезную работу, рассол (4) и пар (9). Рассол из турбины частично испаряется при дросселировании в испарителе, сопровождающемся понижением давления и температуры и осуществляемом с целью охлаждения пара, поступающего из турбины, и его конденсации. Полученная смесь (5) сепарируется на поток отработанного рассола (6) и поток пара (10). Пар конденсируется в конденсаторе с воздушным охлаждением для получения пресной воды (11).

Пар из сепаратора (7) поступает в паровую турбину, где производит полезную работу и истекает в виде смеси жидкости и пара (8). Этот поток вместе с паром, выходящим из турбины влажного пара, конденсируется в змеевиках, расположенных в испарителе для получения пресной воды (12).

Почти $\frac{4}{5}$ смеси пара и горячего рассола, поступающей из скважины, превращается в пресную воду. Рассол, который возвращается в бассейн, имеет в 4,7 раза большую концентрацию, чем смесь, извлекаемая из скважины. Расчетная вырабатываемая мощность составляет 17,7 МВт, а количество воды, получаемой при коэффициенте использования станции 90%, т. е. при работе станции в течение 0,9 каждого года, составляет $7720 \text{ м}_\lambda^3/\text{сут.}$, или $2,828 \cdot 10^6 \text{ м}^3/\text{год}$. В связи с тем что полученная пресная вода имеет температуру выше нормальной точки кипения, по-видимому, потребуются ее охлаждение, которое можно осуществить путем испарения, смешения с бо-

Таблица 1

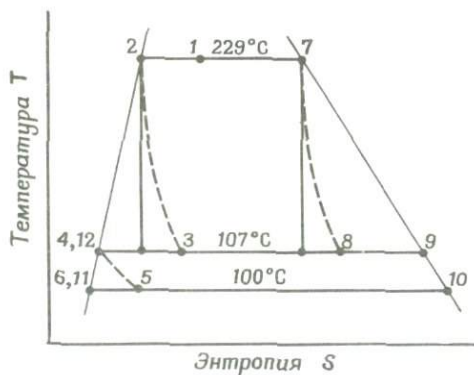
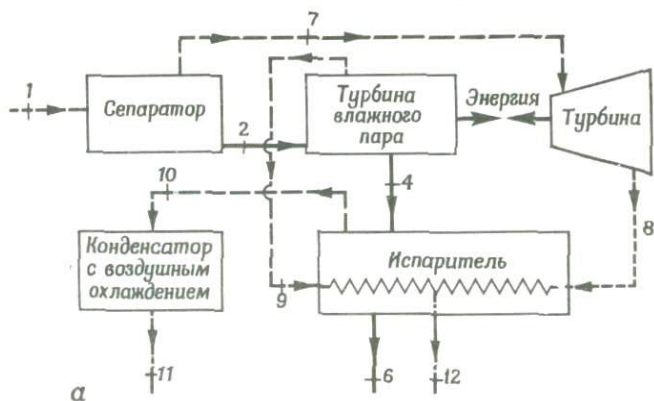
Приближенный расчет производства электроэнергии и получения воды для шести вариантов при различных заданных условиях

| Рабочие параметры | Вариант | | | | | |
|---|---------|-------|-------|-------|-------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Температура бассейна, °С | 316 | 316 | 316 | 316 | 204 | 149 |
| Температура в устье скважины, °С | 229 | 229 | 229 | 229 | 149 | 93 |
| Давление в устье скважины, МН/м ² | 2,75 | 2,75 | 2,75 | 2,75 | 0,46 | 0,08 |
| Минимальная температура, °С | 100 | 71 | 71 | 71 | 71 | 71 |
| Отношение количества пресной воды к количеству смеси, извлекаемой из скважины | 0,79 | 0,83 | 0,79 | 0,87 | 0,83 | 0,26 |
| Производительность опреснительной станции ¹⁾ | | | | | | |
| м ³ /сут. | 7720 | 8140 | 7760 | 8550 | 4280 | 2340 |
| 10 ⁶ м ³ /год | 2,828 | 2,976 | 2,830 | 3,136 | 1,562 | 0,86 |
| Вырабатываемая мощность, МВт | 17,7 | 24,3 | 24,3 | 24,1 | 6,7 | 1,2 |
| Производительность опреснительной станции, ²⁾ % | 95 | 100 | 95 | 105 | 53 | 29 |
| Вырабатываемая мощность, ²⁾ % | 73 | 100 | 100 | 99 | 28 | 5 |

¹⁾ При коэффициенте использования станции 90% и производительности скважин 454 т/ч геотермальной жидкости.

²⁾ По отношению к варианту 2.

лее холодной водой из водосборного резервуара или за счет потерь тепла в распределительной системе. Однако такая высокая конечная температура воды и рассола увеличивает тепловые потери системы, т. е. бесплезный расход геотермальной энергии.



Фиг. 4. Схема геотермальной электростанции и опреснительной станции с незамкнутым циклом (вариант 1).

а — схема установки; б — термодинамический цикл в диаграмме Т-*S*.

— — — — — рассол; - - - - - пар; — — — — — конденсат, - - - - - пароводяная смесь.

Влияние снижения конечной температуры показано в варианте 2, в котором температура на выходе из турбины принимается равной 77°C (вместо 107°C в варианте 1), а температура, при которой происходит сброс тепла, Δ равной 71°C (вместо 100°C). Другие параметры поддерживаются постоянными (табл. 1). Из сопоставления с вариантом 1 видно, что доля горячего рассола, превращаемого в пресную воду, увеличивается с 79 до 83%, количество опресненной воды возрастает от $2,828 \cdot 10^6$ до $2,976 \cdot 10^6$ м³/год, а мощность — примерно на 37% (от 17,7 до 24,3 МВт).

Таблица 2

Точки состояний и расчетные значения параметров для варианта 1

| Точка состояния ¹⁾ | Масса, кг | Давление, МН/м ² | Температура, °С | Энтальпия, кДж/кг | Относительное содержание соли ²⁾ |
|-------------------------------|-----------|-----------------------------|-----------------|-------------------|---|
| 1 | 0,454 | 2,75 | 229 | 1435 | 1,00 |
| 2 | 0,342 | 2,75 | 229 | 986,2 | 1,33 |
| 3 | 0,342 | 0,128 | 107 | 925,7 | 1,33 |
| 4 | 0,268 | 0,128 | 107 | 446,6 | 1,69 |
| 5 | 0,268 | 0,101 | 100 | 446,6 | 1,69 |
| 6 | 0,096 | 0,101 | 100 | 418,7 | 4,72 |
| 7 | 0,112 | 2,75 | 229 | 2802 | 0,00 |
| 8 | 0,112 | 0,128 | 107 | 2388 | 0,00 |
| 9 | 0,073 | 0,128 | 107 | 2688 | 0,00 |
| 10 | 0,173 | 0,101 | 100 | 2686 | 0,00 |
| 11 | 0,173 | 0,101 | 100 | 418,7 | 0,00 |
| 12 | 0,186 | 0,128 | 107 | 446,6 | 0,00 |

¹⁾ Свойства рассола предполагаются такими же, как и у воды.

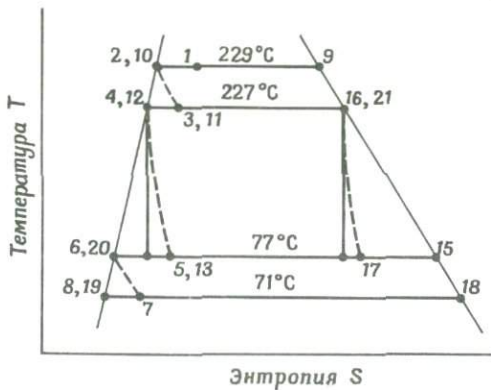
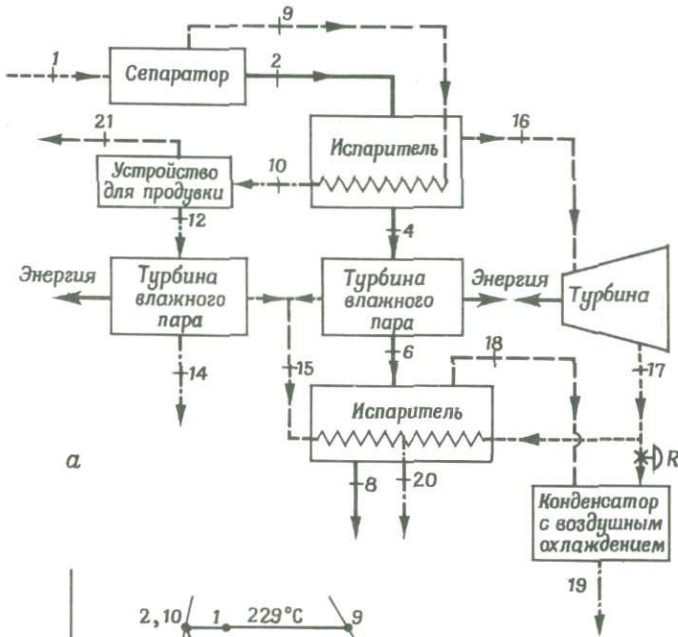
²⁾ Содержание соли относительно точки состояния 1.

Вариант 3 является упрощенным вариантом 2. В этом случае паровая турбина не используется и смесь из скважины (1) поступает непосредственно в турбину влажного пара. Остальные условия остаются прежними. Количество опресненной воды уменьшается на 5% по сравнению с вариантом 2, а мощность остается примерно той же, что и в варианте 2.

Недостаток рассмотренных трех систем заключается в том, что неконденсирующиеся газы проходят через большую часть оборудования и могут вызвать коррозию, если их не удалить на более ранней стадии процесса.

Кроме того, для сбора и удаления вредных газов из-за их большого объема при низком давлении потребовались бы громоздкое оборудование и расходы, превышающие стоимость удаления газа при высоком давлении. Неконденсирующиеся газы при высоком давлении можно удалить, смешивая их с частью жидкости закачиваемой в бассейн; кроме того, удаление неконденсирующихся газов при высоком давлении позволяет отказаться от применения больших вакуумных насосов, которые необходимы, если конденсация происходит при давлении ниже атмосферного.

Эти трудности преодолимы при использовании более сложных систем, которые могут также обеспечить более гибкий режим работы.



6

Ф и г. 5. Схема геотермальной электростанции и опреснительной станции с незамкнутым циклом (вариант 4).

а — схема установки; б — термодинамический цикл в диаграмме Т-S.

— рассол; - - - пар; — · — конденсат; · · · · пароводяная смесь.

Вариант 4 (фиг. 5, табл. 3) является модификацией варианта 2 и отличается от предыдущих вариантов главным образом тем, что неконденсирующиеся вещества удаляются при высоком давлении и обеспечивается перепуск некоторого количества пароводяной смеси из паровой турбины к конденсатору с воздушным охлаждением, по-

Таблица 3

Точки состояний и расчетные значения параметров для варианта 4

| Точка состояния ¹⁾ | Масса, кг | Давление, МН/м ² | Температура, °С | Энтальпия, кДж/кг | Относительное содержание соли ²⁾ |
|-------------------------------|-----------|-----------------------------|-----------------|-------------------|---|
| 1 | 0,454 | 2,75 | 229 | 1435 | 1,00 |
| 2 | 0,342 | 2,75 | 229 | 986,2 | 1,33 |
| 4 | 0,227 | 2,63 | 227 | 974,6 | 2,00 |
| 6 | 0,173 | 0,04 | 77 | 297,7 | 2,63 |
| 8 | 0,566 | 0,033 | 71 | 297,7 | 8,00 |
| 9 | 0,112 | 2,75 | 229 | 2802 | 0,00 |
| 10 | 0,112 | 2,75 | 229 | 986,2 | 0,00 |
| 12 | 0,111 | 2,63 | 227 | 974,6 | 0,00 |
| 14 | 0,085 | 0,04 | 77 | 304,2 | 0,00 |
| 15 | 0,027 | 0,04 | 77 | 2637 | 0,00 |
| 16 | 0,114 | 2,63 | 227 | 2802 | 0,00 |
| 18 | 0,116 | 0,033 | 71 | 2628 | 0,00 |
| 19 | 0,191 | 0,033 | 71 | 2297,7 | 0,00 |
| 20 | 0,121 | 0,04 | 71 | 304,2 | 0,00 |
| 21 | 0,0009 | 2,63 | 227 | 2802 | 0,00 |

1) Свойства рассола предполагаются такими же, как и у воды.

2) Содержание соли относительно точки состояния 1.

зволюющий регулировать долю смеси, извлекаемой из скважин, которая превращается в пресную воду. Чтобы отделить опресненную воду от рассола, требуются две турбины влажного пара.

Поток рассола, поступающий из сепаратора, испаряется в испарителе, переходя из состояния 2 к состоянию 3, и охлаждает пар, подводимый из сепаратора, вызывая его конденсацию и обеспечивая захват неконденсирующихся газов. Рассол из испарителя пропускается через турбину влажного пара и второй испаритель (6, 7 и 8), как в предыдущих случаях. Остаточный рассол (8) упалется.

Пар из сепаратора (9) конденсируется в змеевике первого испарителя и в виде опресненной воды (10) подается в устройство для продувки с целью очистки ее от неконденсирующихся газов. Существует несколько способов удаления неконденсирующихся газов, в процессе которых происходят потери различного количества воды и изменения ее термодинамических параметров. Предполагается, что этот процесс эквивалентен мгновенному испарению жидкости (т. е. переходу из состояния 10 в состояние 11) с последующим удалением вместе с неконденсирующимися газами образовавшегося пара (21).

Оставшуюся воду (12) пропускают через турбину влажного пара, на выходе из которой откачивается пресная вода. Пар (15) проходит через конденсатор, расположенный во втором испарителе (20).

Из первого испарителя (16) пар поступает в паровую турбину, как в первых двух вариантах. С помощью клапана *R* (фиг. 5) регулируется количество вытекающей смеси (17), которая пропускается через конденсатор второго испарителя, где часть рассола испаряется, обеспечивая заданную концентрацию отработанного рассола (8) и регулируя тем самым долю смеси, извлекаемой из скважины, которая превращается в пресную воду (в данном случае $\frac{7}{8}$). Пар, выходящий из второго испарителя (18), конденсируется в конденсаторе с воздушным охлаждением (19) вместе с паром, который поступает через регулирующий клапан *R*.

Расчетная производительность этой системы опреснения воды составляет $\approx 0,87$ л на каждый литр геотермального раствора в интервале температур от 71 до 77°C, или $3,136 \cdot 10^6$ м³/год при производительности скважин 454 т/ч (и коэффициенте использования станции 90%). Увеличение количества опресненной воды по сравнению с вариантом 2 составляет около 5%. Мощность равна 24,1 МВт, т. е. на 1% меньше, чем в варианте 2. Снижение мощности обусловлено главным образом тем, что часть полезной энергии, особенно на выходе паровой турбины, тратится на регулирование содержания соли в остаточном растворе.

Хотя в ряде скважин 16, 71 была получена вода с тем высоким теплосодержанием, какое предполагалось в рассмотренных примерах, по всей вероятности, гораздо чаще вода имеет значительно меньшее теплосодержание, особенно в местах неглубокого залегания. В этом случае выгоднее использовать для выработки электроэнергии системы с вторичным теплоносителем (гл. 8). Однако термодинамическая эффективность рассмотренных выше систем с незамкнутым циклом примерно такая же, как и у систем с вторичным теплоносителем. Влияние более низких температур бассейна и, следовательно, более низкого теплосодержания его вод в устье скважины можно показать еще на двух примерах, которые в остальном аналогичны варианту 3.

В варианте 5 предполагается, что теплосодержание бассейна равно теплосодержанию воды в жидкой фазе при температуре 204°C и что жидкость поступает в систему при температуре 149°C в устье скважины. В варианте 6 соответствующие температуры приняты равными 149 и 93°C. (Рабочие параметры для этих двух вариантов приведены в табл. 1.) Нерентабельность эксплуатации бассейна при таких низких температурах очевидна. Сравнение вариантов 1 и 2 показывает, что невыгодно также сбрасывать тепло при более высоких температурах. Рабочие характеристики таких систем можно

значительно улучшить, если применить охлаждение испарением и значительно снизить минимальную температуру (т.е. понизить линию 10 – 11 на фиг. 4). Из рассмотрения этих примеров нетрудно сделать вывод, что даже при умеренном использовании тепла, выделяющегося при конденсации пара, эффективность процесса получения воды существенно повышается.

Многократная и многоступенчатая дистилляция

Многократная дистилляция, при которой каждое последующее выпаривание происходит при более низкой температуре, чем предыдущее, является одним из самых старых и наиболее эффективных методов опреснения. На современных высокопроизводительных станциях опреснения морской воды этим методом осуществляется от 10 до 25 последовательных процессов выпаривания для получения от 8 до 20 кг воды на каждый килограмм пара, сконденсированного для обеспечения теплом первого процесса. Многократная дистилляция заключается в многократном повторном использовании теплоты конденсации для испарения равного количества геотермальной жидкости при каждом повторном использовании. (Общий обзор методов опреснения приведен в работе /11/.)

Особенно интересное применение этого принципа было предложено недавно в отчете /2/. Установка состоит из испарителя в виде вертикальной трубы, обеспечивающего трехкратное выпаривание и работающего в пределах 15°C относительно температуры в устье скважины, предполагаемой равной 203°C. Предполагается также, что поступающая смесь содержит 20% пара. Первый процесс испарения аналогичен рассмотренному в варианте 4 и сопровождается удалением неконденсирующихся газов. Последующие два процесса испарения отличаются лишь тем, что вследствие очень малого количества неконденсирующихся газов их удаление не производится. Концентрация раствора после третьего испарения в пять раз превышает концентрацию смеси в устье скважины, т. е. опресняется 80% геотермальной жидкости. Производительность установки достигает $\sim 3075 \cdot 10^6$ м³/год при производительности скважин 454 т/ч и коэффициенте использования стаций 90%. Пар после третьего выпаривания поступает в турбогенератор, вырабатывающий ~ 10 МВт полезной мощности. Оба эти параметра сравнимы с соответствующими параметрами варианта 4, если учесть более низкие температуры в устье скважины в рассматриваемом случае.

Другой метод дистилляции, применяемый для опреснения геотермальных рассолов, представляет собой многоступенчатый процесс испарения, при котором горячий рассол пропускается через ряд камер, где давление последовательно понижается. В каждой камере осуществляется один этап процесса. При поступлении рас-

сола в следующую камеру часть его быстро испаряется. Поскольку испарение происходит в течение конечного времени, камера должна иметь длину в несколько футов, чтобы за время протекания рассола вдоль ее нижней части пар успевал выделиться из потока. Внутри камер проложены трубы, по которым течет более холодный рассол в направлении к горячему концу системы камер. Образующийся пар конденсируется на этих трубах. Конденсат стекает в желоб, расположенный под трубами. Образовавшийся дистиллят протекает через камеры подобно горячему рассолу. Пары дистиллята также конденсируются на трубчатом конденсаторе, отдавая новые порции тепла холодному рассолу.

Промышленные установки для опреснения морской воды этим методом состоят из 10–30 и более камер. Неиспользованное тепло обычно сбрасывается в океан. Некоторые преимущества такой системы опреснения морской воды можно использовать при опреснении геотермального рассола. По-видимому, это наиболее совершенный и наиболее распространенный метод опреснения – свыше 90% всех опреснительных установок в мире работает таким способом. Поверхность канала, по которому течет горячий рассол, можно сделать достаточно гладкой, чтобы выпадающие в осадок твердые частицы (например, кремнезем, который часто встречается в геотермальных водах) не накапливались и не снижали производительность установки. Кроме того, образовавшиеся на стенках отложения можно удалять без больших затрат. Процесс многоступенчатого испарения обладает также общим для всех систем опреснения геотермальных вод преимуществом, заключающемся в том, что не требуется дополнительного нагрева геотермального рассола. При опреснении морской воды она должна подогреваться с помощью нагревателя, расположенного между выходным концом трубчатого конденсатора и входом в испарительные камеры. Однако это преимущество геотермальной опреснительной системы является одновременно серьезным недостатком. При опреснении морской воды холодный соляной раствор внутри труб конденсатора нагревается. При опреснении геотермальных вод оказалось невозможным найти подходящий быстрый способ охлаждения конденсатора, с помощью которого можно было бы опреснять достаточно большое количество геотермальной жидкости. Поэтому метод многократной дистилляции, который позволяет опреснить любое количество геотермального рассола, в настоящее время обладает преимуществом по сравнению с методом многоступенчатого испарения. На практике благодаря последним достижениям в теплотехнике метод многократной дистилляции начинает вытеснять метод многоступенчатого испарения даже в случае опреснения морской воды, и последний, видимо, будет использоваться только для подогрева поступающей воды.

В настоящее время на больших опреснительных установках производительностью 18 900 м³/сут. можно получать воду по цене

~0,15 долл за 1000 л. В течение ближайших десяти лет стоимость воды должна уменьшиться вдвое, и, если спрос на опреснительные станции возрастет, к 2000 г. цена может еще раз понизиться вдвое.

Регулирование энергетического баланса

Проблема воды для охлаждения геотермального рассола при дистилляции методом многоступенчатого испарения является частью общей проблемы регулирования баланса энергии, воды и солей геотермальных систем. Тепловой энергией нельзя запастись, но ее можно превратить в электрический, химический или механический виды энергии, которые можно аккумулировать. Однако не вся тепловая энергия, извлеченная из геотермального бассейна, превращается в другие виды энергии — часть ее теряется за счет теплопроводности и излучения в окружающую среду. В одних случаях поступление дополнительного тепла в окружающую среду может оставаться незамеченным, в других — оно может оказывать заметное влияние на окружающую среду и рассматриваться либо как тепловое обогащение, либо как тепловое загрязнение. Однако независимо от нашего к этому отношения любая производственная деятельность, связанная с энергией, приводит к тому, что какая-то часть тепловой энергии обязательно поступает в окружающую среду. Задача утилизации тепла является важной задачей при использовании геотермальных ресурсов.

Количество тепловой энергии, которую можно превратить в химическую просто в процессе получения соли из соляных растворов с помощью некоего идеального процесса (равное примерно 1 кВт·ч на 1000 л опресненной воды), мало по сравнению с тем количеством геотермальной энергии, которое можно превратить в электрическую энергию, вернуть в бассейн вместе с отработанным рассолом или использовать каким-либо другим способом. Например, в варианте 2 количество тепловой энергии геотермального рассола, находящегося при температуре более 27°C, которое превращается в другие виды энергии, распределяется в следующем отношении: 1 (опреснение): 32 (выработка электроэнергии): 5 (возвращение в бассейн): 184 (потери тепла в окружающую среду). Если же охлаждающая вода, имеющая температуру 27°C, нагревается до 71°C (самая низкая температура в варианте 2), а затем возвращается в бассейн вместе с отработанным рассолом для замещения извлеченного из бассейна геотермального рассола, то количество тепловой энергии, превращенной в другие виды энергии, будет распределяться в отношении 1:32:31:150. Такое распределение энергии является типичным для предполагаемых схем геотермальных станций, вырабатывающих электроэнергию и пресную воду. Если производится только пресная вода и не предпринимается никаких попыток для возврата тепловой энергии в бассейн, практически вся геотермальная энергия, извлеченная из недр, сбрасывается.

Возможность передачи электроэнергии на расстояние не только расширяет область использования геотермальной энергии, но позволяет также децентрализовать опреснение воды. Например, на высокопроизводительных станциях по опреснению морской воды для получения 1000 л пресной воды требуется 7,9 кВт·ч энергии. Следовательно, те же 24,3 МВт (вариант 2) дали бы дополнительно $\approx 72\,000$ м³/сут. пресной воды, если бы не потери мощности в процессе передачи. Эта весьма внушительная цифра производства пресной воды может стать еще больше, если наладить также очистку воды с низкими вкусовыми качествами.

Если бы электроэнергия не передавалась на большие расстояния, а потреблялась бы на месте и вырученные суммы использовались бы для покупки пресной воды или средств ее производства там, где это необходимо, то опреснение вдали от геотермального источника было бы более выгодным. Аналогичный обмен возможен между двумя потребителями воды из одной и той же реки, которые хотели бы увеличить водоснабжение в своем районе. Если бы существовала возможность обеспечить лишь одного из потребителей пресной водой, то ему мог бы уступить свои права на пользование водой из реки второй, который за это оплачивал бы производство пресной воды, поставляемой первому.

Процессы децентрализованного опреснения

К основным методам опреснения, основанным на использовании электроэнергии, относятся дистилляция пара под давлением, обратный осмос и электродиализ. Все это хорошо разработанные промышленные процессы, причем каждый из них имеет неоспоримые преимущества при определенных условиях.

Процесс дистилляции пара под давлением основан на том явлении, что увеличение давления водяного пара с помощью компрессора приводит к повышению его температуры. Таким образом создается разность температур, которая может быть использована, чтобы вызвать конденсацию сжатого пара на одной поверхности теплообменника и испарение равного количества воды из геотермального раствора на противоположной поверхности теплообменника. Этот пар подается в компрессор, содержащий в современных конструкциях вертикально-трубчатый испаритель с очень маленьким термическим сопротивлением. При этом разность температур и соответственно разность давлений в поперечном сечении его труб может быть малой и мощность компрессора минимальной. В установках с дистилляцией пара под давлением может быть использован принцип многоступенчатого выпаривания [12]. В больших дистилляционных установках можно использовать метод многоступенчатого испарения для подогрева поступающей воды. Возможны также и другие усовершенствования основного процесса, так что следует ожидать улучшения технологии [3].

Дистилляция под давлением может осуществляться очень экономично, может конкурировать с системами водоснабжения опресненной морской водой малой ($37,8 \text{ м}^3/\text{сут.}$) и средней производительности ($2000 \text{ м}^3/\text{сут.}$) и может быть использована в системах, работающих на достаточно концентрированных рассолах. Однако она неприменима, если геотермальный рассол содержит заметное количество кремнезема или других солей, растворимость которых с понижением температуры уменьшается. Не может она также конкурировать с методами обратного осмоса или электродиализа при опреснении солоноватой воды.

Опреснение методом обратного осмоса или ультрафильтрации осуществляется с помощью мембран. Если перепад давлений на мембране больше, чем осмотическое давление паров над раствором, то вода проходит сквозь мембрану, тогда как большинство солей мембраной задерживается. В связи с тем, что осмотическое давление увеличивается с увеличением перепада концентрации на мембране, с ростом солёности опресняемой воды возрастает и требуемая для процесса дистилляции энергия и соответственно стоимость производства пресной воды.

Существует много удачных вариантов этого процесса, наиболее выгодного для опреснения соленых вод с концентрацией от 0,2 до 0,5%. При таких концентрациях производство воды путем обратного осмоса в два раза дешевле, чем опреснение морской воды методом дистилляции.

Опреснение с помощью электродиализа основано на использовании двух типов мембран, избирательно проницаемых для ионов. Один тип мембран более проницаем для катионов, а другой тип — для анионов. Такие мембраны, расположенные в чередующемся порядке, образуют стенки параллельных каналов, по которым течет рассол. Под действием электрического тока, пропускаемого в поперечном направлении, ионы движутся в разные стороны и проходят через соответствующие мембраны, образующие противоположные стенки канала. Вследствие этого концентрация солей в каждом среднем канале понижается, в то время как в соседних каналах она растет. Каналы делаются достаточно длинными, чтобы обеспечить требуемое снижение концентрации солей в опресненной воде. Величина электрического тока, протекающего поперек каналов, пропорциональна числу переносимых ионов и, следовательно, требуемому снижению концентрации солей. Поэтому для опреснения более концентрированных растворов требуется больше электроэнергии.

Электродиализ является весьма выгодным процессом опреснения солоноватых вод с концентрациями вплоть до 0,3%. Так как концентрация рассола относительно мала, стоимость опреснения методом электродиализа примерно в три раза ниже стоимости опреснения морской воды методом дистилляции.

Регулирование водного баланса

При разработке геотермальных систем следует рассмотреть ряд вопросов, связанных с регулированием местного водного баланса. Поддержание водного баланса геотермальной станции, расположенной на берегу моря или вблизи другого мощного источника воды, в особенности недалеко от потребителей воды, не представляет особой трудности. Однако для бесперебойной работы станции, находящейся вдали от моря, возможно, потребуется проведение ряда мероприятий.

В засушливых районах следует ожидать существования бассейнов с преобладанием жидкой фазы в низинах, где практически отсутствует естественный дренаж, а вода, поступающая в виде атмосферных осадков, испаряется. Для обеспечения длительной эксплуатации геотермального бассейна с большими запасами тепла давление в нем, возможно, понадобится поддерживать путем возврата всей воды обратно в систему. При этом придется отводить тепло в атмосферу при помощи теплообменников с воздушным охлаждением и других методов, не требующих расхода воды.

Если в крупном геотермальном бассейне воды достаточно, а запасы тепла ограничены, то может оказаться выгодным тратить часть воды для отвода тепла путем охлаждения выпариванием. Возможно также использование опресненной воды в ирригационных целях при допустимых пределах просачивания пара и других потерь.

Не следует допускать чрезмерной эксплуатации бассейна, если в результате может возникнуть сильное оседание поверхности из-за усадки слоев, обычно связанной с понижением давления внутри бассейна вследствие отвода термальной воды. Оседание почвы может также вызываться усыханием слоев или доступом к ним воздуха.

Возможными последствиями изменения условий в бассейне могут оказаться землетрясения; это связано с тем, что геотермальные месторождения часто расположены в сейсмических районах. Поддержание постоянного давления в геотермальных бассейнах является одним из способов предотвращения землетрясений (гл. 10).

Для крупных геотермальных систем может быть выгодно привозить воду для поддержания давления и охлаждения. Долина Импириал-Валли на юге Калифорнии служит примером такого геотермального месторождения в засушливом районе, удаленном от моря. Планируемая крупная разработка этого месторождения включает снабжение района реки Колорадо пресной водой в количестве до $3 \cdot 10^9$ т в год [2]. Рекс [8] и другие исследователи предлагают для компенсации воды геотермального бассейна этой долины доставлять морскую воду. Предполагается, что из Калифорнийского залива или с южного берега Калифорнии, отстоящих от долины на расстоянии свыше 160 км, будет доставляться столько морской воды, сколько необходимо для компенсации общего количества раствора, изъятая из бассейна, и для охлаждения.

В производствах средней мощности воду для пополнения бассейна следует изыскивать на месте. Возможными источниками такой воды могут оказаться сточные воды, а также обильные соленые грунтовые воды, имеющиеся во многих районах. Интересная идея использования ирригационно-сточных вод была предложена в отчете /2/, а также Рексом /8/ в связи с планами освоения геотермальных ресурсов долины Импириал-Валли. Это засушливый район, лежащий ниже уровня моря и не имеющий внешнего стока. Сточные воды с ферм пополняют озеро Солтон-Си, которое по существу представляет собой водосток для всей долины /9/. Поступления воды в озеро, составляющие $1,56 \cdot 10^9$ м³/год, уравниваются испарением с поверхности этого озера площадью 932 км². Согласно оценке Рекса /8/, отсюда ежегодно можно отбирать до $1,8 \cdot 10^8$ м³ воды для поддержания давления в геотермальных бассейнах. Это приведет к понижению уровня озера и уменьшению площади его поверхности до величины, при которой уменьшение испарения примерно на 12% сбалансирует уменьшение количества воды в озере¹⁾. Согласно оценкам /2/, из озера Солтон-Си можно будет ежегодно брать $1,53 \times 10^8$ м³ воды для закачивания в геотермальный бассейн и систему охлаждения опытной установки с проектной мощностью 420 МВт и производительностью $1,23 \cdot 10^8$ м³/год пресной воды.

В связи с тем что опресненная вода будет поступать в ирригационную систему долины, отбор воды из озера окажет меньшее влияние на его уровень, чем отвод воды из долины, рекомендованный в проекте крупных разработок /2/.

Регулирование соляного баланса

Использование местных вод для пополнения бассейна важно для регулирования местного соляного баланса, а также избавления от других твердых веществ. Производство пресной воды, повышающее концентрацию солей в рассолах, закачиваемых в гидротермальный бассейн, регулирует соляной баланс района. Другим методом регулирования содержания соли является ее добыча. Экономический эффект, достигаемый сочетанием производства электроэнергии, воды, минеральных солей и, возможно, еще каких-либо промышленных процессов, может сделать всю систему в целом жизнеспособной и принести дополнительные выгоды, тогда как каждое из этих производств в отдельности могло бы оказаться нерентабельным.

Такая ситуация может сложиться в долине Импириал-Валли. Стабилизация содержания соли и уровня озера Солтон-Си, снижение со-

¹⁾ Такая же идея относительно использования воды из озера Севан для гидроэлектростанций оказалась неудачной, и уровень воды в озере начал необратимо падать. — *Прим. ред.*

держания соли в воде, используемой для ирригации, обеспечение охлаждения установок по опреснению геотермальных вод и производству электроэнергии, предотвращение оседания поверхности, увеличение количества воды в реке Колорадо – вот перечень тех выгод, которые можно ожидать от реализации проектируемых разработок геотермальных ресурсов в этой долине. Согласно предварительным оценкам /2/, прибыли от всей системы в целом намного превзойдут затраты.

Предварительные оценки стоимости

Согласно проведенным подсчетам /2/, стоимость пресной воды при производительности $1,23 \cdot 10^8$ м³/год составит от 70 до 105 долл. за 1000 м³ при транспортировке не далее чем на расстоянии 130 км. Стоимость электроэнергии от установки мощностью 420 МВт составит от $3 \cdot 10^{-3}$ до $5 \cdot 10^{-3}$ долл./кВт·ч (без учета ее передачи на расстояние) в зависимости от того, кто будет осуществлять финансирование: федеральное правительство или предприниматели. Капитальные затраты на установку для получения пресной воды составят $\sim 0,172$ долл. за 1 л суточной производительности, что примерно равно стоимости воды, получаемой на установке для опреснения морской воды такой же производительности, работающей по методу многоступенчатого выпаривания (Розарита Бич в Мексике). Стоимость 1 кВт установленной мощности составит ~ 130 долл.

Для крупной разработки в долине Импириал-Валли при производительности $3 \cdot 10^3$ м³ дистиллированной воды, согласно предварительным оценкам, стоимость пресной воды составит 80–120 долл. за 1000 м³, если опресненная вода будет доставляться потребителю на расстояние 160–400 км, а морская вода будет подвозиться с побережья на расстояние 160 км. Для станции мощностью 10 000 МВт стоимость 1 кВт·ч энергии составит от $3 \cdot 10^{-3}$ до $5 \cdot 10^{-3}$ долл. (оценки сделаны исходя из тех же предположений, что и для станции мощностью 420 МВт). Стоимость воды на месте ее производства составит ~ 55 долл. за 1000 м³. По сравнению со стоимостью воды, полученной путем опреснения морской воды на установке производительностью 37 850 – 190 000 м³/сут. с использованием новейшей технологии, это довольно низкая цена.

Если бы приведенные цены на воду стимулировались разницей в $2 \cdot 10^{-3}$ долл. за 1 кВт·ч электроэнергии между ожидаемыми стоимостями, определяемыми федеральным правительством и предпринимателями, то цена каждых 1000 м³ могла бы уменьшиться примерно на 70 долл. Субсидия, основанная на разнице между предполагаемой стоимостью производства и местной стоимостью электроэнергии, составляющей $7 \cdot 10^{-3}$ – $10 \cdot 10^{-3}$ долл./кВт·ч, могла бы при-

вести к тому, что доставка воды потребителю оказалась бы оплаченной за счет потребителей электроэнергии и общественных фондов.

Маловероятно, чтобы какая-либо система опреснения воды могла конкурировать с крупными системами водоснабжения хорошей водой из соседней реки по цене, определяемой только затратами на ее подачу. Однако применение некоторых методов очистки и улучшения качества воды, которая иначе не пригодна к использованию (сточные воды, растворы грунтовых вод, морская вода), уже сегодня несомненно, выгоднее транспортировки воды на большие расстояния. В течение ближайших десятилетий стоимость опреснения воды, вероятно, снизится в 3-4 раза. Следовательно, во многих районах опреснение станет самым экономичным способом водоснабжения. Развитие систем опреснения может быть ограничено лишь недостатком электроэнергии и капитала, необходимого для строительства опреснительных установок. Однако разработка геотермальных ресурсов разрешит проблему обеспечения опреснительных установок необходимой электроэнергией, а дальнейший рост экономики страны обеспечит финансовую основу для развития крупных опреснительных систем водоснабжения. Опреснение геотермальных вод весьма перспективно и должно в значительной мере содействовать в будущем развитию водного хозяйства.

В связи с усовершенствованием технологии и разрешением общих проблем /1, 3/ стоимость разработок геотермальных месторождений будет снижаться и применение геотермальных станций для производства воды и электроэнергии будет все более рентабельным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Anderson D. N., Axtell L. H., compilers, El Centro Conference, Geothermal Resources Council, Davis, California, 1972.
2. Bureau of Reclamation, U. S. Department of the Interior, Geothermal resource investigations, Imperial Valley, California, 1972.
3. Laird A. D. K., Desalting technology, in D. Seckler, ed., California water, A study in resource management, Berkeley, University of California Press, 1971, pp. 127 - 160.
4. Zaird A. D. K., Ranking research problems in geothermal development, U. S. Department of the Interior, Office of Saline Water Research and Development, Progress Report 711, Washington, D. C., U. S. Govt. Printing Office, 1971.
5. Residencia de Obras Geotermicas del Valle de Mexicali, Campo geotermico, Cerro Prieto, B. C. (Table 1), 1968.
6. Resources Agency, Compendium of papers, Imperial Valley: Salton Sea Area, Section Y. Geothermal Hearing, Sacramento, California, October 1970.
7. Rex R. W., Investigation of geothermal resources in the Imperial Valley and their potential value for desalination of water and electricity production, Insti-

- tute of Geophysics and Planetary Physics, University of California, Riverside, 1970.
8. "Salton Sea Project, California", Federal-State Reconnaissance Report, U. S. Department of the Interior and The Resources Agency of California, 1969.
 9. Schrock, V. E., Fernandez R. T., Kesavan, K., Heat transfer from cylinders embedded in a liquid-filled porous medium, Paper CT 3.6 4 th International Heat Transfer Conference, Paris-Versailles, in Heat transfer 1970, Amsterdam, Elsevier, 1970.
 10. Spiegler, K. S., ed., Principles of Desalination, New York, Academic Press, 1966.
 11. Tleimat B. W., Novel approach to desalination by vapor compression distillation, ASME Publication 69-WA/PID-1, Amer. Soc. Mech. Engineers Annual Meeting, 1969.

10. ВЛИЯНИЕ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ РАЗРАБОТОК НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Р. Дж. Боуэн¹⁾

В Соединенных Штатах, где около 6% населения земного шара используют 35% вырабатываемой во всем мире энергии, все чаще ставится под сомнение, оправдан ли в действительности такой большой расход невозполнимых энергетических ресурсов. Хотя запрет использования органического или ядерного топлива привел бы к катастрофическим последствиям, столь же катастрофическим может оказаться расходование энергетических ресурсов с намеченными темпами, требующими удвоения выработки электроэнергии каждые 10 лет.

По вопросу об использовании энергетических ресурсов в настоящее время существуют два противоположных мнения. Одни составляют свои планы в предположении постоянного роста выработки и потребления электроэнергии, в то время как другие утверждают, что мы стоим на грани катастрофы и что увеличение выработки электроэнергии обойдется человечеству очень дорого. Споры идут между сторонниками и противниками различных методов производства электроэнергии, причем каждая из сторон считает свой метод "самым безвредным". Поскольку в глазах общественности собственно электростанции занимают центральное место в энергетическом цикле, полемика сконцентрировалась исключительно вокруг них, почти не затронув другие этапы топливного цикла, хотя некоторые из них оказывают значительное влияние на окружающую среду. Чтобы вынести правильное заключение о воздействии на окружающую среду различных методов производства электроэнергии, необходимо взглянуть на проблему шире и рассмотреть весь топливный цикл.

Геотермальная электростанция является уникальной в том смысле, что все элементы топливного цикла локализованы в месте расположения станции. Противоположной ей в этом смысле является электростанция с ядерным реактором, в которой собственно оборо-

¹⁾ Боуэн Р. Дж. — геолог-экономист Департамента геологии и добычи полезных ископаемых, шт. Орегон, Портленд.

дование для производства электроэнергии составляет малую часть сложной промышленной системы обеспечения каждого реактора "топливом". Промежуточное положение по сложности занимают станции, работающие на органическом топливе, особенности цикла которых зависят от вида топлива. Таким образом, во всех случаях, за исключением геотермальной станции, влияние топливного цикла на окружающую среду распространяется далеко за пределы электростанции.

Характеристики производства геотермальной энергии

Как и другие тепловые электростанции, геотермальная станция получает и использует пар, который расширяется в турбине и конденсируется на выходе из нее. Геотермальная станция отличается от станций на обычном топливе и атомных станций методом получения пара и его качеством. На геотермальных станциях пар вырабатывается в природном "котле" при естественной циркуляции воды, омывающей горячие горные породы, залегающие глубоко под землей. В зависимости от конкретных условий теплоноситель может поступать либо в виде слабо перегретого сухого пара, либо в виде горячей воды под давлением. Это в свою очередь определяет метод эксплуатации бассейна и потенциальное воздействие этого производства на окружающую среду.

Самым удобным и наиболее рентабельным типом геотермального месторождения при существующем уровне техники является геотермальное поле сухого пара. Единственным примером такого месторождения в США является Долина Больших Гейзеров в Калифорнии. Однако в настоящее время создаются проекты разработки месторождений в других частях страны, которые относятся к более распространенному типу месторождений с преобладанием горячей воды. В связи с этим необходимо исследовать влияние различных энергетических циклов на окружающую среду.

Сухой пар и горячая вода в качестве теплоносителей отличаются главным образом расходом, необходимым для выработки данного количества электроэнергии. На электростанции в Долине Больших Гейзеров для выработки 1 кВт·ч электроэнергии требуется ~9 кг пара. Вся продукция скважины геотермального месторождения сухого пара может быть использована в энергетическом цикле: из 9 кг примерно 6,8 кг испаряется в охлаждающей системе, а 2,2 кг возвращается в бассейн. Единственным воздействием такой геотермальной системы на окружающую среду, если не считать, что ее расположение в данной местности может испортить вид окружающего ландшафта, состоит в выделении в атмосферу весьма умеренного количества неконденсирующихся газов, которые захватываются потоком пара. Ниже будут подробнее рассмотрены химический состав и количество этих газов.

Существуют два возможных метода извлечения энергии из месторождений с горячей водой. Один из них основан на испарении воды при снижении давления и последующем использовании полученного водяного пара таким же путем, как и сухого пара. Этот метод успешно используется в Новой Зеландии и в Мексике. В цикле с паротурбинной установкой (гл. 8) используются теплообменники и вторичный контур с турбиной.

Из-за более низкой энтальпии горячей воды в обоих методах для выработки 1 кВт·ч электроэнергии требуется вывести на поверхность гораздо больше пароводяной смеси, чем сухого пара. Конкретная величина зависит от температуры воды и давления, при котором происходит вскипание воды, но на практике, как правило, она заключена в пределах 34–68 кг на 1 кВт·ч вырабатываемой электроэнергии [7]. При применении простого метода испарения с использованием конденсата для охлаждения на выработку 1 кВт·ч электроэнергии требуется 27–61 кг пароводяной смеси. Это можно осуществить различными способами, но в Соединенных Штатах, по-видимому, наиболее желательно закачивать конденсат обратно в бассейн. Паротурбинный цикл требует меньшего количества воды на выработку 1 кВт·ч электроэнергии, чем метод испарения, но при этом в бассейн не возвращается использованная геотермальная жидкость, поскольку она не конденсируется.

За исключением способа возвращения воды в геотермальный бассейн как простой цикл с испарением, так и паротурбинный цикл оказались удачными по своей основной идее. Проблема, связанная с возвратом жидкости в бассейн, заключается в том, что большинство горячих геотермальных вод содержит растворенные соли, которые при понижении давления и температуры могут выпадать в осадок, что в свою очередь может привести к уменьшению пористости или закупориванию трещин бассейна. В результате может уменьшиться проницаемость породы и возможность бассейна принимать в дальнейшем закачиваемую жидкость, что неизбежно снизит его производительность. В месторождениях с сухим паром, где поступающий пар практически не содержит примесей, закачка практикуется весьма успешно. В этом случае закачиваемый конденсат является по существу дистиллированной водой и содержит соли с концентрацией всего несколько десятитысячных процента.

Преимущество паротурбинного цикла заключается в том, что в этом случае не нужно освобождаться от неконденсирующихся газов, так как геотермальная жидкость находится под давлением и не может расширяться в любой момент времени. Вследствие отсутствия процесса расширения уровень шума на площадке гораздо ниже, чем в случае системы с испарением горячей воды, где на стадии испытаний уровень шума может быть весьма высоким (хотя в процессе

налаженного производства шумы незначительны). Недостаток паротурбинного цикла связан с потребностью в дополнительном источнике охлаждающей воды, поскольку в этом цикле не образуется конденсата.

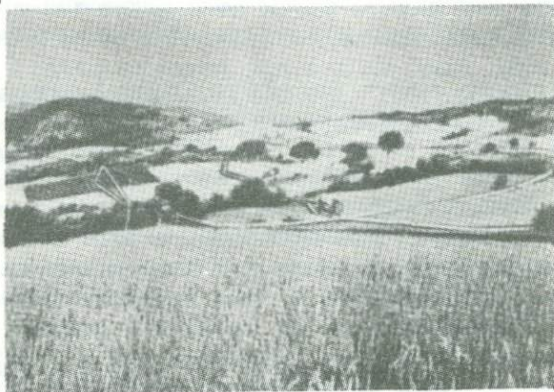
Чтобы правильно оценить влияние выработки электроэнергии на геотермальных станциях на окружающую среду, необходимо понять основной характер различных проявлений этого влияния и сравнить его с влиянием других теплоэнергетических циклов, связанных с использованием ядерного и органического топлив, поскольку каждый из них вызывает определенные изменения в окружающей среде и в первую очередь на земле, в воздухе и воде.

Влияние на землю

Природный пар добывается бурением скважин до глубин 300 – 2700 м, т. е. до глубин, на которых расположены достаточные мощные геотермальные формации. Аналогичным образом добывается природный газ. Пар под действием собственного давления поднимается к поверхности, где собирается в теплоизолированные трубопроводы и по ним подается к турбинам. В Долине Больших Гейзеров, где производительность каждой скважины обеспечивает в среднем выработку 7 МВт полезной мощности, для работы электростанции мощностью 1000 МВт требуется 150 скважин, которые занимают площадь ~19 км². Кроме того, для обеспечения нормальной работы станции необходимо выделить дополнительную площадь для разбуривания новых скважин по мере снижения производительности существующих (гл. 6).

Скважины, трубопроводы и электростанции, расположенные на продуктивном геотермальном поле, таком, как в Долине Больших Гейзеров, изменяют местный ландшафт. Это вызывает одно из основных возражений защитников окружающей среды против развития геотермальных ресурсов. Однако разработка геотермального бассейна необязательно оказывает отрицательное влияние на окружающую среду. Геотермальное месторождение Лардерелло в Италии, разрабатываемое и эксплуатируемое в течение 60 лет, является примером того, что использование геотермальных ресурсов совместимо с использованием земли для других целей. Поскольку скважины, паропроводы и электростанция занимают лишь небольшие участки и полосы поля, большая часть земли используется для различных сельскохозяйственных целей, под фермы, виноградники и фруктовые сады, расположенные среди паропроводов и скважин (фиг. 1 и 2).

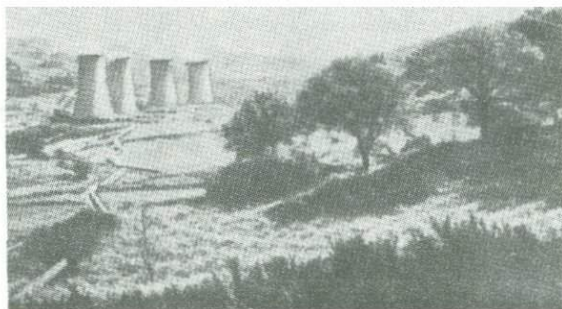
Другим примером многообразного использования геотермального месторождения является Долина Больших Гейзеров (фиг. 3). До использования этого района в качестве источника энергии Долина Больших Гейзеров была дикой местностью. Большая часть земли находи-



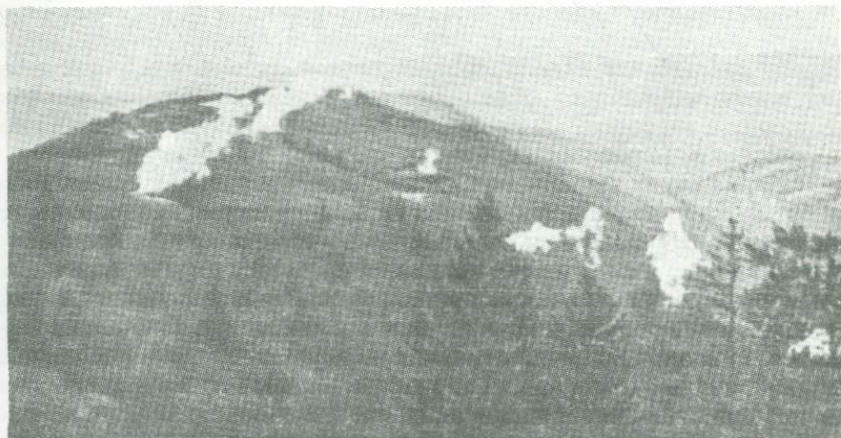
Фиг. 1. Геотермальное месторождение Лардерелло в Италии с паропроводами на переднем плане (фото Клейн, Бюро разработок полезных ископаемых, США).

лась во владении частных охотничьих клубов и служила пастбищем для оленей. Наряду с использованием этой долины под пастбище для рогатого скота она и теперь используется как охотничьи угодья.

Влияние строительства скважин, паропроводов и электростанций наиболее ощутимо в период разработки, а для больших месторождений этот период может растянуться на несколько лет. Буровые работы, производимые при разработке геотермального месторождения, создают такой же шум, как любые строительные работы, и носят такой же временный характер. Шум создается как самим процессом бурения, так и выбросом пара при проведении испытаний скважины. В процессе эксплуатации уровень шума не выше, чем на электростанциях другого типа. Бурение скважин, производящих сухой пар, проводится по специальной технологии; в настоящее время при разбуривании продуктивной зоны для создания циркулирующего потока, выносящего шлам из скважины, используется воздух, а не буровой раствор. При этом скважина продувается в процессе прохождения продуктивной зоны, который занимает лишь несколько дней из общего времени бурения. Такой способ не представляет опасности, поскольку давление в бассейне относительно низкое и выброс пара можно подавать в любой момент, закачивая в скважину воду. Когда скважина закончена, необходимо продуть ее снова, чтобы удалить накопленную пыль и обломки породы. Это составляет период очистки скважины, и до тех пор, пока он не закончен, уровень шума превышает норму. Глушители, которые используются в настоящее время в Долине Больших Гейзеров в период бурения и испытаний, значительно



Фиг. 2. Электростанция Лардерелло с паропроводами, проложенными через фруктовый сад на переднем плане. На этом месте электроэнергия производится в течение 60 лет при минимальном воздействии на окружающую среду (фото Клейн, Бюро разработок полезных ископаемых, США).



Фиг. 3. Месторождение Долины Больших Гейзеров в гористой местности на севере графства Сонома, шт. Калифорния.

Блок 4 на вершине слева не действует. Видны султаны пара; скважины, из которых они поднимаются, остаются открытыми до присоединения их к системе. В настоящее время система эксплуатируется и пар поднимается не из земли, а из градирен.

снижают шум, а новые технические усовершенствования обещают дальнейшее снижение уровня шума.

Следующими потенциальными последствиями геотермальных работ являются оседание почвы и сейсмические эффекты. Возможность такой двойной опасности для окружающей среды рассматривается в документе, выпущенном министерством внутренних дел в связи с составлением геотермальной программы /18/ и клубом "Сьерра клуб". Однако ни в месторождении Лардерелло, где пар добывается уже на протяжении 60 лет и в последние 30 лет в довольно крупном масштабе, ни в месторождении Долины Больших Гейзеров, которое эксплуатируется в течение 12 лет, не наблюдалось ни оседания почвы, ни землетрясения. Хотя эти явления отмечались в определенных условиях в некоторых нефтяных месторождениях, нет оснований связывать их с геотермальными месторождениями сухого пара, характеризующимися совершенно другими геологическими условиями. Однако в месторождениях с горячей водой, как мы увидим ниже, такая проблема может возникнуть.

Оседание возможно всюду, где нижележащие слои перестают поддерживать верхние слои почвы. Оно наблюдается при добыче нефти, угля и откачке подземных вод. В большинстве случаев, когда оседание вызвано удалением грунтовых вод, откачивание осуществляется с относительно небольшой глубины. В нефтяных месторождениях жидкость удаляется с большей глубины, и оседание почвы происходит лишь в определенных условиях, например если откачиваемая жидкость находится под давлением, превышающим нормальное давление в бассейне. В таких условиях возникают месторождения с повышенным давлением, в которых жидкость служит опорой для расположенного выше столба горной породы. Удаление этой опоры может привести к оседанию, чего можно избежать, если откачиваемую нефть возмещать водой, закачиваемой по периферии месторождения. Вследствие особенностей геологии геотермальных месторождений сухого пара в них не ожидается оседания почвы. Продуктивная зона такого месторождения состоит из трещиноватой породы, каналов или другого рода проницаемых полостей, заполненных паром, который, вероятно, поступает из более глубоко расположенного бассейна с горячей водой. Такое месторождение обладает почти постоянным давлением пара по вертикальному разрезу бассейна. В Долине Больших Гейзеров и в других месторождениях сухого пара наблюдаются примерно одинаковые температура пара ($\sim 240^\circ\text{C}$) и давление ($\sim 3,4 \text{ МН/м}^2$). В работе /22/ рассматривается термодинамика бассейна, которая объясняет это явление. Почти постоянное давление, даже на глубинах, больших 2500 м, где гидростатическое давление обычно составляет $\sim 27 \text{ МН/м}^2$, свидетельствует о том, что в месторождениях сухого пара вмещающие породы обладают достаточной прочностью и не должны оседать в результате удаления пара.

Бассейны с горячей водой, возможно, ведут себя подобно непрочному нефтяному бассейну, и если в них не поддерживать давление закачкой раствора, можно ожидать оседания почвы. Действительно, это наблюдалось в Уайракей (Новая Зеландия) /8/, где вода не возвращается в бассейн. На основе накопленной информации об оседании почвы в ходе эксплуатации нефтяных бассейнов можно стабилизировать породы любого геотермального месторождения, где будет возникать проблема оседания.

Рассматривая вопрос о возможных сейсмических последствиях разработки геотермальных ресурсов, необходимо учитывать, что геотермальные аномалии, разломы и землетрясения связаны с районами неустойчивости земной коры и, следовательно, географически тяготеют друг к другу. Действительно, наличие высокой сейсмической активности является одним из признаков возможной близости геотермальных месторождений, который используется при поисках геотермальных ресурсов /4/. Однако интенсивность землетрясений в зоне термальных явлений, вызванных вулканической деятельностью, обычно значительно меньше интенсивности землетрясений, вызванных крупными смещениями земной коры по разломам /19/. Многие еще предстоит узнать о взаимодействии термических и сейсмических явлений, причем бурение и эксплуатация геотермальных полей должны дать новую информацию в этой области. Однако нет никаких оснований считать, что разработка геотермальных ресурсов увеличила сейсмическую активность какого-либо района.

Беспокойство по поводу возможной сейсмической опасности частично возникает в связи с процессом закачки отработанной геотермальной жидкости. В случаях сейсмической активности, вызванной закачкой отходов производства /5/ или обусловленной затоплением водой истощенных нефтяных бассейнов /14, 15/, закачка приводит к превышению давлений, превышающих гидростатическое. В таких условиях поступающий раствор мог вскрывать и смазывать существовавшие ранее трещины и зоны наименьшего сопротивления или расширять систему трещин, тем самым вызывая повышенную сейсмическую активность и возможные структурные нарушения. Однако геотермальные бассейны находятся при давлении ниже нормального, и восполняющая жидкость лишь поддерживает давление в бассейне на прежнем уровне и не может быть причиной увеличения сейсмической активности, наблюдаемой при других условиях. Существующее в геотермальных бассейнах низкое давление двояким образом облегчает закачку: во-первых, поскольку оно ниже гидростатического, вес воды создает напор, достаточный для ее ввода в бассейн самотеком; во-вторых, вода устремляется в область наименьшего давления в бассейне и тем самым сводит к минимуму возможность утечки геотермальной жидкости в другие водоносные слои.

Для сравнения влияния геотермальных разработок на окружающую местность с влиянием топливных циклов на основе ядерного или органического топлива нужно последовательно рассмотреть все этапы производства. Прежде чем попасть в реактор, ядерное топливо проходит стадию добычи руды, ее дробления, очистки, обогащения, превращения и изготовления ядерных топливных элементов. В течение 30 лет активной работы реактор мощностью 1000 МВт потребляет ~1000 т обогащенного урана /21/. С учетом коэффициента обогащения количества руды, потребляемой современными ядерными реакторами, охлаждаемыми водой под высоким давлением, составляет 6000 т природного урана. Исходя из качества урановой руды, которая добывается в настоящее время в США, при проектировании разработок бассейнов предполагается, что каждая тонна руды дает 1,816 кг урана, однако можно ожидать, что с течением времени качество руды ухудшится и эта цифра сократится, вероятно, до ~1,4 кг. Это значит, что в течение срока службы атомной электростанции потребуется 4 млн. т руды, или в среднем 133 333 т/год.

По данным Комиссии по атомной энергии США /16/, уранодобывающая промышленность в настоящее время располагает более 76 000 км² земель, занятых производственными и поисковыми шахтами. Хотя это не означает выемку грунта на всей территории, извлечение планируемого количества урана наносит существенный ущерб окружающей местности.

То же можно сказать о процессе дробления урановой руды. Многие миллионы тонн раздробленной в США на сегодняшний день руды до сих пор остаются лежать вокруг дробилен. Эти отходы не только обезображивают ландшафт, но в некоторых случаях угрожают обвалами. Еще более серьезной является опасность радиоактивного загрязнения окружающей местности.

Следующим моментом, который необходимо учитывать при оценке ядерного топливного цикла, является большой объем строительных работ в связи с различными стадиями переработки руды. Особенно важно создание обогатительных газодиффузионных установок. Из действующих в настоящее время установок три были первоначально построены для военных целей, но в настоящее время на них вырабатывается ядерное топливо для промышленных реакторов. Эти три установки, строительство которых в свое время обошлось в 2 млрд. долл. /9/, потребляют колоссальное количество энергии. В 1962 г., например, они потребили 47 млрд. кВт мощности, или 5% всей произведенной в США мощности /21/. Непрерывный рост потребности в ядерном топливе потребует строительства и ввода в строй новых обогатительных установок и связанного с этим огромного расхода электроэнергии.

Потенциальную угрозу окружающей среде представляет транспортировка и хранение ядерного топлива, особенно его отходов. Для изоляции и хранения продуктов распада с высоким уровнем радиоактивности, которые поступают с нескольких установок для регенерации ядерного топлива и, согласно оценкам Комиссии по атомной энергии, к 2000 г. достигнут 227 млн. м³, требуются огромные площади и соответствующие меры защиты. Помимо этих отходов с высоким уровнем радиации, существует еще огромное количество отходов с низким уровнем радиации, образующихся на разных стадиях производства ядерного топлива, которые необходимо изолировать или выбросить в окружающую среду в виде растворов низкой концентрации. Все это связано с использованием определенной территории. Практически меры предотвращения попадания в окружающую среду отходов с высоким уровнем радиации должны носить постоянный характер. И хотя невозможно определить площадь территории для хранения отходов от каждой установки для регенерации, ясно, что могут потребоваться весьма большие наземные и подземные хранилища.

Электростанциям, работающим на органическом топливе, особенно на каменном угле, требуются огромные территории под шахты и железные дороги для хранения топлива. Электростанции мощностью 1000 МВт, работающей на угле, за 30 лет потребуются ~70 млн. т угля /17/. Если исходить из соотношения вынуженной породы к добытому углю, равного 2:1, то в течение срока службы станции потребуются перемещение 200 млн. т породы. Более того, потребуются дополнительные площади для осуществления процесса промывки и перевозки угля, а также для размещения отходов в виде золы и шлака. Обычно территория, занимаемая самой электростанцией, работающей на угле, больше территории, занимаемой атомной электростанцией. Однако, поскольку топливный цикл при работе на угле проще, а также проще процесс хранения отходов, общая территория в этом случае меньше территории, необходимой для работы атомной электростанции.

Тепловые электростанции, работающие на нефтяном и газовом топливах, обычно оказывают меньшее местное влияние на окружающую местность, чем электростанции, работающие на угле. Это связано с тем, что большая часть топлива часто доставляется на станцию по трубопроводам или водным путем и для его хранения требуется небольшая площадь. Проблемы, связанные с сжиганием топлива, возникают и в этом случае, но не в такой степени, как при работе на угле, так как нефть и газ содержат меньше вредных элементов. Природный газ является самым чистым природным топливом, но из-за того, что его запасы быстро истощаются, а разработка новых источников, по-видимому, слишком дорога, газ в качестве топлива следует использовать только для покрытия пиковых нагрузок. Как и в

случае электростанции, работающей на угле и ядерном топливе, требуется дополнительная территория для добычи газа, его переработки и транспортировки.

На основе сказанного следует признать, что хотя геотермальная электростанция, особенно в процессе ее строительства, оказывает, по всей видимости, большее влияние на состояние земли, чем другие тепловые электростанции, все компоненты геотермальной системы расположены на одной территории. В случае атомной электростанции тепловой реактор и энергетическое оборудование составляют лишь небольшую часть всей энергетической системы, подобно вершине айсберга. Промежуточное место с точки зрения простоты и занимаемой территории принадлежит электростанции на органическом топливе.

Влияние на атмосферу

Все тепловые станции загрязняют атмосферу газами. Но поскольку на геотермальной станции не происходит сжигания топлива, объем отравляющих газов, выбрасываемых в атмосферу, значительно меньше, и они имеют другой химический состав по сравнению с газообразными отходами электростанции на органическом топливе. Пар, добываемый из геотермальных скважин, в основном представляет собой водяной пар. Например, пар, добываемый в Долине Больших Гейзеров, на 99,5% состоит из водяного пара. Что касается неконденсирующихся газовых примесей, то они на ~80% состоят из двуокиси углерода и содержат небольшие примеси метана, водорода, азота, аммиака и сероводорода /2/. Самым вредным из них является сероводород. В геотермальном паре, поступающем на электростанцию "Большие Гейзеры", сероводород составляет 2-6%, а в среднем до 4,5% неконденсирующихся газов /6/, или 0,0225% в пересчете на пар.

Вследствие удаленности от населенных пунктов и относительно малой мощности электростанции "Большие Гейзеры", а также из-за меньшего количества сероводорода, приходящегося на единицу вырабатываемой мощности по сравнению с электростанциями на органическом топливе, выделение этого газа не вызывало особого беспокойства производителей электроэнергии. Однако расширение используемой площади месторождения, а также сознание необходимости максимально сократить количество выбрасываемых в воздух отходов заставило компанию, ведущую добычу пара, и производителей электроэнергии начать исследования, направленные на уменьшение количества выбрасываемого в атмосферу сероводорода. Исследования показывают, что большая часть неконденсирующихся газов выводится из смешивающего конденсатора. Однако часть сероводорода переходит в раствор в конденсате, где превращается в сульфаты и чистую серу.

Расчеты массообмена /12/ показывают, что 30% сероводорода окисляется и остается в градирнях или закачивается с конденсатом обратно в бассейн в виде сульфатов и чистой серы. Эксперименты, проведенные в лабораторных условиях, показывают, что добавкой в конденсат двуокиси серы процесс превращения сероводорода в чистую серу и воду можно ускорить. Если эта методика окажется эффективной в полевых испытаниях, проблема сероводорода может быть решена /1/.

Для правильной оценки проблемы загрязнения атмосферы сероводородом с геотермальной станции необходимо провести сравнение с соответствующими показателями работы электростанций, использующих органическое топливо. При работе тепловой электростанции мощностью 1000 МВт на угле с содержанием серы 1% ежедневно выделяется до 140 т двуокиси серы /17/, в то время как при работе геотермальной станции с ежедневным расходом пара 180 млн. т, содержащим 0,0225% сероводорода, выносятся на поверхность 48,4 т сероводорода в сутки. Если считать, что 30% этого количества возвращается в бассейн вместе с конденсатом, то общее количество, выбрасываемое в воздух, составит 33,9 т, или $\frac{1}{4}$ количества SO_2 , выделяемой электростанцией, работающей на угле. Такое количество выделяется без предварительной обработки конденсата. Если же испытания метода, описанного в работе /1/, пройдут успешно, то количество выделяемого в атмосферу сероводорода уменьшится. При работе геотермальной станции все той же мощности, т. е. 1000 МВт, в сутки выделяется 860 т двуокиси углерода, основного компонента неконденсирующихся газов в геотермальном паре. Электростанция той же мощности, работающая на органическом топливе, выбрасывает в атмосферу 20 тыс. т двуокиси углерода, т. е. в 20 раз больше, чем геотермальная электростанция. К этому следует добавить, что геотермальная станция вообще не выделяет окислов азота, дыма, пепла и других аэрозолей.

Радиоактивность геотермального пара и содержащихся в нем газов очень близка к естественной радиоактивности. Уровень α -излучения пара в Долине Больших Гейзеров составляет $0,015 \times 10^{-7}$ мКи/мл, т. е. значительно ниже нормы уровня радиоактивности питьевой воды, утвержденной Американской службой здравоохранения /3/.

Хотя суммарный сброс в атмосферу из ядерного реактора меньше общего количества отходов геотермальной станции, общее воздействие на атмосферу всей системы производства энергии с ядерным топливом во много раз превосходит воздействие геотермальной станции. На первом этапе добычи руды речь идет о пыли, дыме и радиоактивных изотопах, и каждый следующий этап цикла вносит свой вклад в общий сброс. Хотя количественно каждый вклад не-

лик, их общий суммарный эффект весьма значителен, особенно вклад установок для регенерации топлива.

Необходимо также оценить еще один фактор, способствующий загрязнению атмосферы атомными электростанциями, а именно общее количество газов, выделяемых при сгорании углеводородного топлива, используемого в шахтах, дробилках и установках по обработке урановой руды и ее транспортировке. В настоящее время руда добывается и дробится в Скалистых горах и транспортируется на Средний запад и Юг для очистки, обогащения и конверсии. Топливные элементы производятся в Калифорнии, перевозятся на место работы реактора, например в Орегон, а затем на станцию регенерации топлива в Нью-Йорк, а отходы транспортируются в места захоронения радиоактивных отходов, скажем, где-нибудь в шт. Вашингтон или Южная Каролина.

Тепловые электростанции, использующие уголь, нефть или природный газ, выбрасывают огромное количество двуокси углерода, окислов азота и серы, а в случае работы на угле еще и пепла. Все эти продукты существенно загрязняют атмосферу и оказывают другие вредные воздействия, что и послужило основным поводом возражений против электростанций, работающих на органическом топливе.

Влияние на поверхностные воды

Вследствие естественных термодинамических ограничений в любом пароводяном цикле отводится обратно 60–70% общей энергии. Это, как правило, осуществляется путем циркуляции охлаждающей воды через конденсатор. Охлаждающая вода отводит неиспользованное тепло и сбрасывает его в большие водные резервуары, такие, как реки, озера и моря. Сброс тепла в водные резервуары может привести к местным нарушениям в окружающей среде или по крайней мере в биосфере и обычно называется тепловым загрязнением. Сброс тепла неизбежен при любом процессе преобразования энергии на тепловой электростанции и имеет место во всех современных методах производства электроэнергии, включая атомные реакторы и МГД-генераторы. Одним из способов решения проблемы теплового загрязнения является сброс неиспользованного тепла непосредственно в атмосферу, минуя промежуточный этап водного резервуара, как это практикуется в настоящее время. Это можно осуществить с помощью градирен, для которых, однако, требуется большое количество дешевой воды или, как в случае сухих градирен, очень большие капиталовложения. При существующей системе производства электроэнергии на месторождениях с сухим паром, которую можно применить и на месторождениях с горячей водой под давлением, все неиспользованное тепло либо возвращается в бассейн, либо через градирни выбрасывается в атмосферу, не вызывая, таким образом, теплового загряз-

нения. Закрытый паротурбинный цикл, описанный в гл. 8, потребует такой же системы сброса тепла, которая используется на обычных тепловых станциях.

Потребность в больших количествах воды является одним из важнейших факторов, определяющих местоположение тепловых электростанций. В Скалистых горах, где находятся большие запасы угля, уже ощущается нехватка поверхностных и подземных вод для других потребностей. Создание нескольких новых тепловых станций еще более усугубит проблему водных ресурсов. Потребности в охлаждающей воде для сброса тепла так велики, что на симпозиуме, организованном Американской ассоциацией содействия развитию науки, по вопросу "Производство электроэнергии и окружающая среда" были представлены оценки, согласно которым к 1980 г. $\frac{1}{4}$ часть всей пресной воды США будет использоваться для охлаждения тепловых электростанций, а к 2000 г. эта доля возрастет до $\frac{1}{2}$ /10/. Градири с воздушным охлаждением и конденсаторы позволяют частично решить проблему, но их строительство значительно увеличивает необходимые капиталовложения и уменьшает к. п. д. электростанций.

Поскольку геотермальная электростанция работает на природном паре с более низкими температурами и давлениями (и, следовательно, с более низким теплосодержанием), чем пар электростанций на органическом или ядерном топливе, ей потребуется большее количество воды для охлаждения, чем станциям двух других типов. При использовании градирен геотермальная станция мощностью 1000 МВт расходует 113–132 млн. м³ воды в сутки, в то время как атомной электростанции требуется 94,6–113 млн. м³, а электростанции на органическом топливе – 56–75 млн. м³. Указанные цифры связаны с соответствующим тепловым к. п. д. станций этих типов, который для геотермальной станции равен 14–16%, для атомной станции 32–34% и для электростанции на органическом топливе 36–40%.

Однако определенный таким образом тепловой к. п. д. является характеристикой только самой электростанции, а не всего цикла. Действительно, при расчете тепловой эффективности всего цикла производства электроэнергии из ядерного топлива следует учитывать не только преобразование энергии расщепления в энергию пара, но и расход энергии на каждом этапе превращения урановой руды в обогащенное топливо реактора, а также затраты энергии на транспортировку, хранение и захоронение радиоактивных отходов.

Геотермальные электростанции не требуют дополнительного источника охлаждающей воды при использовании сухого природного пара или цикла с расширителем. Природный пар после прохождения через турбину конденсируется, подается по трубам в градири и затем возвращается обратно для охлаждения конденсатора. На электро-

станции "Большие Гейзеры" ~20% конденсата не испаряется и не сбрасывается с помощью градирен. Этот дополнительный конденсат закачивается затем в бассейн, откуда он был извлечен, что продлевает срок службы месторождения. Геотермальная станция является единственным типом тепловой электростанции, которая не конкурирует с другими потребителями воды, запасы которой истощаются.

Опасность загрязнения подземных вод водоносных слоев

Одно из возражений против разработки геотермальных ресурсов связано с возможным загрязнением поверхностных и грунтовых вод. Действительно, в первые годы разведки и разработки геотермальных ресурсов в США в процессе бурения скважин имело место несколько случаев прорыва геотермальной жидкости в расположенные ближе к поверхности водоносные слои и в близлежащие поверхностные воды. В качестве примера, иллюстрирующего опасность, исходящую от термальных вод, приводят также скважины, пробуренные в районе Солтон-Си. В этом районе прорыв геотермального раствора с очень высокой концентрацией минеральных солей, достигающей после выпаривания 33%, представляет серьезную опасность для ирригационных вод. Однако, по всей вероятности, такая высокая концентрация минеральных солей характерна только для вод собственно Солтон-Си, а не для всей долины Импириал-Валли и вообще встречается всего лишь в нескольких местах земного шара. В принципе геотермальные жидкости содержат более высокий процент минеральных солей, чем холодные подземные воды, вследствие того, что повышенные температуры ускоряют процесс растворения. Однако во многих местах термальные воды являются достаточно чистыми, чтобы их можно было использовать в сельском хозяйстве и промышленности. Например, в районе Кламат-Фолз, шт. Орегон, геотермальные воды используются в качестве питьевой воды для животных /13/, а в районе Бойзе, шт. Айдахо, — в качестве бытовой горячей воды /20/. В Исландии геотермальные воды уже давно используются для отопления и бытовых нужд.

Опасность возможного загрязнения поверхностных вод задерживает в США разработку геотермальных месторождений с горячей водой. Хотя месторождения этого типа успешно разрабатываются во многих точках земного шара, особенно в Уайракей (Новая Зеландия) и Серро-Прието (Мексика), где отработанный раствор сбрасывается в поверхностные воды, разработка месторождения в долине Импириал-Валли (США) до сих пор идет очень медленно. Задержки в основном связаны с высокой соленостью местных геотермальных растворов, чрезвычайной ненадежностью водного бюджета и высокой стоимостью сельскохозяйственных земель. В гл. 9 описан проект разработки геотермальных ресурсов этого района. Осуществление это-

го проекта даст возможность использовать геотермальные ресурсы долины Импириал-Валли для удовлетворения различных нужд и позволит ответить на многие вопросы, связанные с вредными последствиями разработки гидротермальных месторождений для окружающей среды.

Хотя разработка гидротермальных месторождений в США задерживается в связи с проблемой отвода большого количества воды, есть все основания полагать, что в будущем системы с горячей водой найдут применение, поскольку они обладают рядом преимуществ по сравнению с системами сухого пара. Прежде всего они, по-видимому, более распространены и находятся на меньшей глубине, что делает их особенно полезными для отопления и применения в сельском хозяйстве и промышленности. В самом деле, термальные воды уже широко используются для отопления в Венгрии, Советском Союзе, Исландии, Новой Зеландии, Японии, на Западе США, а также и для других целей в районе долины Импириал-Валли.

Бурение скважин для извлечения горячей воды осуществляется обычными методами с использованием бурового раствора вместо воздуха. Это снижает уровень производственного шума, а также выброс пара и пыли по сравнению с условиями бурения скважин в месторождениях сухого пара. В районах, где гидротермальные системы находятся при умеренном давлении, скважины располагают даже в пределах города (например, в Кламат-Фолз, шт. Орегон; Бойзе, шт. Айдахо; Роторуа, Новая Зеландия; Будапешт, Венгрия). Это было бы чрезвычайно трудно сделать в случае бурения скважин для извлечения сухого пара.

В месторождениях сухого пара типа Долины Больших Гейзеров и Лардерелло не возникает проблемы сброса соляного раствора, поскольку паровая фаза не переносит такие соли. Большая часть примесей в природном газе находится в газообразном состоянии в виде некоонденсирующихся газов. Однако некоторое количество вредных веществ все же присутствует в паре, достигая концентрации нескольких десятитысячных процента. Эти вещества образуют соли, которые остаются в конденсате и возвращаются в бассейн вместе с той частью охлаждающей воды, которая остается после удовлетворения всех потребностей электростанции. Следовательно, существующее в настоящее время производство геотермальной энергии не дает отходов ни в виде термальных вод, ни в виде химических веществ, загрязняющих поверхностные воды или другие источники полезной воды.

Основную опасность с точки зрения загрязнения вод производство геотермального сухого пара представляет в период разработки месторождения, когда при бурении используются буровые растворы и строительство нарушает обычный водный баланс данной местности. При соблюдении определенных правил эти процессы не представ-

ляют серьезной опасности для окружающей среды. К тому же в любом случае такая опасность является кратковременной по сравнению с теми проблемами, которые создает широкий фронт строительных работ конкурирующих способов производства электроэнергии. В этом отношении особенно опасны последствия горных разработок, которые продолжаются в течение всего срока службы электростанций, работающих на ядерном и органическом топливах.

Заключение

Влияние любого производства электроэнергии на окружающую среду определяется количеством и сложностью последовательных стадий производства топлива и энергии. Поскольку геотермальная электростанция использует естественный пар, она не требует ни сложного оборудования для производства пара, ни широкого фронта горных работ, ни оборудования и средств для переработки, хранения и транспортировки топлива, как другие тепловые станции.

Основное воздействие на окружающую среду производство геотермальной энергии оказывает в период разработки месторождения и строительства паропроводов и электростанции, однако это воздействие ограничено районом месторождения и не сравнимо с тем искажением ландшафта, которое связано с добычей топлива для других тепловых станций. В течение всего времени эксплуатации геотермального месторождения, которое может исчисляться многими десятилетиями, большая часть занимаемой им территории может использоваться для других целей. Например, на большей части месторождения Лардерелло, в котором добывается пар для выработки электроэнергии уже в течение 60 лет, расположены фермы, сады и виноградники.

Природный пар содержит небольшой процент неконденсирующихся газов, которые выбрасываются в атмосферу. Но по сравнению с количеством токсичных газов, выбрасываемых электростанциями на органическом топливе, этих газов, основную часть которых составляют двуокись углерода, а также азот, водород, метан и сероводород, очень мало. Столь же незначительны общий объем и токсичность этих газов при сравнении их с общим выбросом на всех этапах производства электроэнергии атомной электростанцией.

Разработка геотермальных бассейнов с сухим паром не наносит ущерба водным запасам. Более того, электростанции, на которых используются сухой пар и цикл с расширителем, обеспечивают себя охлаждающей водой путем конденсации пара. Тем самым их работа не зависит от наличия источников охлаждающей воды, которые требуются для работы других тепловых станций. Гидротермальные системы оказывают воздействие на местный водный баланс, но в большинстве случаев это воздействие проявится в том, что на поверх-

ность будет доставлена вода из таких водоносных слоев, разработка которых как источников воды нерентабельна. В других случаях будет получено дополнительное количество воды за счет очистки и опреснения в настоящее время непригодной воды. Тем самым воды геотермального месторождения сами становятся источником воды. Проект разработки района Солтон-Си содержит огромные возможности использования геотермальных вод для самых различных нужд и, видимо, вполне может быть перенесен на другие месторождения.

Простота геотермального цикла увеличивает его надежность, являющуюся также немаловажным фактором в общей оценке. Поскольку геотермальный цикл производства электроэнергии является автономным, он не связан с другими производствами; для него не требуется ни железных дорог, ни шахт, ни сложных установок, которые могут остановиться вследствие забастовки или стихийного бедствия, да и надежность самого природного "парогенератора" имеет огромное значение.

Литература

1. Barton D.B., The Geysers power plant: A dry steam geothermal facility, in Compendium of First Day Papers, presented at the First Conference of the Geothermal Resources Council, El Centro, Calif, Davis, Calif., Geothermal Resources Council, P.O. Box 1033, 1972, 27-38.
2. Bruce, A.W., Geothermal power: On line, in Papers presented at the First Northwest Conference on Geothermal Power, 1971, Olympia, Wash.: Washington State Department of Natural Resources, 1971.
3. Bruce A.W., Albritton B.C., Power from geothermal steam at The Geysers power plant, in Power Division, *Proc. Amer. Soc. Civ. Eng.*, **85**, No. PO6, pt. 1, 34 (1959).
4. Clacy G.R.T., Geothermal ground noise amplitude and frequency spectra in the New Zealand volcanic region, *J. Geophys. Res.*, **73**, 5377 (1968).
5. Evans D.M., Man-made earthquakes in Denver, *Geotimes*, **10**, No. 9, 11-18 (1966).
6. Goldsmith M., Geothermal resources in California, Potentials and problems, California Institute of Technology, Environmental Quality Laboratory, 1971, p. 45.
7. Hansen A., Thermal cycles for geothermal sites and turbine installation at The Geysers power plant, California, in New sources of energy; United Nations Conf. on New Sources of Energy, New York, United Nations, v. 3 (Geothermal Energy, 11), 1964, 365-376.
8. Hatton J.W., Ground subsidence of a geothermal field during exploitation, in United Nations Symp. on Util. of Geothermal Resources, Pisa, Italy,

- Elmsford, N.Y., Maxwell Scientific International, Inc., 1970.
9. Hogerton J., Atomic Fuel, U.S. Atomic Energy Commission, Division of Technical Information, Understanding the Atom Series, 1964, p. 40.
 10. Holcomb R.W., Power generation, The next 30 years. *Science*, **167**, 159–160, (1970).
 11. Holdren J., Herrera P., Energy, a Crisis in Power, San Francisco: Sierra Club Battlebook Series, 4, 1972.
 12. McCluer H.K., Pacific Gas and Electric Company (устное сообщение), 1972.
 13. Peterson N.V., Groh E.A., Geothermal potential of the Klamath Falls area, Oregon, A preliminary study, *Ore Bin*, **29**, No. 11, 209–231 (1967).
 14. Raleigh C.B., Bredehoeft J., Healy J.H., Bohn J.P. Earthquakes and water flooding in the Rangely Oil Field, in Abstracts with programs, Geol. Soc. Amer., v. 2, 1970, p. 660.
 15. Raleigh C.B., Healy J.H., Bredehoeft J.D., Bohn J.P., Earthquake control at Rangely, Colorado, *Trans. Amer. Geophys. Union*, **52**, 344 (1971).
 16. U.S. Atomic Energy Commission, Statistical data of the uranium industry, GJO-100, Grand Junction, Colo., Grand Junction Office, U.S. Atomic Energy Commission, 1972.
 17. U.S. Congress, Joint Committee on Atomic Energy, Selected materials on environmental effects of producing electric power, Washington, D.C., U.S. Govt. Printing Office, 1969, p. 553.
 18. U.S. Department of the Interior, Supplement to draft, Environmental impact statement for the geothermal leasing program, revised Chapter IV, Sec. C-Alternatives to proposed action; Appendix G—Energy alternatives; Appendix H—Proposed unit plan regulations, 1972, p. 175.
 19. Ward P.L., Microearthquakes, Prospecting tool and possible hazard in the development of geothermal resources, *Geothermica*, **1**, No. 1, 3–12 (1972).
 20. Wells M.W., Heat from the earth's surface, *J. West*, **10**, No. 1, 53–71 (1971).
 21. Westinghouse Electric Corporation, Nuclear fuel, Pittsburgh, Pa., Nuclear Fuel Division, Westinghouse Electric Corporation, 1968, p. 17.
 22. White D.E., Muffler L.J.P., Truesdell A.H. Vapor-dominated hydrothermal systems compared with hot-water systems, *Econ. Geol.*, **66**, No. 1, 75–97 (1971).

11. СТИМУЛИРОВАНИЕ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ СИСТЕМ

Э.Г. Ивинг¹⁾

Использование геотермальной энергии как важного национально-го источника энергии всецело зависит от количества и качества геотермального тепла, которое можно обнаружить и экономично извлечь. Известно, что запасы геотермального тепла огромны, но также хорошо известно, что только небольшая часть этого тепла может быть использована при современном уровне техники, и поскольку геотермальная энергия в будущем станет важнейшим источником электроэнергии, необходимо развивать технику, способную извлечь как можно больше тепла.

Геотермальная энергия существует в земной коре в нескольких формах (гл. 4). Использование некоторых из них связано с определенными трудностями. Идеальными условиями для месторождений производительного пара являются высокие геотермические градиенты, достаточное количество теплоносителя, достаточная проницаемость пород, подходящий химический состав и удобное расположение месторождения. К настоящему времени обнаружено лишь несколько таких месторождений. Сухой пар для выработки электроэнергии производится в значительных количествах только в немногих месторождениях, например Долине Больших Гейзеров в шт. Калифорния, Лардерелло в Италии и Мацукаве в Японии.

Более распространены геотермальные системы, содержащие перегретую воду, которая может мгновенно превратиться в пар при уменьшении гидростатического давления по мере приближения жидкости к поверхности. В таких системах только 10–20% извлекаемой жидкости превращается в используемый пар. Пароводяные системы существуют в Исландии, Турции, Новой Зеландии, Мексике, США и других странах (гл. 2).

Еще более распространены геотермальные системы, содержащие жидкости при температуре ниже 180°C. При современном уровне техники преобразование таких жидкостей в пар для производства электроэнергии паросиловым циклом неэкономично.

¹⁾ Ивинг Э.Г. — сотрудник отдела прикладной технологии Комиссии по атомной энергии США.



Фиг. 1. Геотермальные месторождения на западе США по данным Геологического управления США, 1967 г.

Кроме этих гидротермальных систем, существуют формации, занимающие сотни квадратных километров, которые содержат огромные запасы горячих пород с аномально высокими геотермическими градиентами, но не содержат достаточного количества жидкости для получения горячей воды или пара. Полагают, что некоторые из этих формаций существуют при температурах 300–600°C на относительно небольших глубинах (менее 3 км). На большей части территории США, за исключением, быть может, севера центральных штатов, средняя температура формаций превышает 150°C на глубине до 10 км. Эти формации можно сделать продуктивными, закачивая поверхностную воду под давлением.

Геотермальные формации того или иного типа распространены по всей территории США с преобладанием в западных штатах (фиг. 1).

Потенциальная мощность

В настоящее время в мире используется только 10 геотермальных месторождений; они вырабатывают электроэнергию общей мощностью менее 1000 МВт, которая эквивалентна мощности одной современной электростанции и незначительна с точки зрения современ-

ных энергетических потребностей. Оценки вклада геотермальной энергии в общий энергетический баланс США значительно расходятся. Учитывая только естественные геотермальные системы, расположенные на глубине менее 3 км, и предполагая, что 1% тепловой энергии в таких системах извлекается современной техникой при почти современной стоимости производства электроэнергии, Уайт оценивает этот вклад в $8 \cdot 10^{19}$ Дж. Эта величина приблизительно эквивалентна потреблению энергии Соединенными Штатами в 1972 г. На глубине до 10 км общая энергия, которой располагают такие системы, по оценке Уайта, примерно в 500 раз больше, хотя для ее использования требуется усовершенствование техники бурения и стимулирование более эффективных систем. Можно увеличить количество производимой энергии, если разработать методы ее извлечения из сухих горячих горных пород. По оценкам, энергия, извлекаемая из такого источника, в 100–1000 раз больше энергии, которой располагают гидротермальные системы, и составляет $10^{24} - 4 \cdot 10^{25}$ Дж. Таким образом, системы на базе сухих горячих пород способны удовлетворить потребности США в энергии на 50 000–500 000 лет при современной норме потребления. Максимальные оценки как для гидротермальных, так и для сухих систем сделаны с учетом дальнейшего развития техники, включая принципиальное усовершенствование паротурбинного цикла (для извлечения тепла из низкотемпературных источников) и методов стимулирования для увеличения производительности скважин. Паротурбинный цикл, описанный в гл. 8, позволит использовать термальную энергию жидкостей при относительно низких температурах (менее 180°C). Перспектива искусственного стимулирования производительности недостаточно выгодных геотермальных месторождений пара, гидротермальных пластов или сухих горячих горных пород также является многообещающей.

Стимулирование геотермальных месторождений пара и жидкости

Хотя геотермальные системы сухого пара встречаются не часто, они гораздо эффективнее других геотермальных систем по количеству вырабатываемой электроэнергии. Месторождения с преобладанием пара, подобные месторождению в Долине Больших Гейзеров, с относительно несложными производственными проблемами осваиваются частными предприятиями. Однако в месторождениях сухого пара как в Лардерелло, так и в Долине Больших Гейзеров давление пара в производительных скважинах со временем уменьшается. Закачивание конденсата из турбины, применяемое в Долине Больших Гейзеров, или закачивание поверхностных вод в систему задержало бы истощение

месторождений, но все же можно ожидать, что их производительность будет со временем падать. Трудно оценить эффективность стимулирования месторождений сухого пара, но вполне допустимо предположить, что геотермальную скважину, которая известна как продуктивная, но истощенная до неэкономичного уровня, можно стимулировать с помощью методов, подобных используемым для газовых и нефтяных скважин. Таким образом, необходимо провести исследования и полевые эксперименты по определению подходящих методов стимулирования.

Вследствие большего распространения гидротермальных бассейнов по сравнению с бассейнами сухого пара, по-видимому, необходимо затратить соответственно больше усилий для их изучения и освоения, хотя это и связано со значительными трудностями. Например, поскольку перегретая вода, вскипающая на поверхности, дает только 10–20% используемого пара, то, очевидно, необходимо также найти способы извлечения тепла из горных пород. Наиболее перспективным способом, увеличивающим производительность таких месторождений, является использование маломощных ядерных взрывов для создания искусственных гидротермальных бассейнов в естественных водоносных пластах. В гл. 13 предложено несколько таких способов разработки гидротермальных месторождений, которые уже доведены до уровня практического осуществления.

Проницаемость горных пород можно также увеличить с помощью рассредоточенных небольших зарядов взрывчатых веществ, обладающих большой энергией. Этот метод подробно описан в гл. 15. Перспективными методами интенсификации месторождений с преобладанием пара или горячей жидкости являются следующие:

1. Увеличение содержания пара в поступающей из скважины смеси путем создания полости для подземной сепарации пара. Жидкость может оставаться под землей, что позволяет отказаться от дорогого процесса сепарации на поверхности и обработки остатков горячей жидкости.

2. Увеличение эффективного диаметра ствола скважины с помощью взрыва, благодаря чему предупреждается отложение твердых осадков, задерживающих поток геотермальной жидкости.

3. Увеличение проницаемости пород в высокотемпературных месторождениях с преобладанием пара или горячей жидкости, где она обычно слишком низка, чтобы обеспечить экономически выгодное производство.

4. Обеспечение соответствующего объема и проницаемости пород в геотермальных образованиях с целью экономичной закачки конденсированного пара или охлажденной жидкости и, следовательно, лучшего использования тепла.

Стимулирование сухих геотермальных образований

Проблемы освоения и извлечения тепла из сухих горячих горных пород менее изучены, чем соответствующие проблемы для низкотемпературных водонасыщенных пластов, и именно в этой области исследования особенно необходимы. Первые соображения по поводу стимулирования геотермальных месторождений были высказаны Карлсоном /3/ и Кеннеди /4/, и с тех пор предложено несколько способов стимулирования.

Один из способов заключается в использовании закачки воды для производства пара в сухих горячих горных породах, предварительно раздробленных с помощью рассредоточенных ядерных зарядов. Возможность такого подхода была исследована в работах /1, 2/. Были рассмотрены варианты размещения зарядов, обеспечивающие оптимальный объем разрушенных пород для извлечения тепла с использованием замкнутого контура циркуляции поверхностной воды. Согласно расчетам, выполненным Бернхемом и Стюартом (гл. 12), электростанция мощностью 200 МВт будет работать в течение 30 лет.

Смит и др. (гл. 14) предполагают использовать гидравлическое разрушение для стимулирования геотермальных образований, имеющих недостаточную естественную проницаемость. Для создания давления в естественных или искусственных трещинах обычно используются холодные поверхностные воды. Возникающее при этом напряжение в скальных породах будет вызывать дополнительное трещинообразование в большом объеме пород. Затем необходимо пробурить вторую скважину, чтобы достичь верхней части зоны гидравлического разрушения. Холодная вода, первоначально закачиваемая в более глубокую скважину, должна образовать замкнутый контур циркуляции через зону трещинообразования и новую менее глубокую скважину, а паротурбинный цикл на поверхности должен обеспечить выработку электроэнергии из извлекаемой горячей воды.

Заключение

Одной из важных проблем разработки геотермальных месторождений является необходимость выявления запасов, оправдывающих расходы на строительство электростанций в месте расположения геотермального бассейна. Возможные капиталовложения в электростанцию могут быть сравнимы с затратами, уже сделанными на этапе исследований. Искусственное стимулирование производительности скважины может облегчить задачу. Основные направления исследований по освоению геотермальных месторождений следующие: 1) изучение возможностей использования месторождений в любой природной форме; 2) разработка способов эффективного извлечения энергии из

месторождений; 3) разработка методов оценки продуктивности и долговечности месторождений; 4) изучение возможности освоения месторождений при незначительном воздействии на окружающую среду.

Литература

1. American Oil Shale Corporation, Battelle-Northwest, Westinghouse Electric Corporation, U.S. Atomic Energy Commission, Lawrence Livermore Laboratory, and Nevada Operations Office—AEC, A feasibility study of a geothermal power plant, PNE-1550, 1971.
2. Burnham J. B., Stewart D.H., The economics of Plowshare geothermal power, Proc. Am. Nucl. Soc. Symp. on Engineering with Nuclear Explosives, CONF-700101, 1970.
3. Carlson R.H., Utilizing nuclear explosives in the construction of geothermal power plants, Proc. Second Plowshare Symposium, UCRL-5677, 1959.
4. Kennedy G.C., A proposal for a nuclear power program, Proc. Third Plowshare Symposium, TID-7695, 1964.
5. Raghavan R., Ramey H.J., Jr., Kruger P., Calculation of steam extraction from nuclear-explosion fractured geothermal aquifers, *Trans. Am. Nucl. Soc.*, **14**, 695 (1971).

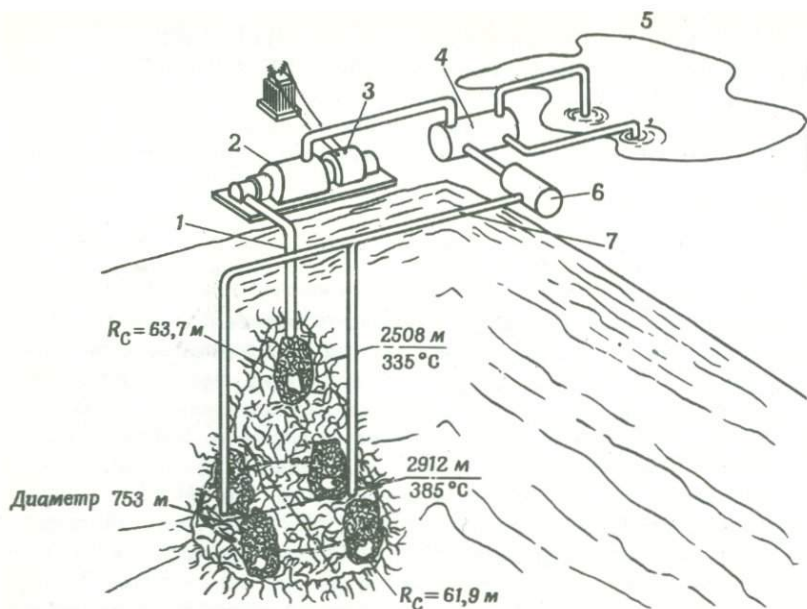
12. ИЗВЛЕЧЕНИЕ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ ИЗ ГОРЯЧЕЙ СУХОЙ ГОРНОЙ ПОРОДЫ С ПОМОЩЬЮ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ

Дж.Б. Бэрнхем, Д.Х. Стюарт¹⁾

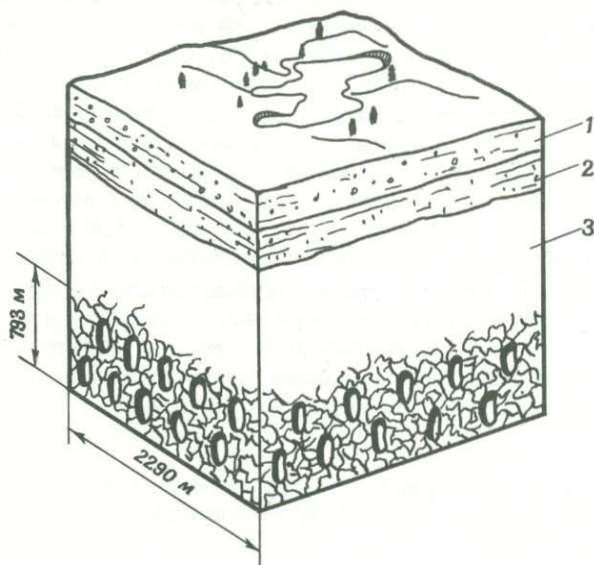
Применение подземных ядерных взрывов основано на высокой эффективности процесса образования трещин. В Плушерской геотермальной программе /1/ описан порядок получения энергии из горячих сухих горных пород. Горная порода растрескивается с помощью серии последовательных подземных ядерных взрывов. Когда образуется множество трещин, через трубы закачивают воду, а пар отводят к установке, расположенной на поверхности. На фиг. 1 показана схема электростанции, предназначенной для извлечения энергии из плутона (горячего интрузива) с применением ядерных взрывов мощностью 1000 кт. Представленные на фигуре температура, глубина и диаметры полостей R_c , образовавшихся после ядерного взрыва, соответствуют условиям выработки в гранитном интрузиве с предполагаемым геотермическим градиентом 125 град/км.

Экономичность большинства горных работ определяется стоимостью бурения и взрывов, составляющей от 2 долл/т при бурении и взрывных работах в свинцово-цинковой промышленности /3/ до 0,03 долл/т в меднорудных карьерах /6, стр. 885/. Экономика производства энергии по Плушерской геотермальной программе не отличается от экономики горнорудной промышленности. Вследствие низкой теплопроводности горных пород для извлечения значительных количеств энергии требуется большая поверхность теплоотдачи. На фиг. 2 показаны экономические возможности используемой описанным способом горячей сухой породы. Из 10^9 м^3 горной породы с начальной температурой 350°C при охлаждении до температуры 150°C можно извлечь полезную энергию, эквивалентную энергии 10^6 м^3 нефти, стоимость которой при современных ценах на нефть составляет ~250 млн. долл. Следует добавить, что, по мнению многих геологов, площади сухих геотермальных месторождений в 20-30 раз больше площадей гидротермальных месторождений.

¹⁾ Бэрнхем Дж.Б. – руководитель программы экономического анализа; Стюарт Д.Х. – руководитель геотермальных программ в Баттель-Нортуэсте, Ричленд, шт. Вашингтон.



Фиг. 1. Схема электростанции по Плушерской геотермальной программе.
 1 — паропровод; 2 — турбина; 3 — генератор; 4 — конденсатор; 5 — охлаждающий бассейн; 6 — успокоительный бак; 7 — возврат конденсата.



Фиг. 2. Гипотетический сухой геотермальный бассейн объемом $\approx 4 \text{ км}^3$, разработанный с помощью ядерных взрывов.
 1 — аллювиальные формации; 2 — осадочные породы; 3 — интрузив. Объем 4 км^3 по содержанию энергии эквивалентен $0,48 \cdot 10^9 \text{ м}^3$ нефтяного бассейна.

В работе /1/ рассматривается зависимость выработки энергии по Плушерской программе от эффективности трещинообразования, производимого ядерным взрывом. В ней подробно описано устройство станции и принятые технические и экономические допущения. Соотношение между числом требуемых ядерных взрывов, энергией, высвобождаемой в результате взрывов (т. е. той частью энергии взрыва, которая сохраняется в данном месте в виде тепловой энергии), и энергией, извлекаемой из горячей горной породы, имеет следующий вид:

$$N = \frac{E - NJW}{\epsilon \tau V_f}, \quad (1)$$

где N - число требуемых ядерных взрывов; E - энергия, необходимая для работы 200-мегаваттной электростанции с 30-летним сроком службы, равная $1,91 \cdot 10^{11}$ кВт·ч (при коэффициенте использования установки 80% и к.п.д. преобразования 22%); J - энергия, высвобождаемая на каждую килотонну заряда, или $1,05 \cdot 10^6$ кВт·ч/кт; W - мощность ядерного взрыва, кт; ϵ - доля энергии, извлекаемой из горной породы, которая принята равной 0,9; τ - теплосохранение, 180 кВт·ч/м³; V_f - объем трещиноватой породы, м³. По существу энергия, требуемая для работы электростанции в течение срока ее службы, должна быть равна сумме энергии, высвобождаемой при помощи ядерных взрывов, и энергии, извлекаемой из трещиноватой горячей породы. Особый интерес представляет объем трещиноватой породы V_f , который равен объему полости, умноженному на коэффициент M , называемый коэффициентом эффективности растрескивания. Этот коэффициент в свою очередь равен произведению отношения объема трещиноватой породы к объему полости и так называемого коэффициента усиления e_L

$$M = \left(\frac{r_f}{r_c} \right)^3 e_L, \quad (2)$$

где r_f - радиус зоны дробления, r_c - радиус полости.

Хотя коэффициент усиления при многократных ядерных взрывах никогда не измерялся, можно установить интервал значений этого коэффициента. В работе 5./стр. 357/ приводятся данные экспериментов с литонским гранитом, в котором объемы трещиноватой породы, первоначально получаемые с помощью подземного ядерного взрыва, возрастали в 36 раз после взрыва на поверхности. Следует, конечно, иметь в виду, что замкнутая полость в отношении реакции на взрыв не равнозначна свободной поверхности. Во-

первых, ее объем ограничен. Во-вторых, изменение в плотности между основной породой и полостью меньше, чем при взрыве на поверхности. В то же время при повторных взрывах ударные волны будут пересекать все большее число уже образованных полостей.

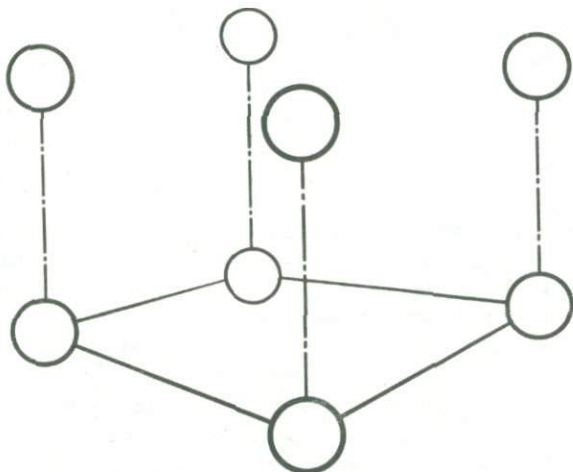
Авторы работы /4/ провели в лабораторных условиях эксперименты, которые моделировали подземные взрывы в горной породе. Эти эксперименты показали, что напряжения, необходимые для расширения существующих трещин, меньше напряжений, требуемых для образования новых. В этой работе показано также, что радиальные трещины имеют тенденцию увеличиваться при последующих взрывах, особенно радиальные трещины, направленные по нормали к поверхности. Именно радиальные трещины, распространяющиеся между полостями по мере своего развития, увеличивают взаимосвязанность этих полостей и эффективный объем растрескивания породы. В этих же экспериментах было продемонстрировано увеличение трещиноватости под давлением газа в радиальных трещинах.

В табл. 1 содержатся рассчитанные по формулам (1) и (2) данные по числу ядерных взрывов, требуемому для работы в течение 30 лет 200-мегаваттной геотермальной электростанции с коэффициентом использования станции 80%. Предполагалось, что температура горной породы 350°C достигается на глубине 3 км при коэффициенте эффективности растрескивания M , составляющем от 20 до 129. Значение $M = 20$ соответствует отношению радиуса трещиноватой породы к радиусу полости, равному 2,5, и коэффициенту усиления $\epsilon_L = 1,3$, а значение $M = 129$ соответствует условиям $r_f/r_c = 3,5$ и $\epsilon_L = 3$. Существует, конечно, множество комбинаций этих величин, приводящих к изменению M в очень широких пределах. Но значения 50-100 не очень высоки. Все приведенные в таблице значения представляют собой четные числа, что обусловлено двухрядным расположением зарядов, принятым для этих расчетов (фиг. 3).

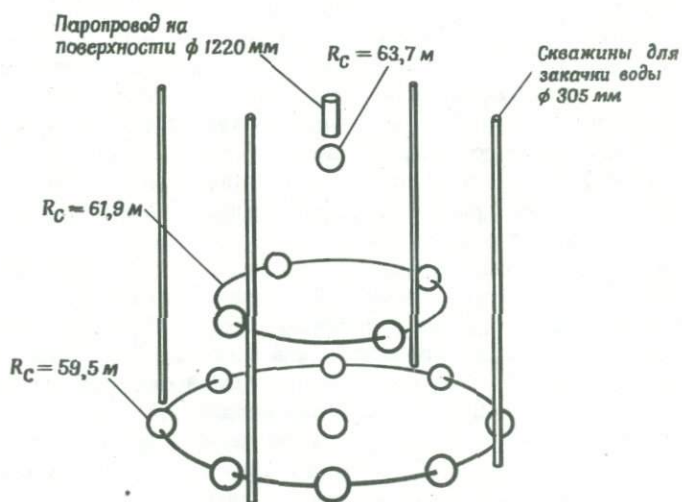
Число ядерных зарядов при двухрядном размещении, требуемое для работы 200-мегаваттной геотермальной электростанции

| Коэффициент эффективности растрескивания M | Число зарядов данной мощности | | |
|--|-------------------------------|--------|---------|
| | 200 кт | 500 кт | 1000 кт |
| 20 | 238 | 96 | 48 |
| 54 | 106 | 42 | 22 |
| 129 | 48 | 20 | 10 |

Условие: температура горной породы 350°C, глубина размещения зарядов 3 км.



Фиг. 3. Схема двухрядного размещения ядерных зарядов.



Фиг. 4. Схема плотного размещения ядерных зарядов.

Расчитанное для этого расположения зарядов число взрывов всегда округлялось в большую сторону до четного числа.

При двухрядном расположении зарядов стоимость размещения двух зарядов примерно равна стоимости размещения одного, хотя стоимость самих зарядов, естественно, удваивается. При расположении по схеме плотной закладки каждый заряд ориентирован таким образом, что при взрыве максимально взаимодействует с ближайшими зарядами (фиг. 4). Коническая форма полости облегчает закачивание воды в полость. Следует признать, что устройство водоинжекционной системы для такого большого подземного "котла" будет не легкой проблемой; гидравлический поток через этот большой, связанный трещинами объем пород должен обеспечивать максимальное извлечение энергии. Вполне возможно, что по мере появления данных окажется целесообразной разработка схемы, сочетающая эти два способа размещения зарядов, например в виде простого кубического расположения (фиг. 3) с двумя зарядами внутри, расположенными на расстоянии, равном половине стороны внешнего куба, в результате чего образуется центронаполненная кубическая структура.

Согласно недавно полученным полевым данным, некоторые из используемых в этих расчетах величин, возможно, уже устарели. Например, в работе /2/ показано, что в геотермальном районе вблизи Мэрисвилла, шт. Монтана, геотермический градиент составляет ≈ 300 град/км. Эта величина более чем вдвое превосходит используемое в наших расчетах значение 125 град/км. Если градиент не изменяется с глубиной, то в этом районе на глубине 3 км можно ожидать температуру 700°C . При охлаждении породы от 700 до 200°C средний тепловой к.п.д. возрастет от 22 до 30,5%. Одновременное увеличение к.п.д. преобразования тепла и теплосодержания породы может привести к уменьшению требуемого количества зарядов более чем в 2,5 раза.

Рассматриваемая проблема включает и другие факторы, один из которых — диаметр скважины для размещения зарядов — важен с точки зрения экономичности данной схемы. Если бы заряды можно было размещать в скважинах меньшего диаметра, чем принятый в данных расчетах (600 мм), то на каждой скважине можно было бы получить значительную экономию средств. Другим нерассмотренным здесь фактором является недавно вынесенное судебное определение, что геотермальные энергетические ресурсы исчерпаемы. Это определение приводит к уменьшению стоимости данного типа энергии примерно на $0,3 \cdot 10^{-3}$ долл/кВт·ч.

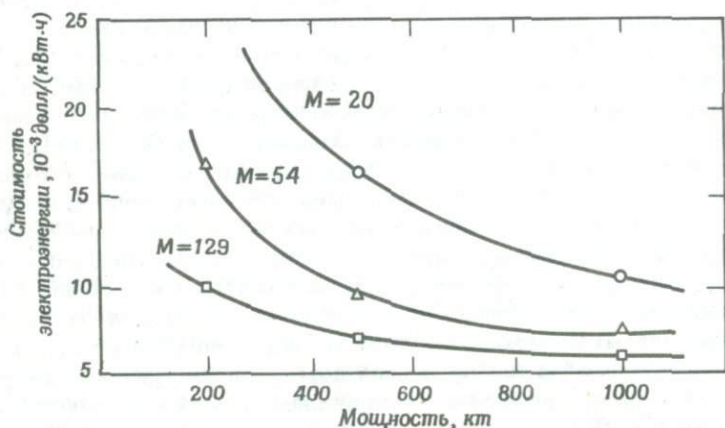
В работе /4/ указывается также, что увеличение радиального растрескивания, вызванное последующими ядерными взрывами, может привести к значительному увеличению коэффициента усиления выше значений 1–3, используемых в данных расчетах. Кроме того,

в наших расчетах не учитывалось тепловое растрескивание, влияние которого в настоящее время не известно, но которое может внести существенный вклад в увеличение объема трещиноватой породы.

В экономике Плушерской геотермальной станции остается ряд нерешенных вопросов. Несомненно, предстоит провести значительную работу в поисках решения проблемы закачки воды. Очень важно пропускать воду и пар из области с низкой проницаемостью в область высокой проницаемости, избегая чрезмерно больших протоков. Важным еще не решенным вопросом может оказаться и проблема растворения кремнезема. При высоких температурах и давлении заметное количество кремнезема может выноситься с паром в турбину. Если кремнезема слишком много, может потребоваться промежуточный теплообменник на поверхности. Хотя большинство радиоактивных изотопов "заморожено" в расплавленной породе, некоторые из них достаточно хорошо растворяются в водяном паре, с которым выносятся на поверхность [3]. Эта проблема в настоящее время не кажется острой, но имеющихся данных все еще недостаточно. И, наконец, еще одной проблемой может оказаться определение мощности ядерных взрывов, обеспечивающих экономичность программы. Хотя недавно обнаруженные высокотемпературные породы дают основание рассчитывать на более дешевую электроэнергию, использование зарядов большей мощности будет также уменьшать стоимость электроэнергии при любом варианте размещения зарядов. Однако предельная мощность зарядов, которые можно использовать в континентальной части США, неизвестна. Химические и физические явления, сопровождающие подземные ядерные взрывы, рассмотрены более подробно в гл. 16 и 17.

На фиг. 5 приведены результаты расчета экономичности 200-мегаваттной электростанции в зависимости от эффективности растрескивания породы при конкретном расположении и величине ядерного заряда. При малой эффективности растрескивания производство электроэнергии нерентабельно даже при большой мощности взрыва. Однако при умеренной эффективности растрескивания производство электроэнергии на станциях такого типа становится рентабельным при мощности взрывных устройств 500 кт и более. В случае высокой эффективности растрескивания электростанция становится экономически конкурентоспособной при мощности ядерного заряда 300 кт и более. Использование более горячих интрузивов, например вблизи месторождения Мэрисвилл, шт. Монтана, будет существенно уменьшать эти затраты. Они уменьшатся до $5 \cdot 10^{-3}$ долл/(кВт·ч) при мощности зарядов 1000 кт и эффективности растрескивания $M=54$. Для той же величины M стоимость энергии составит соответственно $5,8 \times 10^{-3}$ и $8,8 \cdot 10^{-3}$ долл/(кВт·ч) при мощности зарядов 500 и 200 кт.

Геотермальная энергия действительно является важнейшим источником энергии, которая может быть извлечена с помощью ядер-



Фиг. 5. Стоимость электроэнергии, вырабатываемой на электростанции мощностью 200 МВт, по Плоушерской геотермальной программе в зависимости от мощности ядерного заряда и эффективности растрескивания.

ных взрывов. Экономические возможности этого источника энергии, как и большинства горных работ, требующих разрушения породы, определяются в значительной степени эффективностью растрескивания горной породы.

Литература

1. American Oil Shale Corporation — U.S. Atomic Energy Commission, A feasibility study of a geothermal power plant, PNE-1550, 1971.
2. Blackwell D., Exploration and development in dry-hot systems, ARPA Conference, Lake Arrowhead, California, May 30 — June 2, 1972.
3. Charlott L.A., et al., Plowshare geothermal steam chemistry, BNWL-1614, Economics of mineral industry, 1959, AIME, p. 189 (1971).
4. Kutter H.K., Fairhurst C., On the fracture process in blasting. *Int. Jour. Rock Mechanics and Mining Sciences*, 8, No. 3 (1971).
5. Surface mining, *AIME*, 1968.

13. СТИМУЛИРОВАНИЕ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ БАССЕЙНОВ С ПОМОЩЬЮ ВЗРЫВА

Г. Дж. Рэми мл., П. Кругер, Р. Рэгхвен¹⁾

Существует несколько типов месторождений геотермальной энергии: системы с преобладанием пара (бассейны сухого пара), системы с преобладанием жидкой фазы (бассейны с горячей водой) и сухие образования (горячие горные породы). Каждая из этих систем перспективна для разработок. Паровые системы обладают наилучшими для получения электроэнергии характеристиками, но они встречаются весьма редко. Проблемы разработки паровых систем рассматриваются в гл. 6. Если будут открыты столь же рентабельные месторождения сухого пара, как Долина Больших Гейзеров, их разработка будет немедленно начата частными предпринимателями. Системы с горячей водой, которые также тщательно изучаются с точки зрения производства электроэнергии, более сложны при разведке, разработке и производстве. Вопросы использования сухих горячих пород для выработки электроэнергии, пока менее изученные по сравнению с системами с горячей водой, рассматриваются в ряде глав (12, 14 и 15).

Согласно оценкам Уайта (гл. 4), геотермальные бассейны с горячей водой более распространены, чем бассейны сухого пара. Если оправдаются надежды, возлагаемые на два перспективных метода разработки геотермальной энергии, находящихся на начальной стадии развития, горячий водоносный пласт станет важнейшим источником электроэнергии. Один из этих методов — паротурбинный цикл — описан в гл. 8. Второй метод — стимулирование добычи геотермальной жидкости при помощи взрывов, создающих открытый бассейн в самом водоносном пласте или вблизи него, — описан в данной статье.

¹⁾ Г. Дж. Рэми мл. — профессор кафедры нефтяных разработок и Кругер П. — профессор кафедры гражданской ядерной техники Стэнфордского университета, Стэнфорд, шт. Калифорния; Р. Рэгхвен — старший инженер-исследователь фирмы "Амоко продакшн", Талса, шт. Оклахома.

Энергетика гидротермальных бассейнов

Энергосодержание гидротермальных бассейнов можно оценить, исходя из условия эффективной работы современных паровых турбин непосредственно на геотермальных месторождениях: минимальное давление пара на входе в турбину должно быть не менее $\sim 0,69 \text{ МН/м}^2$ (абс.). Можно оценить энергосодержание гипотетического бассейна с температурой 260°C и пористостью 25% (табл. 1) при снижении давления в системе за время ее эксплуатации от начального давления насыщенного пара $4,7 \text{ МН/м}^2$ (абс.) (при 260°C) до давления, при котором эксплуатация бассейна прекращается, $0,69 \text{ МН/м}^2$ (абс.) (при 164°C). В таблице приведено энергосодержание геотермальных систем двух типов: бассейна сухого пара и бассейна с горячей водой (при этом предполагается, что закачка жидкости в месторождение не производится). Бассейн с горячей водой содержит значительно больше энергии, чем бассейн сухого пара. Хотя скрытая теплота парообразования велика по сравнению с теплосодержанием воды при той же температуре, значительно большая масса воды в водоносном пласте бассейна обеспечивает его большую тепловую эффективность. Но в обеих системах масса породы превосходит массу жидкости, поэтому большая часть тепла содержится не в жидкости, а в горной породе.

Таблица 1

Энергосодержание гипотетических геотермальных бассейнов

| Компонента | Бассейн сухого пара | | Бассейн с горячей водой | |
|---------------|---------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|
| | масса, кт | запасы энергии, ГДж | масса, кт | запасы энергии, ГДж |
| Горная порода | 2,456 | 246 | 2,456 | 246 |
| Теплоноситель | 0,007 | 15,8 | 0,242 | 106,5 |
| В с е г о | 2,463 | 261,8 | 2,698 | 352,5 |

Примечание. Данные приведены для геотермального бассейна с пористостью горной породы 25%, объемом 1000 м^3 , начальной температурой 260°C и выработкой пара до давления $0,69 \text{ МН/м}^2$ (абс.) при температуре 164°C .

Полное энергосодержание системы с горячей водой мало по сравнению с энергосодержанием обычных нефтяных бассейнов. Поскольку большая часть этой энергии заключена в горной породе, заслуживают внимания методы добычи, позволяющие извлекать как тепло горных пород, так и тепло, заключенное в жидкости. Тепло, содержащееся в горных породах, можно извлекать двумя способами:

1) мгновенным испарением заключенной в пористой породе жидкости (метод эффективен, пока сохраняется жидкая фаза) и 2) возвратом охлажденной жидкости обратно в породу.

Таблица 2

Добыча теплоносителя из гипотетических геотермальных бассейнов

| Параметр | Бассейн су- хого пара | Бассейн с го- рячей водой |
|--|--------------------------|------------------------------|
| Начальное содержание теплоносителя, кг | 5950 | 196 000 |
| Неиспользованный теплоноситель, кг | 720 | 23 000 |
| Добыча пара, кг | 5230 | 136 000 |
| воды, кг | 0 | 37 000 |
| В с е г о | 5230 | 173 000 |
| Добыча в % от начальной массы теплоносителя | 87,9 | 88,3 |
| Выработка в % от общей энергии | 5,6 | 99,1 |

Примечание. Данные приведены для геотермального бассейна с пористостью горной породы 25%, объемом 1000 м³, начальной температурой 260°C и выработкой пара до давления 0,69 МН/м² при температуре 164°C. Среднее значение энтальпии производимого теплоносителя $2,326 \cdot 10^6$ Дж/кг.

Бассейны сухого пара. Хотя бассейны с горячей водой обладают большим начальным теплосодержанием, чем бассейны сухого пара, последние предпочтительнее как особо чистые источники энергии, создающие меньшее число производственных проблем. Разработка бассейнов сухого пара подобна разработке бассейнов природного газа в том смысле, что давление падает по мере расширения заключенного в бассейне газа. В табл. 2 приведены данные по добыче насыщенного пара, приходящегося на 1000 м³ бассейна, до давления 0,69 МН/м² (абс.), при котором эксплуатация бассейна прекращается. Около 5,2 т из ~ 6 т пара, заключенного в бассейне, будет извлечено до истощения бассейна, что соответствует 87,9%. Однако доля извлеченной энергии составит лишь 5,6% от общей энергии системы вследствие изотермического расширения пара в пористой горной породе. Энергия из породы может быть извлечена только при таком процессе добычи, при котором значительно уменьшается температура породы. Хотя два наиболее значительных в мире геотермальных месторождения представляют собой системы с преобладанием пара, вряд ли извлечение энергии из горных пород этих бассейнов будет существенным, если не производить закачку жидкости.

Бассейны с горячей водой. В табл. 2 содержатся также данные по добыче горячей воды из бассейнов с преобладанием жидкой фазы при той же начальной температуре 260°C . Из ~ 200 т горячей воды, содержащейся в объеме 1000 м^3 , до истощения бассейна будет добыто ~ 140 т пара и 37 т жидкости, что составит 88,3% первоначальной водной массы системы. Путем уменьшения давления можно испарить около 70% содержащейся в бассейне воды. Поскольку этот процесс протекает *неизотермически*, понижение температуры при кипении позволяет высвободить тепловую энергию породы. Пар, получаемый путем испарения из бассейна горячей воды, содержит почти всю энергию системы теплоноситель – порода. При этом ~ 140 т пара, пригодного для производства электроэнергии, более чем в 20 раз превышает запасы пара парового бассейна. Эти цифры относятся к оптимальным условиям, так как предполагается, что теплоноситель и горная порода находятся в равновесии до конечного состояния, т. е. до давления ниже $0,69 \text{ МН/м}^2$ (абс.) При других способах добычи из рассматриваемой системы извлекается меньше теплоносителя и энергии. Например, добыча одной только жидкости на первоначальных этапах, по-видимому, приведет к сокращению доли вырабатываемого пара.

Извлечение энергии при испарении горячей воды под давлением на поверхности в сильной степени зависит от температуры воды. При температуре 260°C около 32% массы воды превращается в пар при уменьшении давления от давления насыщенного пара $4,7 \text{ МН/м}^2$ (абс.) до атмосферного. При температуре 205°C , когда давление насыщенного пара составляет $1,72 \text{ МН/м}^2$ (абс.), испаряется только 20%, а при 121°C – лишь 4% жидкости. Для извлечения тепла из первичной горной породы геотермального бассейна требуется испарение горячей воды в пористом водоносном пласте или закачка холодной воды. Таким образом, основными проблемами при извлечении геотермальной энергии являются местное вскипание и закачка холодной воды.

Факторы, влияющие на кипение в пористых средах. Кипению в пористых средах уделялось недостаточное внимание, поэтому необходимо рассмотреть ряд нерешенных проблем. Например, данные по давлению пара над плоской поверхностью нельзя использовать для пористого пространства, где вследствие капиллярности поверхность жидкости криволинейна. Хотя в работе /4/ были выполнены измерения давления пароводяной смеси в пористом песчанике, данные о температурах в геотермальных бассейнах отсутствуют. Результаты этой работы, относящиеся к породе с проницаемостью 760 миллидарси, пористостью 27,9% и температурой $34,4^{\circ}\text{C}$, можно представить в следующем виде:

| | | | |
|--|-------|-------|--------|
| Доля пористой породы, заполненной водой | 0,103 | 0,058 | 0,0325 |
| Относительное давление пара | 1,101 | 7,692 | 37,313 |

где под относительным давлением пара понимают отношение давления над плоской поверхностью к давлению пара в пористой среде. Давление пара над плоской поверхностью резко понижается при уменьшении заполненности пор водой. В противоположность этому авторы работ /1, 3/ не обнаружили значительного понижения давления пара в рыхлом песке в интервале температур 150–205°C. Неясно, почему в этом случае отсутствовал капиллярный эффект; известно, правда, что капиллярное давление проявляет себя по-разному в рыхлом песке и в уплотненной горной породе. Это явление нуждается в дальнейшем изучении. Другой проблемой является течение пароводяного потока через пористую среду. Дональдсон /6/ рассмотрел процессы кипения и течения пароводяной смеси в пористых средах. Мы располагаем наиболее полными сведениями о двухфазном течении углеводородных систем при изотермических условиях. Известно также, что удельная теплоемкость и теплота испарения кипящей воды гораздо больше соответствующих величин для испаряемых жидких углеводородов.

Другим фактором, оказывающим влияние на кипение в пористых средах, является содержание соли в жидкой фазе. Ниже приведены данные, характеризующие влияние содержания соли в жидкости при температуре 205°C

| | | | |
|-----------------------------|--------|-------|-------|
| Концентрация соли, % | 0,1 | 1,0 | 10 |
| Относительное давление пара | 1,0003 | 1,003 | 1,033 |

где под относительным давлением пара понимают отношение давления пара чистой воды к давлению пара воды, содержащей соли.

Видно, что давление пара уменьшается на 3% при содержании соли 10%. Из скважин, пробуренных вблизи озера Солтон-Си в Калифорнии, добывается геотермальный рассол с содержанием соли 30%. Совсем скудными являются сведения о совместном воздействии содержания соли и капиллярности на давление пара в пористой среде. И, возможно, более важным является влияние осаждения солей на объем пор и проницаемость пористой среды, в которой происходит кипение, особенно при закачивании соленых вод в бассейн естественного геотермального пара. Заметим, что геотермальный рассол в районе озера Солтон-Си представляет исключение, большинство известных геотермальных вод содержит соль в меньших количествах, чем морская вода, и следует ожидать, что растворенная соль не будет существенной помехой для производства,

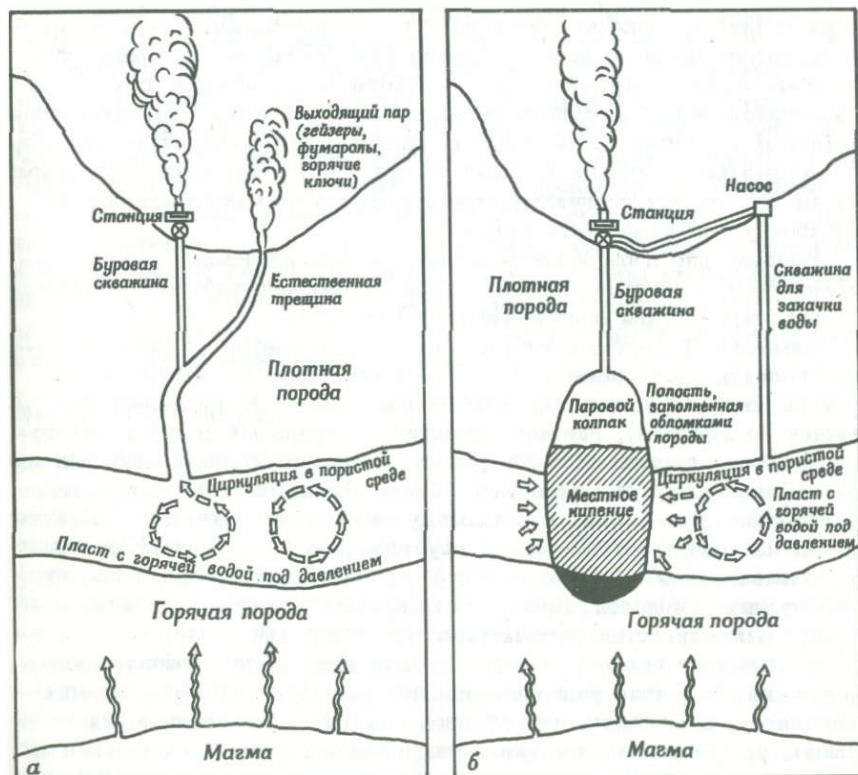
Стимулирование месторождений с помощью взрыва

Вследствие большей распространенности и больших энергетических возможностей геотермальных систем с горячей водой по сравнению с системами сухого пара приходится искать методы стимулирования этих систем. Один из самых многообещающих методов — стимулирование с помощью взрыва. Использование химических взрывчатых веществ для стимулирования геотермальных месторождений рассматривается в гл. 15. При неглубоком залегании эффективны химические взрывы мощностью ~ 5 кт. При более глубоком залегании применение взрывов ограничено из-за увеличения размеров заряда и из-за повышения температуры породы.

Ядерные взрывы, которые становятся более эффективными с точки зрения размеров заряда и стоимости при мощности заряда более 3 кт, используются для растрескивания больших объемов подземных пластов. Поэтому разрабатываются специальные ядерные заряды для размещения в глубоких скважинах с диаметром, соответствующим диаметру скважин, используемых в нефтяной и газовой промышленности /8/. В США стимулирование с помощью ядерного взрыва добычи природного газа из глубоких месторождений с низкой проницаемостью породы изучается на опыте взрыва "Гэзбагги" мощностью 29 кт, взрыва "Рулисон" мощностью 40 кт и некоторых других планируемых экспериментальных взрывов. В Советском Союзе с помощью ядерного взрыва был успешно осуществлен разрыв пласта для стимулирования добычи нефти. Использование маломощных (5–100 кт) ядерных взрывов для извлечения геотермальной энергии также кажется перспективным.

Идея стимулирования производительности непродуктивных геотермальных бассейнов путем растрескивания с помощью ядерного взрыва принадлежит Карлсону /5/. Он предложил использовать растрескивание для создания проницаемой зоны в естественных геотермальных системах с недостаточным количеством жидкости, малой проницаемостью или малым размером естественных трещин. Дальнейшее развитие его идея получила в работе /7/, автор которой исследовал экономичность стимулирования с помощью взрыва для получения пара из геотермального месторождения с температурой 500°C на глубине 3000 м. На основе этих первых оценок возникла идея использования поверхностных вод в замкнутом цикле для получения пара из сухих горячих пород, раздробленных с помощью взрыва (гл. 12).

В работе /8/ предложено использовать стимулирование водоносных геотермальных пластов с помощью взрыва подобно тому, как это делается при добыче углеводородов. При помощи ядерных взрывов малой мощности в геотермальном водоносном пласте образуется скважина большого диаметра (полость, заполненная обломками породы), которая обеспечивает пополнение вод пласта. На фиг. 1



Фиг. 1. Сравнение естественного (а) и стимулированного взрывом (б) геотермальных месторождений.

схематически представлены в разрезе геотермальный водоносный пласт, стимулированный взрывом, и гипотетический естественный геотермальный бассейн. Соответствующим образом регулируя производительность и характеристики пара в скважине, можно оптимизировать извлечение энергии из стимулированного геотермального месторождения.

Воздействие на окружающую среду

Хотя последствия перемещения грунта, вызванного подземным ядерным взрывом, рассматриваются в гл. 16, сделаем по этому поводу несколько замечаний. Маловероятно, конечно, что стимулирование добычи геотермального пара с помощью ядерных взрывов будет осуществляться в населенных районах. Расчеты ожидаемого повреж-

дения зданий в зависимости от их типа и расстояния от места взрыва ядерного заряда мощностью менее 100 кт можно выполнить с помощью методов, предложенных в работе /2/. Расходы, связанные с восстановлением разрушенных зданий при ожидаемом развитии геотермальных ресурсов в отдаленных районах, будут, вероятно, ничтожно малы по сравнению с общей выгодой осуществления программы; все же их следует специально предусмотреть в смете расходов на разработку геотермального бассейна.

Воздействие добычи геотермального пара на землю, воздух, поверхностные и грунтовые воды обычно ограничено районом, непосредственно окружающим зону выработки (гл. 10).

Химический состав геотермальных вод меняется от десятых долей процента растворенных примесей в сравнительно чистых водах до насыщенности концентрированных рассолов. В Импириал-Валли (южная Калифорния), где концентрация минеральных солей в некоторых рассолах превышает 30%, может оказаться экономически выгодной добыча полезных химикалиев. Каким бы ни были характеристики геотермальных вод, они, по-видимому, не окажут никакого воздействия ни на поверхностные, ни на грунтовые воды, поскольку они не будут выводиться за пределы цикла извлечение раствора — возврат отработанной жидкости. Проблемы использования отработанных геотермальных жидкостей рассматриваются в гл. 10.

Необходимо также принимать во внимание выделяющиеся продукты взрыва. Описание радиоактивности подземного ядерного взрыва включает типы и количество образовавшихся радиоизотопов, их начальное распределение во время гидродинамических фаз взрыва и дальнейшее их перераспределение. Образование радиоизотопов зависит от типа используемого взрывчатого вещества; выделение энергии может сопровождаться как реакциями деления трансурановых элементов, так и практически любой термоядерной реакцией с участием легких элементов. Радиоизотопы образуются в виде продуктов расщепления ядер, либо в виде трития (H^3) при термоядерных реакциях, либо в виде продуктов активации вследствие захвата высвободившихся нейтронов атомами окружающей среды (гл. 16). Ядерные взрывные устройства серии "Бриллиант", разрабатываемые для промышленного использования, не только уменьшены в диаметре и усовершенствованы в отношении термостойкости и других физических свойств, но также обладают меньшей радиоактивностью, особенно тритиевой. Разрабатываются новые способы уменьшения общей радиоактивности, например экраны, поглощающие нейтроны.

В процессе производимого взрывом расширения первоначальной полости в породе значительная толща породы испаряется и плавится. При охлаждении полости пластичная масса расплавленной породы остекловывается, и в остеклованном слое на дне полости создается

устойчивая фракция нелетучих радиоизотопов. Полость заполняется летучими радиоизотопами, такими, как K_1^{85} и H^3 . Инертный газ K_1^{85} можно выпустить из полости и использовать. Изотоп H^3 может оказаться в связанном состоянии в виде НТО, НТ, CH_3 и т.д. Химическое распределение и дальнейшее использование трития составляют часть задач, изучаемых на опыте экспериментальных взрывов "Тээ-багга" и "Рулисон", с помощью которых производилось стимулирование месторождений газа. Результаты этих исследований, по-видимому, свидетельствуют о том, что опасность радиоактивного загрязнения окружающей среды, связанная с производством геотермальной энергии при использовании ядерных взрывов, будет ничтожна, а риск вполне оправданным, если учесть увеличение выработки электроэнергии из геотермальных месторождений.

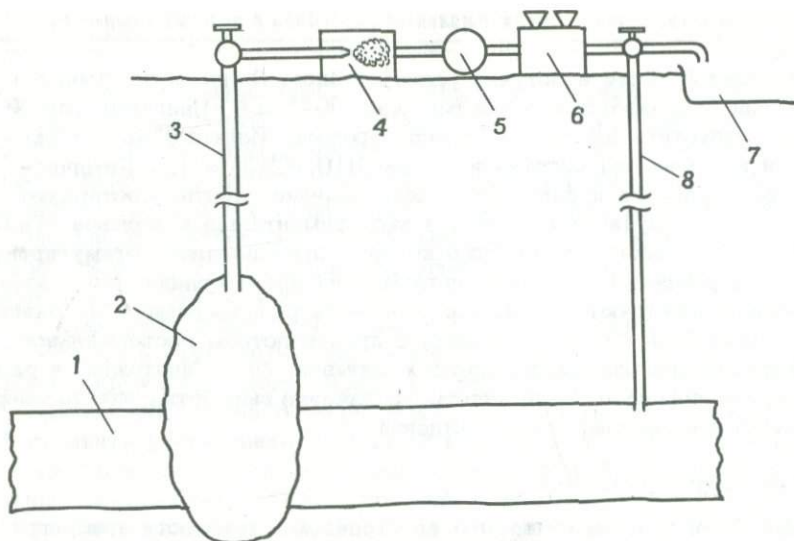
Методы получения пара

На 1 МВт вырабатываемой электрической мощности требуется 7,7 т/ч насыщенного пара. Для окупаемости электростанции и системы получения пара может потребоваться производительность свыше 450 т/ч пара в течение 20–40 лет. Приведенные выше расчеты энергосодержания указывают, что поддержание производства пара на столь высоком уровне, возможно, потребует извлечения энергии не только из водоносных пластов, но и из горячих пористых пород. Таким образом, экономическая целесообразность выработки электроэнергии из месторождений с низкими геотермическими градиентами будет зависеть от успешного решения технических проблем, связанных: 1) с ограниченной производительностью скважин; 2) с ограниченным энергосодержанием водоносного пласта или с ограниченными запасами теплоносителя.

В свете этих технических задач следует рассмотреть несколько методов получения пара /8/.

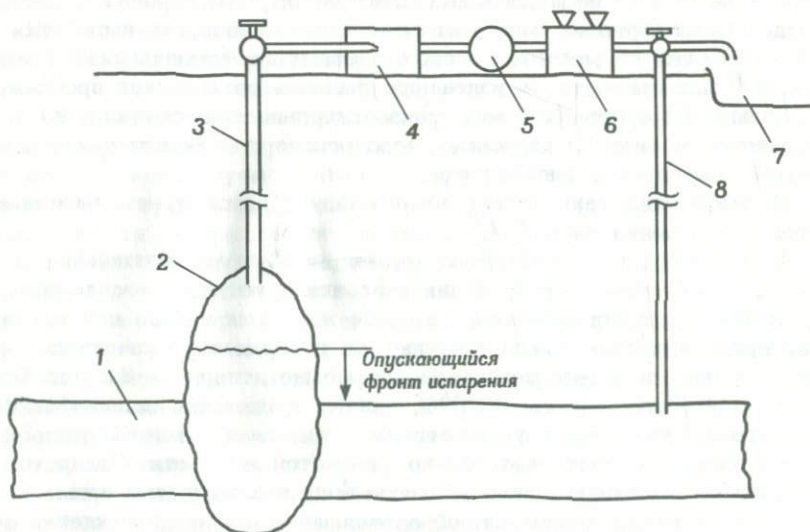
Получение пара путем испарения горячей жидкости на поверхности (фиг. 2). Путем регулирования давления в устье скважины поддерживается гидростатическое давление жидкости и вода под давлением прокачивается в расположенный на поверхности испаритель. Как указывалось выше, первоначально можно испарить 32 вес. % жидкости при температуре 260°C, причем количество испаряющейся жидкости уменьшается с уменьшением давления и температуры. Энергия на испарение поступает только от горячей жидкости. Сепаратор отделяет охлажденную использованную воду и химические примеси. Эту воду, а также конденсат, образовавшийся после прохождения пара через генератор и конденсатор, можно отвести в бассейн на поверхности, либо возвратить в геотермальный водоносный пласт.

Получение пара с переменными параметрами путем опускания фронта испарения (фиг. 3) Если вода из горячего водоносного пласта



Фиг. 2. Испарение геотермальной воды на поверхности.

1 - геотермальный горизонт; 2 - полость, заполненная обломками породы; 3 - закрепленная эксплуатационная скважина; 4 - испаритель, сепаратор; 5 - турбогенератор; 6 - конденсатор; 7 - бассейн; 8 - скважина для закачки воды.



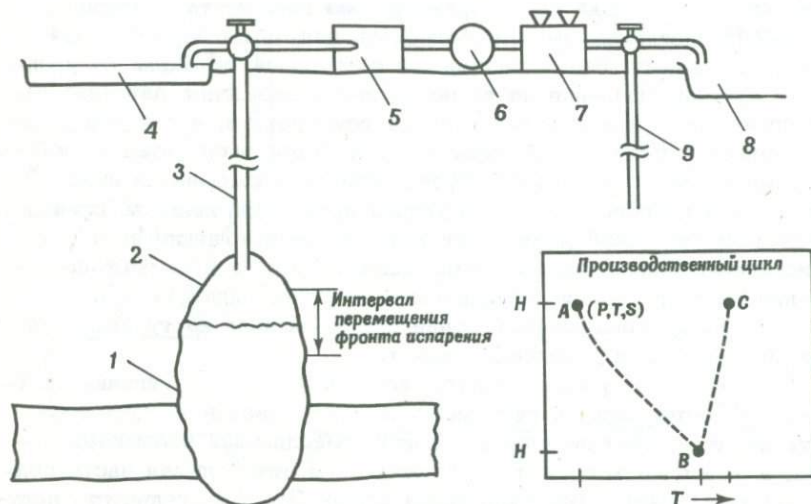
Фиг. 3. Опускание фронта испарения в геотермальный горизонт.

1 - геотермальный горизонт; 2 - полость, заполненная обломками породы; 3 - закрепленная эксплуатационная скважина; 4 - испаритель, сепаратор; 5 - турбогенератор; 6 - конденсатор; 7 - бассейн; 8 - скважина для закачки воды.

не может быть подана на поверхность без насоса, то, регулируя уменьшение давления, можно обеспечить получение пара в самой скважине. Вначале вода поднимается по буровой скважине до уровня, на котором давление на ее поверхности достигает давления насыщенного пара, соответствующего ее температуре, и с этого уровня начинается непрерывное испарение. По мере эксплуатации скважины и понижения температуры фронт испарения смещается вниз и достигает водоносного пласта. Регулируя производительность скважины, можно выбрать такой режим, при котором ее истощение наступит по истечении планируемого срока эксплуатации. В этом методе получения пара требуется регулирование расхода жидкости и пара; жидкость после сепаратора и конденсат на выходе из турбины могут быть возвращены в водоносный пласт.

Регулирование расхода пара путем регулирования кипения внутри самой геотермальной системы позволяет извлечь значительную часть тепла, содержащегося в полости, заполненной обломками породы, и водоносном горизонте. В этих условиях большая часть подземных вод может быть превращена в пар. Продолжительность получения пара таким методом пока еще не установлена. Теплосодержание полости и водоносного горизонта может оказаться недостаточным для поддержания требуемого расхода пара в течение срока эксплуатации месторождения, поскольку отбор тепла от щебня и коренной породы приводит к уменьшению температуры. Следовательно, паросодержание изменяется со временем благодаря двум эффектам: изменению температуры пара и изменению градиента по мере снижения фронта испарения в буровой скважине. Хотя этот метод получения пара кажется более эффективным, чем испарение на поверхности, при его оценке требуется значительно более подробная информация о двухфазном кипении в пористых средах, особенно при повышенной температуре, о характеристиках неустановившегося течения в водоносном пласте, раздробленном ядерным взрывом, и о последствиях возрастания содержания солей в системе.

Циклическое получение пара путем испарения в двойных скважинах (фиг. 4). С помощью этого метода получения пара может быть достигнута повышенная тепловая эффективность местного кипения при поддержании постоянного паросодержания и расхода. Цикл начинается в одной из двух полостей, заполненных обломками породы, с испарения в верхней части полости при параметрах, соответствующих температуре, давлению и концентрации солей в водоносном горизонте. Добыча пара продолжается при понижении фронта испарения до достижения уровня водоносного горизонта в полости или до насыщения последнего солями. После этого охлажденная и насыщенная вода перекачивается из полости в испарительные бассейны для извлечения из нее солей; перекачка продолжается до восстановления нормальных



Фиг. 4. Циклическое производство с испарением в двойных скважинах.

1 — охлажденная насыщенная вода; 2 — полость, заполненная обломками породы; 3 — одна из двух скважин; 4 — бассейн для выпаривания и осаждения солей; 5 — испаритель, сепаратор; 6 — турбогенератор; 7 — конденсатор; 8 — бассейн; 9 — скважина для закачивания воды. А — водоносный горизонт; А-В — добыча пара; В — охлажденная насыщенная вода; В-С — восстановление нормальных условий в водоносном горизонте в полости; Н — высота фронта испарения; Т — время.

условий в водоносном горизонте в полости. В это же время начинается добыча пара из второй полости для поддержания постоянного его расхода.

Для оценки этого метода выработки энергии требуется дополнительная информация, помимо необходимой для расчета непрерывно понижающегося фронта испарения. В частности, необходимы экспериментальные данные о свойствах химикалий, растворенных в геотермальной системе, и по кинетике их осаждения из охлажденных геотермальных вод.

Прогнозирование эксплуатационных характеристик

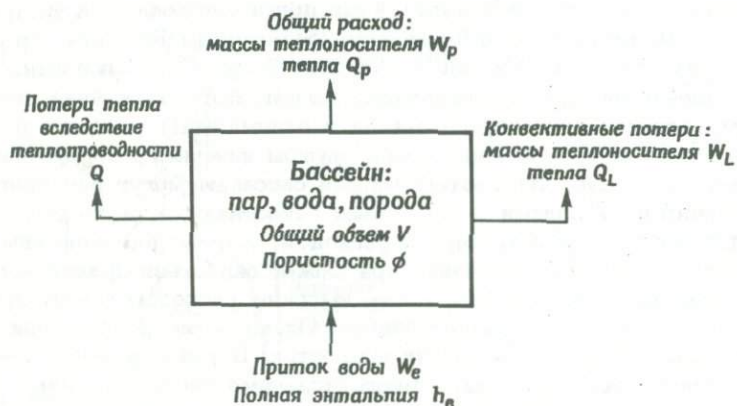
Выше отмечалось, что для окупаемости геотермальной электростанции и системы получения пара может потребоваться расход пара более 450 т/ч в течение 20–40 лет. В связи с этим разведка и освоение геотермальных водоносных пластов, содержащих воду

при температуре, достаточно высокой для получения годного к употреблению пара, является необходимым, но недостаточным условием для разработки этих пластов в качестве источника геотермальной энергии. Чтобы капиталовложения были оправданы, должны быть выполнена оценка общих ресурсов водоносного пласта и оптимальных расходов производительного пара в течение срока службы наземного оборудования.

Принято считать, что геотермальные бассейны могут пополняться поверхностными водами с некоторым естественным расходом. Следовательно, при добыче пара с расходом, равным или меньшим естественного притока, источник пара может оказаться практически неисчерпаемым. Добыча пара с более высоким расходом может привести к быстрому истощению источника. Определение расхода при естественном пополнении — задача непростая. В районах действующих месторождений проводились многочисленные геохимические, гидрологические и метеорологические исследования естественного пополнения бассейна. И хотя есть основания сомневаться, что естественное пополнение компенсирует чрезвычайно высокие локализованные расходы теплоносителя в некоторых месторождениях, мы не можем определить оптимальный расход теплоносителя для конкретного месторождения, являющийся решающим фактором правильной эксплуатации геотермальных ресурсов. Много полезных сведений можно получить из смежных областей исследования гидрологии и техники нефтяных и газовых бассейнов, также связанных с получением жидкостей и газов из пористых подземных образований.

Один из методов прогнозирования можно назвать "объемной оценкой". Общий объем бассейна оценивается по геологическим и геофизическим данным. Зная пористость и объемные насыщения пористой среды горячей жидкостью и паром, можно рассчитать исходную массу горячей воды и (или) пара. Оценки производительности скважин и притока воды в бассейн (полученные расчетным или экспериментальным путем) позволяют затем составить прогноз. К сожалению, объемная оценка пока была невозможна ни для одного из действующих геотермальных полей. Разработка этих площадей осуществлялась по методу проб и ошибок: сначала создавались и осваивались электростанции малой мощности, чтобы накопить опыт для перехода к более мощным станциям.

Второй метод прогнозирования заключается в математическом моделировании. Когда месторождение уже эксплуатируется и достигнут некоторый уровень производительности, может быть принята математическая модель бассейна. Затем размеры системы и производительность оцениваются путем сопоставления фактических показателей производства (масса и энтальпия добытого теплоносителя, давление и температура бассейна и теплоносителя) с соответствующими параметрами математической модели. Когда определен полный на-



Фиг. 5. Схема модели бассейна [11].

бор модельных параметров и установлены их соотношения, модель можно использовать для прогнозирования эксплуатационных характеристик других месторождений. Этот метод широко используется в нефтедобывающей и газодобывающей промышленности. Для геотермального месторождения такая модель была впервые описана в работе [11] и применена в Уайракей в Новой Зеландии.

Для создания модели геотермального бассейна необходимо определить массу и энтальпию добываемого теплоносителя. Кроме того, если в бассейне содержится пароводяная смесь, важную роль играет метод добычи. Теплоноситель может быть насыщенной жидкостью, насыщенным паром из "парового колшака" (фиг. 1, б) или комбинацией того и другого. Удельная энтальпия теплоносителя также меняется в широких пределах. В зависимости от начального состояния бассейна истощение теплоносителя может происходить по изотермическому или адиабатическому закону. И, наконец, горная порода характеризуется высоким теплосодержанием, которое может существенно влиять на процесс добычи.

На фиг. 5 показана модель бассейна, рассмотренная в работе [10]. Система содержит горную породу, воду и пар. Общий объем бассейна V , пористость ϕ . Добыча теплоносителя в данный момент выражается величиной W_p . Эта масса содержит количество тепла Q_p . Модель учитывает также потери тепла Q_L и потери массы теплоносителя W_L вследствие конвекции (фумаролы, горячие ключи и естественные скважины). Потери тепла вследствие теплопроводности Q на окраинах месторождения, вероятно, пренебрежимо малы и не оказывают воздействия на производительность бассейна в течение

периода, для которого составляется прогноз. Приток воды W_e , несущей тепловую энергию (полная энтальпия h_e), учитывается отдельно. Приток из прилегающего водоносного пласта может быть стабильным или переменным. Удельная энтальпия прибывающей в бассейн жидкости считается постоянной.

Анализ выполнен на основе метода безразмерного материального и энергетического баланса, используемого обычно в нефтедобывающей промышленности. При анализе приняты следующие предположения:

- 1) полное термодинамическое равновесие;
- 2) постоянное давление и равномерное насыщение теплоносителя;
- 3) равномерный отвод жидкости (жидкость производится всем объемом бассейна, а влиянием скважин можно пренебречь).

Совместное решение уравнения баланса массы, энергии и объемов приводит к выражению

$$\begin{aligned} (W_p (h_p - E_c) + W_L (h_L - E_c) + Q = W \{ E_i - E_c + [(1 - \phi)/\phi] [x_i v_{гв} + \\ + (1 - x_i) v_{fi}] (\rho_r C_{vr} (T_i - T_c) \} + (h_e - E_c) (B/v_{fe}) \sum Q_D (t_D) \Delta p_n, \end{aligned} \quad (1)$$

где h_p - энтальпия добываемого теплоносителя; W - начальная масса горячей воды и пара в объеме бассейна V ; E - внутренняя энергия; Q - тепловые потери вследствие теплопроводности; ϕ - пористость горной породы; x - весовое паросодержание; v - удельный объем; ρ_r - плотность породы и содержащегося в ней теплоносителя; C_{vr} - удельная теплоемкость при постоянном объеме породы бассейна и содержащегося в ней теплоносителя; T - температура; B - константа притока воды; $Q_D(t_D)$ - безразмерный общий приток, соответствующий безразмерному времени t_D ; Δp_n - перепад давления за время n . Индексы обозначают соответственно; p - добываемый теплоноситель; L - потери; c - текущее значение; i - начальное значение; r - бассейн; g - пар (газ); f - жидкость; e - приток. Для одной только жидкости под давлением уравнение (1) принимает вид

$$(W_p + W_L) v_f = W (v_f - v_{fi}) + B \sum Q_D (t_D) \Delta p_n. \quad (2)$$

Большинство подземных бассейнов связано с прилегающими водоносными горизонтами. По мере падения давления в бассейне из водоносного горизонта поступают новые порции воды. Для оценки зависимости эксплуатационных характеристик бассейна от времени необходимо определить количество жидкости, поступающей в бассейн из водоносного горизонта. Удобный метод расчета количества поступающей жидкости изложен в работе [10]. Безразмерный приток $Q_D(t_D)$ обычно является функцией геометрии потока в водоносном горизонте, свойств горной породы и теплоносителя, а также времени.

Уайтинг и Рэми /11/ вычислили $Q_D(t_D)$ для бесконечного водоносного горизонта трех гипотетических форм: плоской, радиальной и полусферической. Рассчитанные величины отнесены к единице градиента давления на границе бассейна с поверхностью водоносного горизонта. Обычно давление на этой границе изменяется со временем. Для учета фактического изменения давления на границе время эксплуатации разбивают на небольшие интервалы, в течение которых давление считается постоянным. Таким образом, действительная кривая давления заменяется ступенчатой (метод линейной суперпозиции). Приток воды \dot{W}_e в данный момент определяется выражением

$$\dot{W}_e = [B \Delta p_n Q_D(t_D)] / \nu_{fe} \quad (3)$$

где Δp_n - перепад давления, а $Q_D(t_D)$ - соответствующий приток. Суммарный приток воды равен

$$W_e = B / \nu_{fe} \sum Q_D(t_D) \Delta p_n \quad (4)$$

Чтобы использовать уравнение (1) для прогнозирования эксплуатационных характеристик бассейна, необходимо определить ряд параметров бассейна: размеры и тип водоносного горизонта, начальные размеры бассейна, пористость и проницаемость водоносного горизонта, начальное давление и температуру. Как правило, имеется большой набор экспериментальных данных, который может быть использован для расчета требуемых констант. Обычно требуется проанализировать уравнение материального баланса методом наименьших квадратов. С помощью этого метода по величинам, дающим минимальные суммы квадратов разности между измеренным и расчетным давлением, определяются оптимальные значения количества жидкости в бассейне, констант водоносного горизонта, размеров бассейна и т. д.

Определив необходимые константы системы, можно проанализировать будущие эксплуатационные характеристики бассейна для любой предполагаемой зависимости производительности от времени, а также ожидаемую рентабельность различных гипотетических режимов работы.

Приведенный выше анализ процессов, происходящих в бассейне, свидетельствует о том, что некоторые из принципиальных предположений, принятых в уравнении материально-энергетического баланса (1), должны быть заменены менее строгими для реальных систем. Как уже отмечалось, требуется дополнительная информация о термодинамических характеристиках. Необходимо отметить, что уравнение (1) не учитывает изменения давления и температуры внутри бассейна, а также разделения жидкости на фазы. Однако учет этих эффектов - вполне разрешимая проблема. В работах /1, 3/ уравнение материально-энергетического баланса было успешно использовано

применительно к экспериментам в лабораторных условиях, но в обеих работах было установлено, что уравнение необходимо применять отдельно для паровой зоны и зоны пароводяной смеси, чтобы учесть разность температур между этими двумя зонами.

Заключение

Стимулирование добычи теплоносителя из гидротермальных горизонтов для получения пара и выработки электроэнергии технически осуществимо. Возможно несколько перспективных методов добычи, позволяющих оптимизировать процессы высвобождения тепла, заключенного в геотермальном водоносном горизонте. Необходимы дальнейшие исследования не только для изучения этих методов, но также и для разработки метода оценки изменения потенциальных ресурсов месторождения в течение времени эксплуатации бассейна, необходимого для того, чтобы оправдать капиталовложения.

Возможность оценки экономичности стимулирования геотермальных ресурсов с помощью взрыва и определения оптимальных способов получения пара зависит от совершенствования методов геотермальной техники. Методы оптимального извлечения теплоносителя должны опираться на всесторонние знания механизмов извлечения теплоносителя из бассейна, включая расширение жидкости, ее испарение и разделение на фазы (гравитационная сепарация), а также приток воды из соседних и нижележащих водоносных горизонтов. Следует также учитывать осаждение и извлечение солей, а также воздействие на окружающую среду, вызванное взрывом и последующей добычей теплоносителя. Таким образом, для строгого применения методов стимулирования геотермальных водоносных горизонтов требуется изучение большого числа теплофизических, гидродинамических и химических параметров. Эти параметры следующие.

Теплофизические: температура воды и горной породы; энтальпия отработанной жидкости; давление и температура пара; тепловые характеристики отработанной жидкости; реакция бассейна на циркуляцию воды.

Гидродинамические: уровень давления насыщенного пара в скважине; производительность в зависимости от давления в устье скважины; производительность в зависимости от времени; производительность в зависимости от уровня давления насыщенного пара в скважине; общие запасы бассейна.

Химические: состав жидкости водоносного горизонта; состав добываемого теплоносителя; паросодержание в устье скважины; отложение солей в буровой скважине; химическое воздействие отработанной жидкости.

Хотя уже имеются многочисленные фундаментальные исследования, необходимы дополнительные аналитические, лабораторные и по-

левые исследования для окончательного вывода о целесообразности стимулирования геотермальных месторождений с помощью взрыва.

Литература

1. Bilhartz H.L., Jr., Fluid production from geothermal steam reservoirs, MS report, Stanford University, Stanford, Calif., 1971.
2. Blume J.A., Ground motion effects, In Proc. Symp. Public Health Aspects of Peaceful Uses of Nuclear Explosives, SWRHL-82, 1969.
3. Cady G.V., Model studies of geothermal fluid production, Ph. D. dissertation, Stanford University, Stanford, Calif., 1969.
4. Calhoun J.C., Lewis M., Newman R.C., Experiments on the capillary properties of porous solids, *Trans. AIME*, **186**, 189–196 (1949).
5. Carlson R.H., Utilizing nuclear explosives in the construction of geothermal power plants, Proc. Second Plowshare Symposium, UCRL-5677, 1959.
6. Donaldson I.G., The flow of steam/water mixtures through permeable beds: A simple simulation of a natural undisturbed hydrothermal region. *New Zealand J. Science*, **11**, No. 1, 3–23 (1968).
7. Kennedy G.C., A proposal for a nuclear power program, Proc. Third Plowshare Symposium, TID-7695, 1964.
8. Kruger P., Nuclear explosion engineering, In McGraw-Hill yearbook of science and technology, New York, McGraw-Hill, 1972.
9. Raghavan R., Ramey H.J., Jr., Kruger P., Calculation of steam extraction from nuclear-explosion fractured geothermal aquifers, *Trans. Am. Nucl. Soc.*, **14**, 695 (1971).
10. van Everdingen, A.F., Hurst W., The application of the Laplace transformation to flow problems in reservoirs, *Trans. AIME*, **186**, 305–324 (1949).
11. Whiting, R.L., Ramey H.J., Jr., Application of material and energy balances to geothermal steam production, *J. Petrol. Techn.*, **21**, 893–900 (1969).

14. СОЗДАНИЕ И РАЗВИТИЕ ТРЕЩИН В ГОРЯЧИХ ГОРНЫХ ПОРОДАХ

М. Смит, Р. Поттер, Д. Браун, Р.Л. Амодт¹⁾

В Соединенных Штатах Америки потребление энергии в текущем столетии удваивалось каждые 28 лет, выработка же электроэнергии, за исключением гидроэлектрической, удваивалась каждые 8 лет. Влияние на окружающую среду производства энергии, в особенности бурно развивающегося производства электроэнергии, вызывает в настоящее время серьезную озабоченность. Современные электростанции — это крупные сооружения, поэтому намечается тенденция вынесения их за пределы городов. Однако линии передачи энергии к потребителю в настоящее время занимают в США площадь, превышающую территорию шт. Коннектикут /9/. Столь же огромные площади заняты разработками месторождений открытым способом, главным образом при добыче угля /9/. Очевидно, что рост производства электроэнергии должен вскоре затормозиться, и необходимы более совершенные методы ее выработки и распределения.

Производство геотермальной энергии является многообещающим как наиболее безопасное для окружающей среды. При условном разделении развития этого вида энергетики на 3 этапа, установленных авторами работы /1/, Соединенные Штаты в настоящее время находятся на первом этапе, когда геотермальная энергия используется только в тех местах, где имеются ее проявления на поверхности. Следующим этапом будет развитие геотермальных ресурсов в различных крупных районах, где геотермический градиент в несколько раз превышает норму; такие районы занимают $\sim 1/10$ земной поверхности /1/, а в США они простираются на сотни тысяч квадратных километров вокруг Мексиканского залива и на западе страны. На третьем этапе будут разрабатываться более глубокие месторождения с нормальным геотермическим градиентом, составляющим ~ 30 град/км. На каждом последующем этапе будет уменьшаться потребность в линиях передачи благодаря размещению геотермальных установок ближе к потребителю. По мере сокращения этого расстоя-

¹⁾ Все авторы из Лос-Аламосской научно-исследовательской лаборатории Калифорнийского университета, Лос-Аламос, шт. Нью-Мексико.

ния эффективность использования геотермальной энергии будет возрастать, поскольку станет экономически выгодным подавать горячую воду непосредственно к потребителю для обогрева, охлаждения или организации промышленных процессов. Опыт Исландии показывает, что непосредственное использование горячей воды эффективно на расстояниях до 65 км /3/. Холодильные системы, в которых вода используется в качестве хладагента, раствор бромипа лития в качестве абсорбента и горячая вода в качестве источника энергии, с успехом применялись в Новой Зеландии /2/, а в Советском Союзе такие системы используются в качестве тепловых насосов в холодную погоду /15/. Непосредственное использование геотермальных теплоносителей с невысокой температурой значительно увеличивает эффективность геотермальных энергосистем.

Широкому использованию геотермальной энергии будет способствовать разработка способа ее извлечения из горячих относительно сухих горных пород путем циркуляции жидкости, вводимой с поверхности через породу, и извлечения подогретой жидкости (вероятнее всего, воды) обратно на поверхность. Общие представления о том, как это можно осуществить, излагаются в настоящей статье.

Гидравлический разрыв. Общие понятия и возможности

Идея использования тепла медленно остывающих лавовых потоков не нова. Авторы работы /8/ описывают возникающие при этом трудности. Они рассматривают сферическую полость радиусом 1,2 м в глубине древнего пласта с температурой 260°C. В эту полость с поверхности земли по трубе закачивается вода, а пар извлекается по другой трубе с таким расходом, что температура воды в полости поддерживается на уровне 150°C. Вырабатываемая мощность со временем падает и после первой недели составляет 7,09 кВт. Чтобы в подобных условиях выработать 100 МВт мощности, радиус полости должен составлять 200 м. Хотя такая система не особенно привлекательна, вероятно, можно легко обеспечить такую же площадь поверхности для отбора тепла методом гидравлического разрыва /5/, изменив геометрию системы.

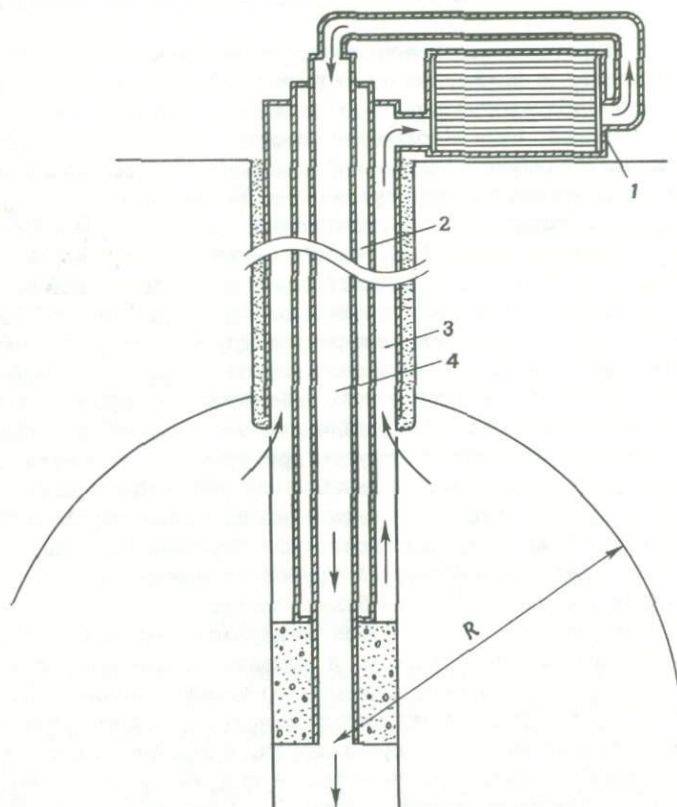
Гидравлический разрыв осуществляется путем нагнетания воды в буровую скважину. Когда скважина окажется под достаточным давлением, вдоль нее образуются протяженные трещины. Разрыв будет расти по мере закачивания воды, пока ее расход будет превосходить утечки через проницаемую горную породу. Такой метод еще не испытывался в горячем граните, но, по мнению специалистов, он может оказаться эффективным. Моделирование с помощью счетно-решающего устройства процесса гидравлического разрыва, выполненное в Лос-Аламосской научно-исследовательской лаборатории /7/, показывает, что тепловые напряжения, вызванные локальным сжатием

породы по мере ее охлаждения поступающей водой, будут вызывать дополнительные трещины, которые могут самостоятельно распространяться. Следует ожидать, что структура трещин может оказаться более сложной, чем в холодной породе.

Циркуляцию рабочей жидкости, используемой для извлечения геотермальной энергии, можно осуществить несколькими способами. Первый способ заключается в том, чтобы установить систему коаксиального течения (фиг. 1) в той же скважине, которая была использована для создания гидравлического разрыва, увеличив ее диаметр. Затруднения связаны с установкой труб, но зато нам известно, где находится основание возвратной трубы, и можно обеспечить его расположение в верхней части бассейна, осуществив перед размещением центральных труб серию небольших перекрывающихся разрывов, начиная от дна до верхней части неукрепленной скважины. Однако там, где не слишком трудно пробурить вторую скважину и внедриться в верхнюю часть разрыва на расстоянии около 60 м выше конца первой трубы, вероятно, можно будет широко использовать двухскважную циркуляционную систему, представленную на фиг. 2. (Система с коаксиальной трубой оказывается эффективной еще в одном случае, о котором будет сказано ниже.)

Если система трещин способна выдержать вес столба горячей воды, достигающего поверхности, и дополнительное давление, необходимое для предотвращения кипения, то можно использовать цикл, в котором горячая вода поднимается кверху, проходит через теплообменник, расположенный на поверхности, и возвращается в бассейн. Из приложения А видно, что по одной и той же трубе можно передать на поверхность по крайней мере в 10 раз больше тепловой энергии, если рабочей жидкостью является вода, а не перегретый пар. Хотя пар выносит на поверхность меньше растворенных твердых веществ по сравнению с водой, однако растворенные газы, такие, как двуокись серы, представляют более серьезную проблему в паровых системах, тогда как в системах с горячей водой газ остается растворенным в воде, пока она проходит без испарения через теплообменник и поступает в возвратную трубу. Другим важным преимуществом полной системы является то, что вязкость воды падает с ростом ее температуры, тогда как для перегретого пара справедлива обратная зависимость (фиг. 3). Таким образом, высокотемпературная вода стремится циркулировать по самому нагретому контуру при прочих равных условиях, тогда как пар избирает самый холодный контур. Это становится особенно важным, если полость растет вследствие растрескивания под действием тепловых напряжений.

Системы с горячей водой сохраняют свои преимущества, даже если потери воды в трещиноватых породах при полном давлении очень

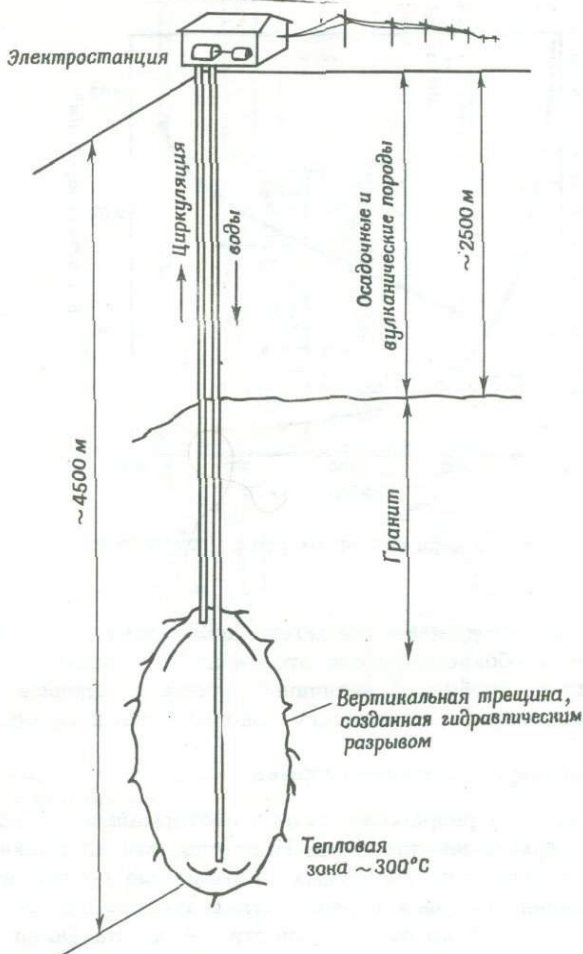


Фиг. 1. Циркуляционный контур с коаксиальными трубами.

1 — теплообменник; 2 — изоляция; 3 — горячая вода; 4 — холодная вода; R — радиус разрыва.

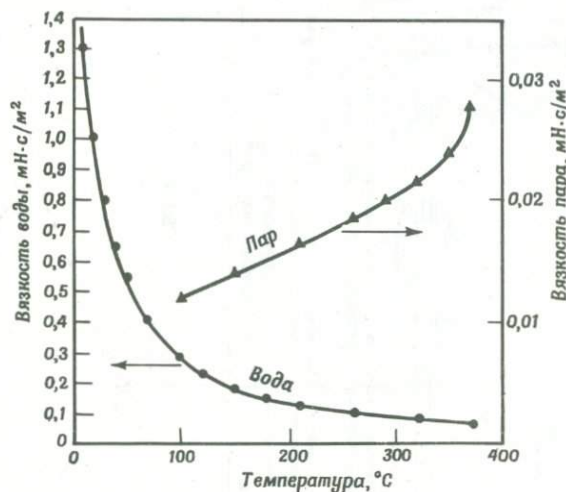
велики. При современном уровне техники вполне возможно создание подземных насосов для глубоких скважин, способных выдержать высокую температуру и давление [14]. Если такой насос установить в линию с горячей водой, давление в бассейне можно уменьшить при неизменном давлении на поверхности. Расход холодной воды в возвратной трубе можно поддерживать на уровне, соответствующем требуемому давлению в бассейне.

Возвращаясь к геометрии с коаксиальным течением, мы видим теперь дополнительное преимущество, о котором упоминалось выше: насос, установленный в линию с горячей водой, может приводиться в движение турбиной, установленной в линии с холодной водой (фиг. 4) без дополнительных затрат энергии с поверхности. На одной и той



Фиг. 2. Циркуляционный контур с двумя скважинами.

же глубине давление в линии с горячей водой отличается от давления в линии с холодной водой вследствие различия плотностей горячей и холодной воды. Изменение давления с глубиной в горячей и холодной линиях представлено на фиг. 5; на поверхности давление в обеих линиях одинаковое и составляет 20 МН/м^2 . Для указанных температур разность давлений на глубине 4,5 км составляет 14 МН/м^2 . Именно эта разность давлений обеспечивает циркуляцию воды; согласно результатам расчета на вычислительной машине, на практике в большинстве случаев придется осуществлять дросселирование в трубе с холодной водой с помощью клапана, расположенного на поверхности.



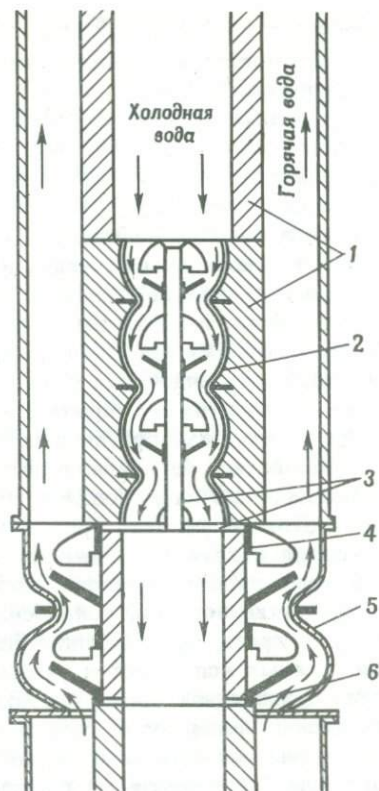
Фиг. 3. Вязкость воды и пара в зависимости от температуры.

Естественный избыток давления можно использовать для приведения в действие турбонасоса. Если это давление слишком низко, для его увеличения до требуемой величины в линии с холодной водой на поверхности может потребоваться дополнительный насос.

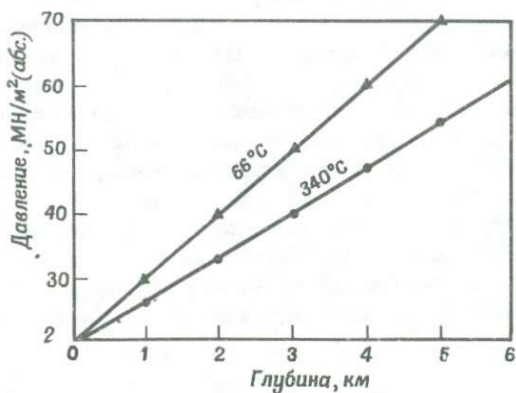
Осуществление гидравлического разрыва

Первым шагом в разработке сухого геотермального бассейна является выбор подходящей площадки. Вероятно, эта площадка должна располагаться в одном из известных районов, где геотермический градиент аномально высок и горячие вулканические породы расположены не слишком глубоко от поверхности земли. На западе Соединенных Штатов Америки имеется много мест, включая окрестности Лос-Аламоса в шт. Нью-Мексико, удовлетворяющих этим требованиям.

Если, например, достаточно высокая температура горной породы ($\sim 315^{\circ}\text{C}$) достигается на глубине 4,5 км (а этого можно ожидать на большей части западной трети территории США), то данный бассейн вскрывается бурением до этой глубины. Скважина укрепляется обсадной стальной трубой, которая цементируется обычными методами. Поскольку нижняя часть скважины находится в горячей изверженной породе, эти операции более сложны, чем бурение и укрепление обычных нефтяных скважин. Но при использовании циркулирующей жидкости для охлаждения буровой головки и извлечения грунта бурение можно осуществлять обычными установками роторного бурения. Имеются



Фиг. 4. Турбонасос для использования в коаксиальном циркуляционном контуре. 1 — изоляция; 2 — турбина; 3 — нержавеющая сталь; 4 — уплотнение; 5 — насос; 6 — опора и уплотнение.



Фиг. 5. Давление в трубах с горячей и холодной водой в зависимости от глубины при давлении на поверхности 20 МН/м^2 .

также подходящие промышленные материалы для крепления обсадными трубами и цементирования.

Для облегчения понимания последующего поведения подземной системы трещин необходимо как можно полнее исследовать особенности горной породы и скважины, прежде чем начинать ее крепление.

В соответствии с принятыми в буровой технике методами обсадная труба перфорируется в сечении, расположенном на расстоянии в несколько сотен футов от основания скважины, и временно перекрывается выше этого уровня. С помощью насосов высокого давления, расположенных на поверхности, и линии высокого давления, проложенной через эту заделку, в наглухо закрытой части скважины создается давление жидкости, достаточное для осуществления гидравлического разрыва. Через отверстия и открытую часть скважины это давление ($\sim 50 \text{ МН/м}^2$ сверх гидростатического давления в данном сечении) оказывает воздействие на прилегающую к скважине горную породу, вызывая растягивающие напряжения в породе, достаточные для ее растрескивания. Для расширения трещин, как правило, требуются значительно меньшие напряжения, чем для ее образования. Поэтому, если образование трещин началось, прокачка продолжается при уменьшенном давлении до тех пор, пока основные трещины не расширятся до требуемого радиуса. Математический анализ согласуется с результатами полевых испытаний и указывает на то, что результирующая трещина приобретает форму вертикально ориентированного диска с эллиптическим поперечным сечением¹⁾ (фиг. 2). Поскольку трещины заполнены водой, можно ожидать, что давление жидкости в трещинах будет удерживать их раскрытыми без дополнительного давления.

На расстоянии ~ 60 м от первой скважины бурят вторую скважину такого же диаметра, пересекающую верхний свод системы трещин, созданной гидравлическим разрывом в первой скважине. Ориентацию трещин можно было бы определить прослушиванием шумов с помощью перемещаемых геофонов /10/. Если это невозможно сделать, следует определить ориентацию трещин в начале процесса гидравлического разрыва. Если по каким-либо причинам вторая скважина не пересекает систему трещин, то после крепления и цементирования этой скважины можно повторить гидравлический разрыв на дне второй скважины для создания второй системы трещин, пересекающей первую. Было предложено несколько вариантов процесса гидравлического разрыва, включающих: гидравлический разрыв со дна первой скважины, обеспечивающий связь между этой зоной и системой трещин, созданной предыдущим разрывом на более высоком уровне;

¹⁾ В горячих породах этого может и не быть, в чем мы убедимся ниже в связи с расчетами на вычислительной машине.

гидравлический разрыв в двух скважинах одновременно; гидравлический разрыв в незакрепленной части забоя скважины. Выбору того или иного способа должен предшествовать тщательный анализ и согласование действий специалистов по бурению и гидравлическому разрыву. Однако описанный выше относительно простой способ обеспечивает высокую вероятность создания системы взаимосвязанных трещин.

После бурения второй скважины насос на поверхности используется для нагнетания холодной воды в более глубокую скважину через созданную подземную систему трещин и подачи воды вверх по менее глубокой скважине. Когда установится умеренная разность температур между закачиваемой холодной водой и извлекаемой горячей водой, циркуляция в системе поддерживается путем естественной конвекции и прокачку прекращают (не считая закачки некоторого дополнительного количества воды, необходимого для пополнения системы водой). В приложении Б будет показано, что на 1 ГДж энергии, извлеченной из горной породы, образуется пустота объемом 7–14 дм³. При ежесуточном высвобождении из горных пород 100 МВт тепловой мощности для заполнения образующихся пустот требуется 100 м³ подпитывающей воды, даже если из бассейна не происходит утечек.

Как уже упоминалось выше, для выработки 100 МВт тепловой мощности из относительно холодной (260^oC) массы горной породы требуется площадь, равная поверхности сферы радиусом 200 м. Следовательно, система трещин радиусом 300 м является вполне достаточной. Если создать систему трещин радиусом 900 м в горной породе с температурой 300^oC, то можно извлекать в среднем 89 МВт тепловой мощности в течение 20 лет /12/. Вероятно, такая оценка слишком занижена, поскольку не учитывались эффекты растрескивания от тепловых напряжений, которые мы рассмотрим ниже.

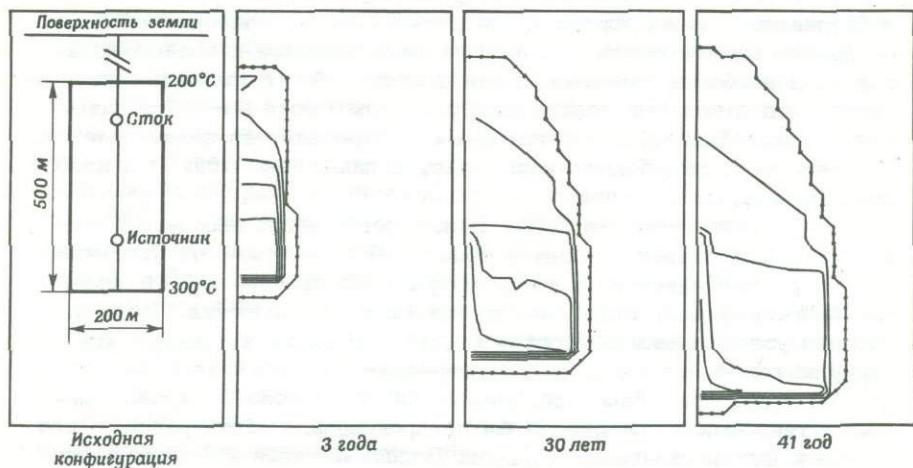
Растрескивание под действием тепловых напряжений

В приложении Б дан расчет объема полости, образующейся в результате извлечения из горной породы 1 ГДж тепловой энергии. Этот объем в первом приближении не зависит от падения температуры. При линейном возрастании температуры с глубиной горная порода, растрескивающаяся под действием теплового сжатия, должна охлаждаться до определенной доли первоначальной температуры, не зависящей в первом приближении от глубины (приложение В). Если геотермический градиент велик, то эта доля близка к единице, но при небольшом геотермическом градиенте она может стать настолько малой, что теплового растрескивания не произойдет или оно будет протекать очень медленно. Некоторые специалисты выражали сомне-

ние в том, что гранитные породы будут растрескиваться при охлаждении, считая, что при этом увеличивается пористость, которая, однако, не обязательно приводит к увеличению проницаемости.

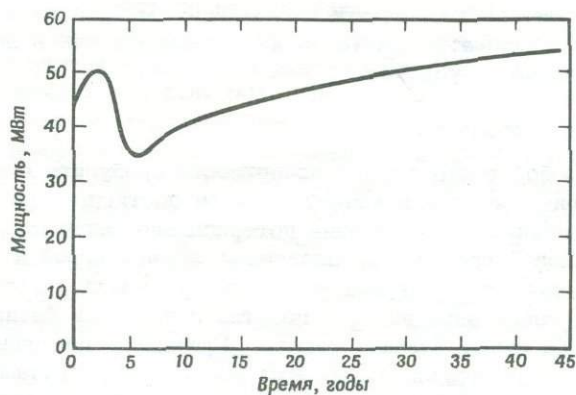
Во всяком случае, когда гранитный куб со стороной 30 см медленно нагревали до температуры ~ 320 С в течение нескольких дней, а затем печь отключали и к одной из сторон подводили воду, большие протяженные трещины появлялись примерно через 20 мин. Такие же результаты были получены в опытах с базальтом. Поэтому следует ожидать, что благодаря пустотам, образуемым при охлаждении, горячая монолитная горная порода будет растрескиваться, и если новые трещины достаточно проницаемы, срок службы бассейна заметно увеличится. Число, а следовательно, и поверхность трещин могут распределяться в горной породе различным образом. Если образуются параллельные трещины, то их проницаемость пропорциональна квадрату расстояния между трещинами l^2 . Уменьшение вязкости с температурой, по-видимому, способствует возникновению циркуляции по вновь образованным трещинам. В конечном счете бассейн будет, вероятно, наиболее интенсивно увеличиваться в своей донной части, где самая холодная вода воздействует на самую горячую породу.

Расчет поведения бассейна на вычислительной машине. Хотя процессы, происходящие при циркуляции воды через массу трещиноватой породы, сами по себе просты, при их взаимодействии картина усложняется. Такие задачи вполне доступны для численного расчета на ЭВМ; программа такого расчета с учетом потока тепла через горную породу, охлаждения, сжатия и растрескивания породы, а также увеличения бассейна была составлена Харлоу и Прахтом, сотрудниками Лос-Аламосской лаборатории. Программа учитывает также теплопередачу в воде, температуру, плотность, вязкость и скорость течения воды. Неизвестные факторы, такие, как расстояние между трещинами, включались в варьируемые параметры, так что можно было установить изменение поведения полости в зависимости от этих неизвестных факторов. Как и следовало ожидать, расчеты показывают, что бассейн увеличивается преимущественно в своем основании и по периферии, если расстояние между трещинами не очень мало (~ 1 см и менее). На фиг. 6 показаны типичные контуры объемов породы с одинаковой пористостью в различные моменты времени при расчетном расстоянии между трещинами ~ 5 см. На фиг. 7 для этой модели показано изменение во времени производимой мощности. Начальный рост мощности происходит при нагреве свода полости снизу, следующее затем уменьшение производимой мощности в конце концов компенсируется ростом полости, а дальнейшее возрастание полости происходит до более высокого по сравнению с первоначальным уровня. В этом расчете расход жидкости принимался постоянным и равным 100 л/с или ~ 8700 м³/сут.



Фиг. 6. Контуры объемов породы одинаковой пористости согласно расчету на ЭВМ.

Внешняя линия показывает рост исходного контура. Сток на исходном контуре соответствует выходу нагретой воды, а источник – входу холодной воды.



Фиг. 7. Мощность в зависимости от времени при постоянной скорости циркуляции.

Расчеты, выполненные для одиночной тонкой трещины, когда растрескивание под действием теплового напряжения не происходит, подтверждают, что такие трещины действительно могли бы в течение нескольких десятилетий обеспечивать выработку десятков мегаватт тепловой мощности. Однако в процессе образования первоначаль-

ной трещины горная порода охлаждается. Тепловые напряжения будут создавать новые трещины, преимущественно вблизи первой трещины, где вода наиболее холодная, и эти трещины могут также распространяться под действием возникающего в этом месте высокого давления. Таким образом, когда начальное растрескивание заканчивается, бассейн, вероятно, больше напоминает цилиндр, чем тонкую и плоскую трещину.

Геохимические особенности. Большинство природных минералов хорошо растворяется в горячей воде, и их растворимость увеличивается с ростом давления и температуры. Это явление может иметь как благоприятные, так и неблагоприятные последствия. Если бы бассейн увеличивался в сторону своего основания и температура циркулирующей воды становилась бы выше начальной температуры породы в исходном бассейне, расширение приводило бы к перекрытию тепловых трещин, если бы не происходило растворения, а возможно и переосаждения минералов. Поднимающаяся на поверхность вода будет содержать минералы, которые могут разъесть и закупоривать теплообменник. Однако некоторые из них могут иметь промышленное значение и извлечение их из воды может оказаться выгодным. Несомненно, что если мы хотим понять и использовать процесс теплового трещинообразования, необходимо выполнить тщательное исследование растворимости и осаждения минералов в растворах при реальных температурных условиях и давлении как в лабораторных, так и в полевых условиях.

Экономические соображения

Если в любой точке земной поверхности пробурить скважину на большую глубину, то она в конечном счете достигнет горных пород, достаточно горячих для создания потенциально выгодного источника энергии. Тепловой бассейн, образованный земной корой и мантией, велик, и существует всюду под поверхностью Земли. Описанный выше общий метод извлечения энергии из этих источников базируется исключительно на существующей технике. Главный нерешенный при этом вопрос — можно ли использовать этот метод или различные его варианты для извлечения энергии из горячих сухих горных пород в удобной форме с достаточно высокой мощностью и с затратами, которые соизмеримы со стоимостью выработки электроэнергии из других источников.

Вода при температуре 90–150°C применяется во многих важных процессах, включая отопление помещений, дистилляцию воды и химическую технологию. Во многих случаях для этих целей могла бы оказаться экономически выгодной эксплуатация относительно низкотемпературных геотермальных источников (действительно, они уже используются в некоторых районах земного шара). Однако в настоящее

время интерес к геотермальной энергии проявляется главным образом потому, что она представляет собой новый, не загрязняющий окружающую среду источник электроэнергии. Поэтому при обсуждении экономичности искусственных геотермальных систем предполагают, что тепловая энергия будет полезной, если она доставляется на поверхность при температуре, достаточно высокой, чтобы обеспечить работу генераторов электроэнергии. Минимальная температура, необходимая для работы тепловой электростанции, здесь принята равной 260°C , хотя имеются системы, действующие при более низких температурах. Вероятно, вскоре появятся системы с изобутановым циклом, работающие при температуре 170°C и ниже (гл. 8).

С учетом современного уровня техники бурения следует также предположить, что для достижения достаточно горячей породы, по-видимому, нецелесообразно бурение скважин глубиной более 6 км (это ограничение, вероятнее всего, временное).

Последнее предположение состоит в том, что отработанное тепло от электростанции, вероятно, будет рассеиваться в атмосферу теплообменниками с принудительным воздушным охлаждением. Они более дороги, чем градирни, но сберегают значительное количество воды и исключают тепловое загрязнение озер и рек. (Единственным источником загрязнения от содержащей энергию системы будут поднимающиеся потоки теплого воздуха, которые, возможно, не окажут значительного воздействия на окружающую среду.)

На этой основе были выполнены предварительные оценки стоимости действующей в западном районе США типичной паровой электростанции мощностью 100 МВт. Обычно для обеспечения необходимым количеством тепловой энергии от геотермального источника требуется пробурить две пары скважин глубиной 4,5 км, достигающих породы с температурой $\sim 300^{\circ}\text{C}$. Стоимость станции, включая сооружение подземной циркуляционной системы, оценивается в 186 долл/кВт производимой мощности, а стоимость выработки электроэнергии составляет $\sim 4,7 \cdot 10^{-3}$ долл/(кВт·ч) на сборательных шинах. Даже если эти оценки занижены вдвое, что маловероятно, такая система может конкурировать с атомными электростанциями и станциями на ископаемом горючем.

Хотя в восточных районах США температура глубоко залегающих пород обычно значительно ниже, чем в западных, тем не менее на востоке страны имеются большие районы /16/, в которых на глубине менее 6 км температура горных пород может превышать 170°C . Были выполнены оценки стоимости для типичных условий, при которых потребовалось бы пять пар скважин глубиной 5,5 км для обеспечения энергией в виде воды с температурой 170°C электростанции мощностью 100 МВт, на которой используется изобутановый цикл (гл. 8). Из-за высокой стоимости бурения десяти глубоких скважин

стоимость станции также очень высока (316 долл/кВт) и превышает стоимость электростанции на угле, приближаясь к стоимости атомной электростанции. Но поскольку стоимость горючего по существу составляет лишь амортизационные расходы подземной системы, стоимость выработки электроэнергии оценивается всего в $8 \cdot 10^{-3}$ долл./кВт.ч). Даже если эти оценки выполнены с ошибкой в 50%, все же оказывается, что эксплуатация геотермальных систем данного типа может быть конкурентоспособной в большинстве восточных районов США.

Предлагаемые эксперименты

Технические и экономические аспекты развития сухих геотермальных энергетических систем, по-видимому, достаточно благоприятны, чтобы оправдать проведение полевых испытаний, которые должны продемонстрировать техническую осуществимость и работоспособность такой системы, а также изучить ее проблемы и экономику. Эксперимент такого рода был предложен Комиссии по атомной энергии США, и в течение нескольких месяцев производилась разведка подходящей площадки.

На основе собранных геологических данных и измерений тепловых потоков в ряде пробуренных для этих целей скважин было установлено, что особенно пригодным для полевых испытаний является район в горах Хемес /13/, расположенный в 3–8 км к западу от Валлес–Кальдеры и в 50 км к западу от Лос–Аламосской научно-исследовательской лаборатории. Геологическое строение здесь сравнительно несложное; глубина до гранитного основания составляет ~750 м, а геотермический градиент в 6–10 раз больше обычного. Для изучения тепловых потоков, литологии, гидрологии и проблем бурения в этом районе недавно была пробурена исследовательская скважина глубиной 740 м. Предполагается пройти этой скважиной стеновую толщу гранита с непрерывным отбором керна, чтобы исследовать характерные особенности, возможную мощность пласта, температуру и теплопроводность гранита, а также осуществить предварительные эксперименты по гидравлическому разрыву и герметизации. Если будет обнаружено, что порода фундамента способна выдерживать систему под давлением, то будет выбрана конкретная площадка для разработки экспериментальной подземной циркуляционной системы.

Предварительные измерения тепловых потоков свидетельствуют, что в этом районе температуру горной породы ~260–315°C можно ожидать на глубине 2,3 км, что не является необычным для областей позднего вулканизма. Примерно на этой глубине предполагается создать циркуляционный контур общего типа, изображенный на фиг. 2, но с относительно небольшим гидравлическим разрывом радиусом ~450 м и с отбором сбрасываемого в атмосферу тепла в теплообменнике с воздушным охлаждением.

Уже само создание такой системы циркуляции за счет конвекции является важным доказательством ее осуществимости. Работа контура приблизительно в течение 10 мес вначале с относительно малой теплоотдающей поверхностью покажет, является ли система просто затухающей или, напротив, самоподдерживающейся благодаря совместному влиянию растрескивания под действием тепловых напряжений и теплового потока от расположенной внизу магматической породы. Непрерывная циркуляция в течение последующих 2–3 лет позволит провести подробное изучение теплового, химического и механического режимов системы и ее экономичности. Конечно, следует ожидать возникновения таких проблем, как потери жидкости в естественных порах и кавернах и закупорка циркуляционных каналов отложениями минералов. Тем не менее можно надеяться, что будут найдены технические решения этих проблем.

Научные исследования будут составлять существенную часть этого эксперимента. Уже составлен длинный перечень одновременно выполняемых и последовательных программ, которые следует осуществить для усовершенствования системы и проверки различных методов эксплуатации. Однако основной целью этого первого крупного эксперимента будет практическая задача – доказать, что новая не загрязняющая атмосферу геотермальная энергосистема сможет производить экономически выгодную энергию в ближайшие 10 лет, а в ближайшие 20 лет поможет значительно облегчить решение энергетической проблемы и проблемы охраны окружающей среды.

Приложения

А. Сравнение переноса энергии из бассейнов сухого пара и с горячей водой

Паровой цикл. Перегретый пар из бассейна глубиной 3 км с температурой 338°C подается на поверхность по трубе с внутренним диаметром d , достигая состояния сухого насыщенного пара при давлении P . По таблицам насыщенного пара определяем энтропию при давлении P . Поскольку течение изэнтропическое, по таблицам перегретого пара можно определить давление, соответствующее той же самой энтропии при температуре бассейна. Затем интерполяцией по известным значениям давления и энтропии можно определить удельный объем \tilde{V} . Эмпирическое выражение для потока пара имеет следующий вид /4/:

$$\delta P (H/M^2) = 1,71 W^2 L V [(d + 9,15) / d^6], \quad (A1)$$

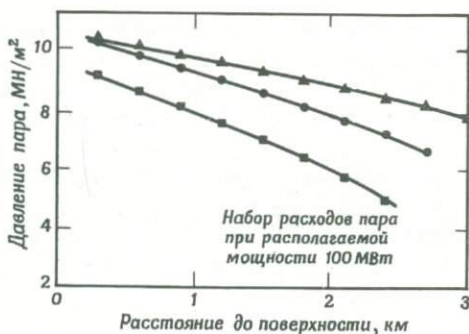
где L – длина, м; d – внутренний диаметр трубы, см; W – расход, кг/с; V – удельный объем, м³/кг. В табл. А1 представлены результаты расчета по формуле (А1) при изложенных выше предположениях и условиях.

Таблица А1

Расчет парового цикла с учетом принятых условий
и предположений

| Параметр | Предполагаемое давление на поверхности (сухой насыщенный пар) | |
|--|---|------------------------|
| | 6,9 МН/м ² | 5,44 МН/м ² |
| Энтропия, кДж/(кг град) | 5,815 | 5,920 |
| Энтальпия, МДж/кг | 2,78 | 2,79 |
| Энтальпия после из- энтропического рас- ширения до 65,6°С, МДж/кг | 1,94 | 1,975 |
| Располагаемая энергия, МДж/кг | 0,83 | 0,815 |
| Расход, кг/с | 120 | 123 |
| Первоначальный удель- ный объем, м ³ /кг | 0,025 | 0,029 |

В этих расчетах длина L была разбита на 10 равных участков. Для каждого участка вычисляется удельный объем \tilde{V} . Для определения расхода при мощности 100 МВт была вычислена разность энтальпий насыщенного пара при давлении на поверхности P и после его изэнтропического расширения до температуры 65,6°С (темпе-



Фиг. 8. Изменение давления пара с расстоянием до поверхности

| | | | |
|--|-----|-----|------|
| Обозначение | ● | ▲ | ■ |
| Предполагаемое давление, МН/м ² | 6,9 | 6,9 | 5,44 |
| Диаметр трубы, мм | 305 | 330 | 305 |

ратура на выходе из турбины); затем полученная разность была разделена на 100 МВт. На фиг. 8 показано, что труба диаметром 305 мм не вполне достаточна для выработки 100 МВт мощности при предполагаемых условиях, тогда как труба диаметром 330 мм оказывается подходящей.

Водяной насос. Вода из бассейна с температурой 338°C вытекает на поверхность по трубе диаметром 305 мм. После прохождения через теплообменник вода течет вниз по такой же трубе с температурой 65,6°C. Разность давлений у основания горячей и холодной труб равна 9,64 МН/м² (фиг. 5). Часть этой разности составляет падение давления в теплообменнике и в бассейне. Предположим, что для преодоления сопротивления труб требуется напор 6,9 МН/м², создаваемый при необходимости насосом. Как видно из фиг. 3, вязкость воды при температуре 338°C составляет 1/12 вязкости при 15°C, а при температуре 65,6°C вязкость составляет примерно 1/2 вязкости при 15°C. В пределах точности данного сравнения водяного и парового потоков разность давлений можно принять равной сопротивлению только одной из труб, предполагая, что вода в ней имеет температуру 15°C. Расход воды в гладкой трубе диаметром d (см), длиной L (м), при разности давлений $P_1 - P_2$ (Н/м²) определяется по формуле /4/

$$Q \text{ (кг/с)} = 1,5 \cdot 10^{-3} d^{2,63} [(P_1 - P_2) / L]^{0,54}. \quad (\text{A2})$$

Если $L = 3000$ м, $P_1 - P_2 = 6,9$ МН/м² и $d = 30,5$ см, то $Q = 780$ кг/с. Поскольку разность энтальпий воды при температуре 338 и 65,6°C равна 1300 кДж/кг, располагаемая мощность составляет 1000 МВт, т. е. значительно превосходит мощность 100 МВт системы сухого пара.

Б. Полость, создаваемая в породе при извлечении из нее тепловой энергии 1 ГДж.

Если удельная теплоемкость породы c /Дж/(кг·град)/, ее плотность ρ (кг/м³) и коэффициент объемного расширения B (1/град), то отвод тепловой энергии $Q \times 10^9$ Дж из объема V вызовет падение температуры $\delta T = Q \times 10^9 / (\rho c V)$. Поскольку это изменение температуры вызовет тепловое сжатие

$$\delta V / V = B \delta T = 10^9 B Q / (\rho c V), \quad \text{то}$$

$$\delta V = 10^9 B Q / (\rho c). \quad (\text{B1})$$

Типичные значения констант /6, 8/ составляют $B = 25 \cdot 10^{-6}$ 1/град, $c = 0,8$ Дж/(кг·град), $\rho = 2690$ кг/м³. Подставляя эти величины в

(Б1), получим $\delta V/Q = 11,6 \text{ м}^3/\text{Дж}$. Если 100 МВт мощности извлекается в течение 24 ч, то $Q = 8630$, полость составит 100 м^3 и на ее заполнение потребуется 100 м^3 подпитывающей воды.

В. Зависимость температуры, при которой происходит тепловой разрыв, от глубины

Рассмотрим массив горной породы, в котором геотермический градиент направлен вниз и равен G (град/м). На глубине h (м) температура перед охлаждением составляет

$$(T \text{ } ^\circ\text{C}) = Gh + T_s, \quad (\text{B1})$$

где T_s – среднегодовая температура поверхности.

Экспериментальным путем установлено, что разрыв происходит при давлении, кратном гидростатическому давлению, скажем, при $b \times 10^4 h$. Среднее значение b , согласно /11/, составляет 1,5. Поскольку считается, что действует по крайней мере полное гидростатическое давление, для образования трещин потребуется дополнительное напряжение, возникающее от теплового сжатия и равное $(b-1) \times 10^4 h$. Обозначим коэффициент теплового расширения через a (1/град), а модуль Юнга – через E . Рассмотрим процесс, в котором сжатие $\delta L/L = a(T - T_0)$ (T_0 – температура, до которой охлаждается горная порода) чередуется с растяжением, возвращающим горную породу к ее первоначальным размерам, что вызывает напряжение $(E |\delta L/L| = E a (T - T_0))$. (B2)

Приравнивая его к напряжению, необходимому для растрескивания, с использованием выражения (B1) для h , получаем соотношение

$$T_0 = [1 - (b-1) \times 10^4 / (GEa)] T + [(b-1) \times 10^4 / (GEa)] T_s. \quad (\text{B3})$$

Согласно работе /6/, типичными значениями являются: $E = 5,7 \times 10^{10} \text{ Н/м}^2$; $a = 8,3 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$; $G = 0,17 \text{ град/м}$; $T_s = 4,4^\circ\text{C}$ и $b = 1,5$.

Подставляя эти значения в выражение (B3), получаем

$$T_0 = 0,94 T + 0,26 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad \text{или} \quad T_0 = 0,94 T. \quad (\text{B4})$$

В этом примере только охлаждение водой с температурой 2°C будет вызывать растрескивание породы с температурой 316°C . Коэффициент при T в выражении (B4) в расчетах на вычислительной машине обозначался через K /7/. Он уменьшается с уменьшением градиента температуры, так как горная порода с температурой T будет залегать на большей глубине.

ЛИТЕРАТУРА

1. Banwell J., Meidav T., Geothermal energy for the future, Paper presented at 138th Annual Meeting of the American Association for the Advancement of Science, Philadelphia, 1971.
2. Barnea J., Geothermal power, *Scientific American*, **226**, No. 1, 70 – 77 (1972).
3. Bodvarsson G., Utilization of geothermal energy for heating purposes and combined schemes involving power generation, heating and/or by-products, Proc. United Nations Conf. on New Sources of Energy, Rome, 1961.
4. Crane Co., Flow of fluids through valves, fittings, and pipe, Technical paper No. 410, 1957, p. 3 – 3.
5. Gatlin C., Petroleum Engineering, Englewood Cliffs, N. J., Prentice-Hall, 1960, pp. 323 – 324.
6. Geological Society of America, Handbook of physical constants (published by the Society, reprinted at Ann Arbor, Mich.), 1950.
7. Harlow F., Pracht W., A theoretical study of geothermal energy extraction, *J. Geo. Res.*, **77**, 7038 (1972).
8. Ingersoll L. R., Zobel O. J., Ingersoll A. C., Heat conduction with engineering, geological, and other applications, Madison, Univ. of Wisconsin Press, 1954, pp. 42, 142 – 143.
9. Legislative Reference Service, Library of Congress, The economy, energy, and the environment, Washington, D. C.: U. S. Govt. Printing Office, p. 116/45, 1970.
10. McClain, W. C., Seismic mapping of hydraulic fractures, Oak Ridge National Laboratory, Report TM3502, 1971.
11. Perkins T. K., Kern L. R., Widths of hydraulic fractures, *Trans. AIME*, **222**, 944 (1961).
12. Robinson E., Potter R., McInteer B., Rowley J., Armstrong D., Mills R., Smith M., A preliminary study of the nuclear subterrene, Los Alamos Scientific Laboratory Report LA-4547, App. E, 1971.
13. Smith R. L., Bailey R. A., Ross C. S., Geological map of the Jemez Mountains, New Mexico, U. S. Geological Survey Map I-571 1970.
14. Степанов А. И., Центробежные и осевые насосы, Машгиз, М., 1960.
15. Tikhonov A., and Dvorov I., Development of research and utilization of geothermal resources in the USSR, Proc. Symp. on Dev. and Util. of Geothermal Resources, Pisa, Italy, 1970, New York; United Nations, 1971.
16. Van Orstrand C., Observed temperatures in the Earth's crust, in B. Gutenberg, ed., Internal constitution of the Earth, New York, Dover, 1951, chap. VI.

15. СТИМУЛИРОВАНИЕ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ СКВАЖИН С ПОМОЩЬЮ ХИМИЧЕСКИХ ВЗРЫВОВ

К. Ф. Остин, Г. У. Леонард¹⁾

Подобно тому как при бурении нефтяных и газовых скважин (или в данном случае геотермальных скважин) сухих скважин больше, чем продуктивных, так и при их эксплуатации обедненных и скудных скважин гораздо больше, чем изобильных, поскольку рано или поздно скважина истощается. В случае геотермальной скважины это может произойти в результате недостаточного пополнения жидкостью подземного бассейна, снижения пористости или проницаемости коренной породы вследствие механической деформации, уменьшения проницаемости из-за отложений минералов и т. п. Тогда становится необходимым изыскание способа стимулирования ранее рентабельной скважины для обеспечения ее приемлемой производительности. Следует также рассмотреть возможность дальнейшего стимулирования пока еще рентабельной скважины с тем, чтобы покрыть потери от эксплуатации бедных скважин.

Также важен вопрос, как лучше пробурить и поддерживать скважину для закачки жидкости. Вначале, возможно, будет достаточно повысить расход закачиваемой жидкости, позднее могут возникнуть проблемы, связанные с деформацией и осадкой горных пород. Все эти проблемы могут быть разрешены стимулированием с помощью взрыва.

Геологические характеристики геотермальных месторождений

При рассмотрении эффективности методов стимулирования с помощью взрыва необходимо сделать определенные предположения относительно геологической структуры геотермальных месторождений. Геологическое разнообразие геотермальных месторождений определено Остином /1/: "Перспективными для геотермальной энергетики являются вулканические районы с выделением пара и фумарольных

¹⁾ Остин К. Ф. — геолог-исследователь научно-исследовательского отдела; Леонард Г. У. — заместитель технического директора отдела разработок (двигателей и взрывчатых веществ) и руководитель отдела разработок двигателей Центра ВМФ, США, Чайна-Лейк, шт. Калифорния.

газов, а также районы выходов минеральных источников различной температуры, травертинов и гейзеристов, указывающих на недавнюю геотермальную деятельность названных выше типов. Важно присутствие молодых интрузий на умеренной глубине, а также экстрезивных куполов кальдер¹⁰. Хотя это определение касается геологии изверженных пород, коренные геологические породы не указаны. В работе /2/ перечислены пять основных типов геотермальных месторождений: гранитные интрузии, метаморфические зоны, базальтовые магмы, геотермальные бассейны с геотермическим градиентом и сухие-горячие горные породы с геотермическим градиентом. Разнообразие коренных пород хорошо иллюстрируется на примере месторождений над гранитными интрузиями — главных объектов разведывательного бурения до настоящего времени. Это месторождение Лардерелло в Италии, образованное безводным доломитом и пористым известняком; месторождение Уайракей в Новой Зеландии, состоящее из выветренных вулканогенно-осадочных пород, включающих пемзу, кристаллический и стекловидный туф, а также месторождение в Долине Больших Гейзеров в Калифорнии, сложенное грауваккой.

В качестве примера разнообразия вмещающих пород в пределах одного геотермального месторождения можно привести район гранитных пород в восточной Калифорнии. Коренными породами этого месторождения являются гранитные штоки, состав которых изменяется от гранита до диорита; кристаллические метаморфические породы, эквивалентные габбро; мелкозернистые дайки; кварцевые жилы; пегматиты; вулканические жерловины, заполненные риолитом или андезитом; оливинные базальты и трюги, заполненные обломками всех этих пород. Термальные источники следует ожидать из разломов, зон разрушения брекчий, или из трещиноватых вулканических пород. Закачку жидкости можно было бы осуществлять в любой из этих зон, или, что более вероятно, в зонах разломов геотермального бассейна. Анализ способов стимулирования с помощью взрывов, которые, возможно, найдут применение, будет дан на примере восточной Калифорнии.

Расширение буровой скважины

Для образования в буровой скважине полости, превышающей в несколько раз диаметр скважины, можно воспользоваться химическим взрывом. Для осуществления взрывов требуется лишь небольшая установка, причем вероятность закупорки скважины обломками оборудования минимальна; кроме того, ударные и вибрационные разрушения периметра скважины при ее расширении взрывом могут значительно увеличить ее производительность. Один из авторов наблюдал недавно убедительный пример такого явления в Сент-Луисе: туннель, проложенный во влажной карбонатной коренной породе при помощи бурения и взрывных работ, был продолжен бурением; пробуренная

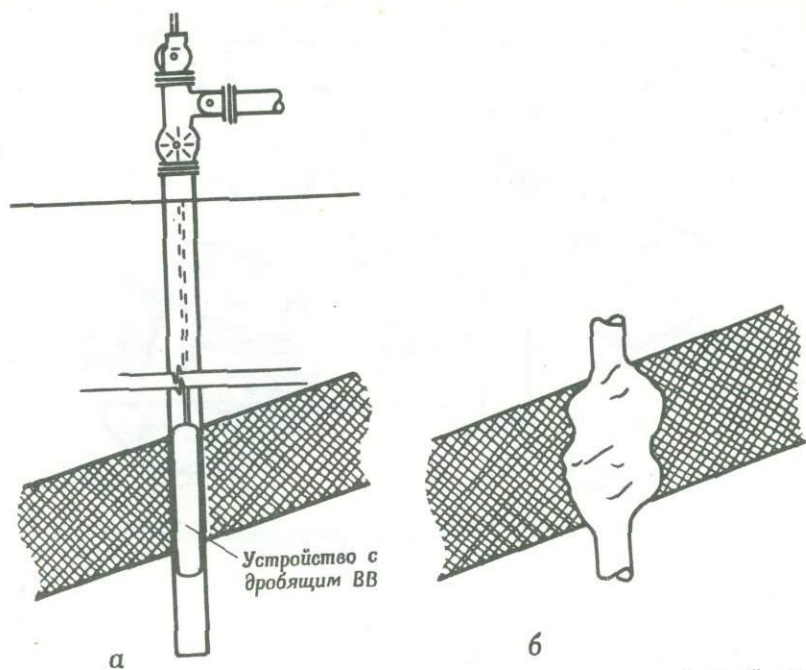
часть туннеля оставалась практически сухой, тогда как в туннеле, проложенном комбинированным способом, было обнаружено значительное количество воды.

При попытке расширения скважины бурением в гранитах или метаморфических породах часто происходит поломка бурового инструмента, как только скважина достигает размера отдельного валуна или тектонических брекчий в зоне разлома либо отдельных блоков. Наличие мелкозернистых даек при расширении скважины еще более затрудняет процесс расширения. Мелкозернистые дайки исключительно прочны, и хотя они часто сопряжены с более поздними открытыми разломами, при проходке их любым вращающимся инструментом действуют значительные внецентрические нагрузки. Применение взрыва для расширения буровых скважин позволит избежать этих трудностей. На фиг. 1 этот метод представлен схематически. Расширение взрывом лучше всего выполняется с помощью бризантных зарядов, но их следует применять с осторожностью в тонкослоистых породах с крутым залеганием.

Увеличение проницаемости под действием волн напряжения. Как уже отмечалось, взрыв в буровой скважине может вызвать увеличение притока жидкости в нее вследствие разрушения связей между зернами, расширения трещин и пор и создания новых трещин. Примером применения простой программы стимулирования с помощью взрыва может служить разрыв коренных пород в пробуренной скважине в восточной Калифорнии (фиг. 2). Второй пример (фиг. 3) — разрыв зоны брекчий, цементированных вторичными минералами. Третий (фиг. 4) — разрушение связей между зернами гранита. Эти методы в равной мере применимы для стимулирования новых скважин и восстановления старых.

Увеличение проницаемости путем перфорирования (с помощью кумулятивных зарядов). Кумулятивные заряды с конической выемкой давно применяются при завершении скважин. Их можно использовать вместо обыкновенных зарядов для увеличения эффективного диаметра буровой скважины за счет отверстий, расположенных под прямым углом к ее оси. Хотя обычно считают, что этот метод эффективен главным образом для перфорирования обсадных труб с цементацией скважин с целью обеспечения доступа теплоносителя из бассейна к эксплуатационным трубопроводам, при определенных условиях конический кумулятивный заряд может увеличить эффективный диаметр скважины в 2–3 раза. Эта часто используемая при бурении нефтяных скважин технология непосредственно применима при осуществлении программ завершения и стимулирования скважин (фиг. 5).

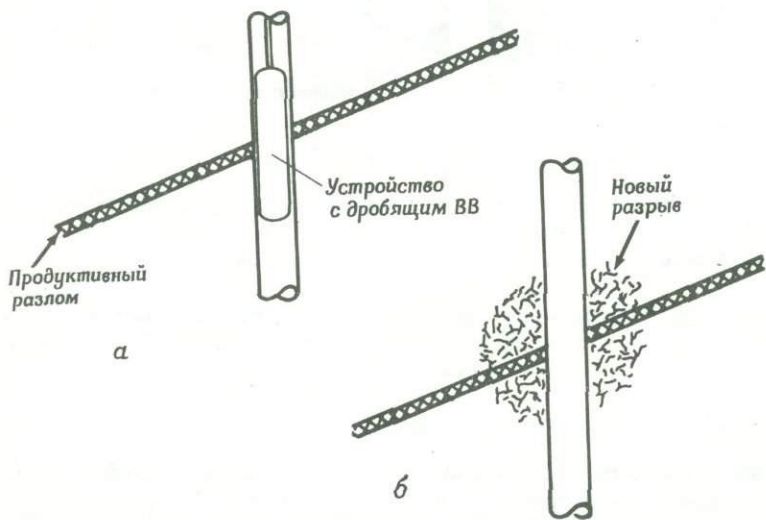
Увеличение проницаемости путем перфорирования (с помощью пулевой пулеперфоратора). Пулевые перфораторы используются вместо струи, создаваемой кумулятивным зарядом с конической выемкой для пробивания отверстий в горной породе. Этот метод является предшест-



Ф и г. 1. Использование взрывчатых веществ для расширения буровой скважины в продуктивной зоне.

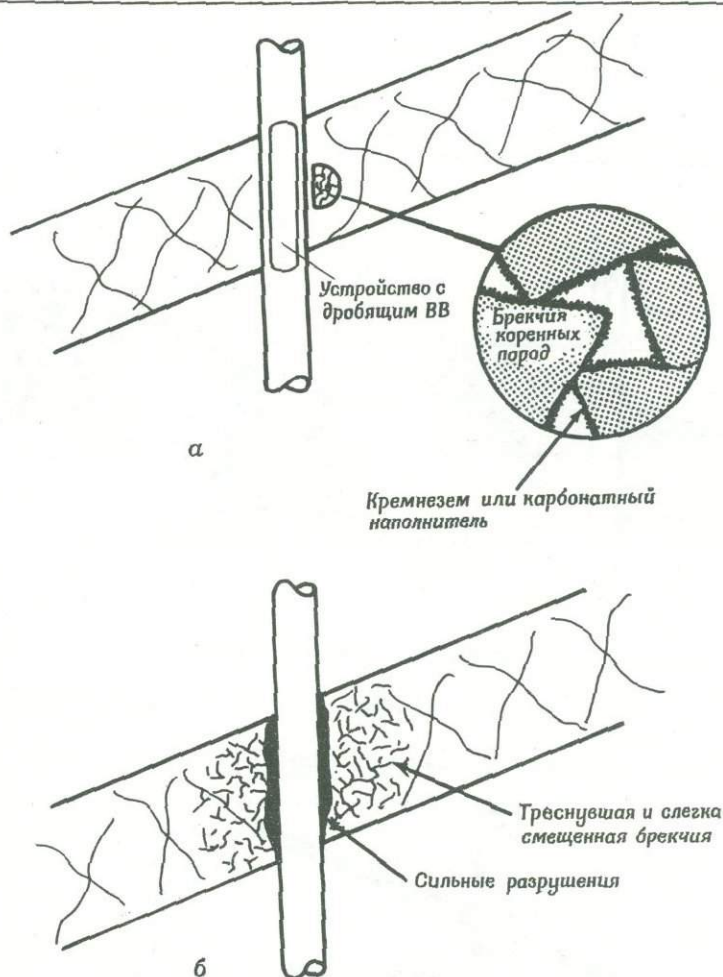
а — устройство с дробящим ВВ в продуктивной зоне; б — расширенная буровая скважина.

На фиг. 1 — 5 буровая скважина имеет диаметр 305 мм.



Ф и г. 2. Использование взрывчатых веществ для разрыва коренной породы рядом с разломом.

а — пробуренная скважина; б — скважина после взрыва.



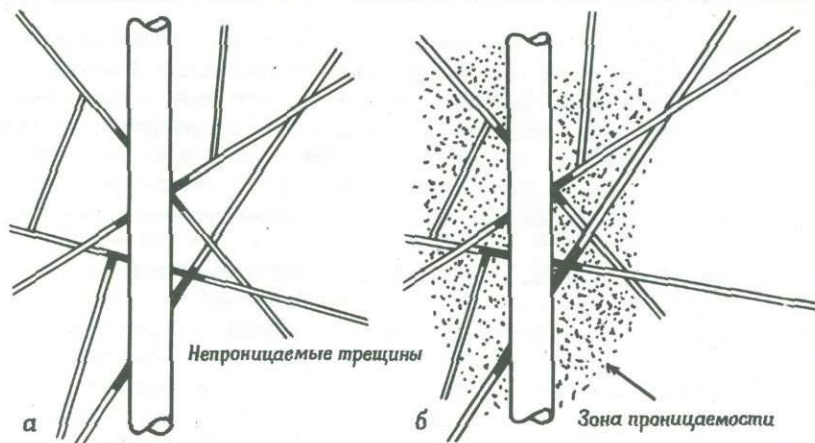
Ф и г. 3. Использование взрывчатых веществ для дробления хрупких минералов, цементирующих зоны брекчий.

а – пробуренная скважина; *б* – скважина после взрыва.

венником используемого в настоящее время метода кумулятивных зарядов. Фиг. 5, б, в в равной степени относятся к обоим этим способам.

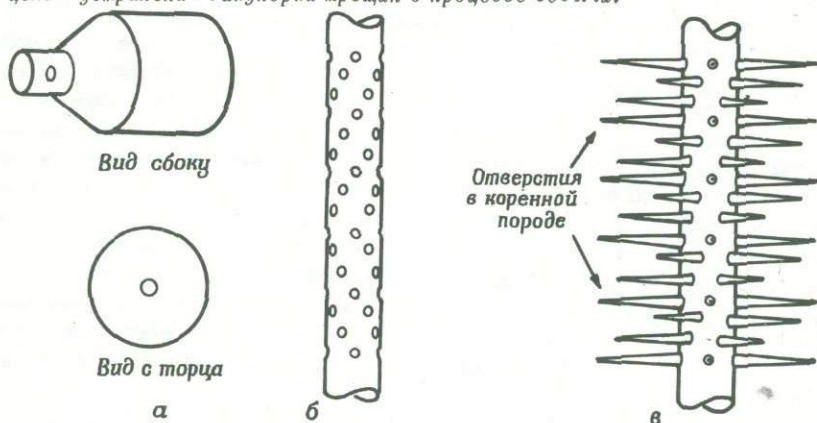
Механизм разрушения горных пород

Для успешного стимулирования геотермальной скважины с помощью взрыва необходимо точно понять и найти соответствие между тремя важнейшими факторами: 1) способом подвода энергии взрыв-



Ф и г. 4. Использование взрывчатых веществ для разрушения связей между зернами пород с целью увеличения производительности скважин за счет прилегающих продуктивных зон трещин.

а — низкая производительность вследствие закупорки трещин; б — стимулирование производительности путем разрыва связей между минералами. Темные области — минеральные "пробки". Этот рисунок иллюстрирует стимулирование с целью устранения закупорки трещин в процессе добычи.



Ф и г. 5. Применение конических кумулятивных зарядов для увеличения эффективного диаметра буровой скважины.

а — типичный заряд; б — комплект подрывных зарядов; в — скважина после взрыва.

чатого вещества (жидкость, твердое вещество в оболочке или без оболочки и т. д.); 2) типом коренной горной породы (минералогия, зернистость, структура, степень вязкости и т. д.) и 3) фазовым состоянием теплоносителя в бассейне (пар или газ, жидкость).

Распространение волны напряжения. При взрыве заряда в коренных породах образуются две хорошо различимые зоны: *ближняя* зона, в которой структура породы разрушается под действием раздавливающих напряжений, уплотнения и фазовых превращений, и *дальняя* зона, в которой происходят растрескивание и разрыв связей между минеральными зёрнами. Рассмотрим обе зоны, поскольку извлекаемый из буровой скважины теплоноситель должен пересечь каждую из них.

Важнейшим явлением в дальней зоне является распространение волны напряжения. Влияние распространения волны напряжения на кристаллическую зернистую структуру изверженных пород было исследовано в работах /8, 9/. Рассмотренные в этих двух работах породы типичны для большей части коренных пород бассейна ряда потенциальных геотермальных месторождений в восточной Калифорнии. Такие породы, или по крайней мере породы, сравнимые по структуре и физическим свойствам, можно ожидать в подавляющем большинстве геотермальных месторождений в мире. Рассмотрим, каким образом результаты этих лабораторных исследований могут быть применены к разработке программы стимулирования. Авторы работы /8/ пришли к выводу, что "в диорите затухание волн велико, а рассеяние мало. Предел прочности и статический модуль Юнга диорита уменьшаются прямо пропорционально количеству испытанных образцов ударных волн". Поскольку эти испытания проводились на образцах в воздухе, предположим, что зона стимулирования либо заполнена естественным газом, либо заполняется газом в процессе осуществления программы стимулирования для управления механизмами разрушения горной породы. В отличие от диорита "в лейкократовом граните затухание велико, а пульсации волны по фронту колебаний чрезвычайно сильны. Спротивление сжатию лейкократового гранита отчасти зависит от отраженной волны растяжения и, по-видимому, не зависит от волны сжатия. Было обнаружено, что спессартит (темная мелкозернистая дайковая порода) обладает высокой упругостью, затухание и рассеяние в нем малы и его структура по существу не изменяется при повторном прохождении волн напряжения".

Таким образом, эти данные указывают, что при расширении взрывом буровой скважины, проходящей через гранитные породы и дайки, образование трещин в дайках, которые могут оказывать серьезное препятствие течению теплоносителя, затруднительно и даже невозможно за пределами ближней зоны. Но в смешанном лейкократовом граните и диорите можно было бы осуществить обширный разрыв и разрушение структуры зернистости повторными взрывами в диоритах. Действительно, повторные ударные волны вызывают главным образом уменьшение величины модуля Юнга, а также предела прочности крупнозернистых изверженных пород. Согласно эксперимен-

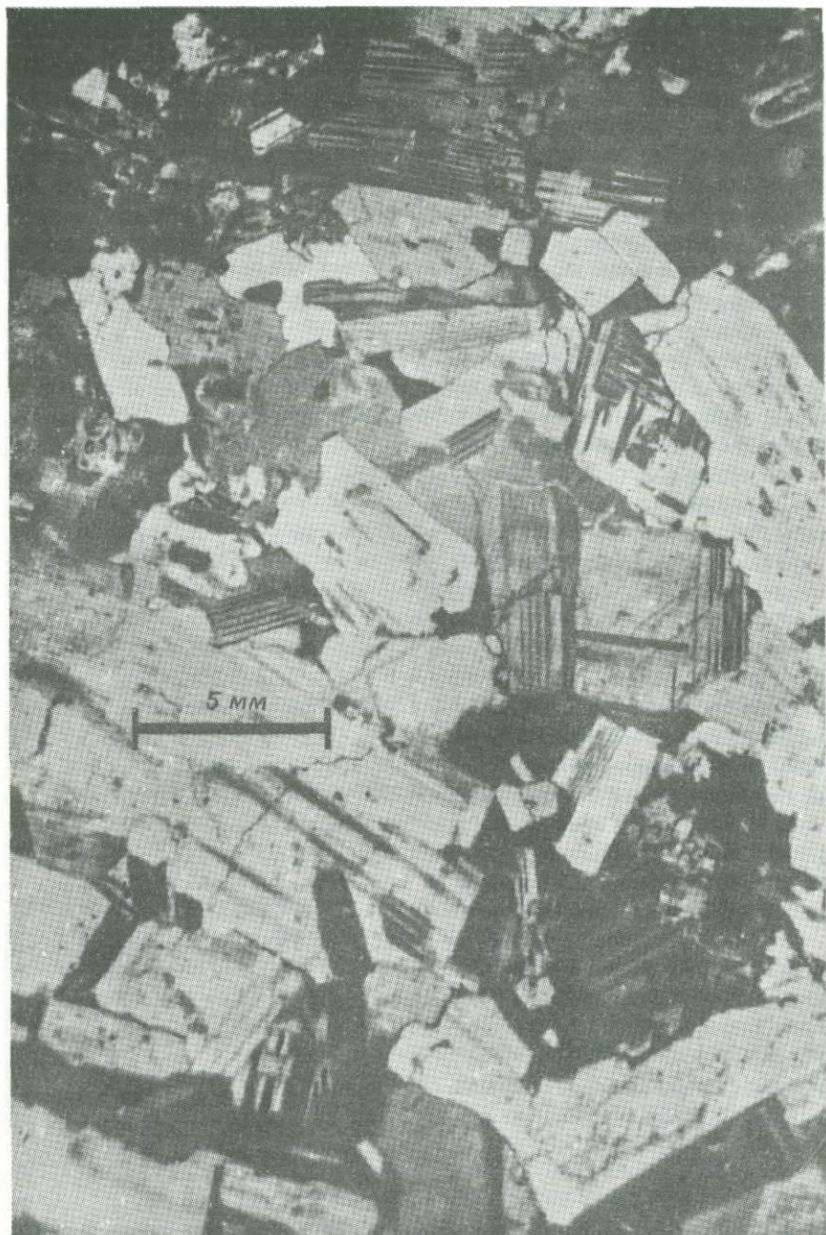
тальным данным, при прохождении через породу нестационарного импульса с уровнем напряжения выше критического энергия поглощается трещинами, расщепленными минералами, или разрывами между минеральными зернами. Таким образом, повторные взрывы можно рассматривать как самостоятельный метод стимулирования или как метод, предвещающий гидравлический разрыв.

Большая вероятность того, что в ближайшем будущем геотермальные месторождения типа "базальтовых магматических очагов и лавовых озер, как на Гавайях, привлекут внимание исследователей, оправдывает внимательное рассмотрение поведения этой мелкозернистой породы под действием волн напряжения /3/¹⁾. В экспериментах Гольдсмита /8/ было установлено, что "базальт характеризуется слабым затуханием волн и фактически отсутствием дисперсии. При заданной исходной интенсивности ударных волн коэффициент затухания и модуль Юнга базальта уменьшаются с увеличением числа ударных волн, прошедших образец". Эти эксперименты показывают, что прочность базальта не зависит от интенсивности импульсов. Оказалось, что базальт является превосходным примером хрупкого материала, достигающего состояния "насыщенного" разрушения при заданной интенсивности повторяющихся динамических воздействий. Это, безусловно, означает, что попытки создать обширное растрескивание базальтов или ему подобных пород могут и не увенчаться успехом после первого и нескольких последующих взрывов.

Заслуживает внимания и тот факт, что вызванное волной напряжения разрушение в пористой среде, которую мы считаем заполненной газом, в большей степени локализовано. Испытания шлака¹ и подобных ему материалов /4/ (объемная плотность 1 г/см³ при плотности вещества 3 г/см³) показали, что это превосходная энергопоглощающая среда.

Опубликованные данные о явлении прохождения волны напряжения в горных породах ограничены некоторыми типами горных пород, и условия испытаний почти никогда не соответствуют ожидаемым условиям в программе стимулирования у основания скважины. Однако общие представления все-таки имеются. Некоторые породы обладают высокой упругостью, и можно ожидать, что для них существует состояние "насыщенного" разрушения при данной мощности заряда. Напротив, другие породы под действием повторяющихся волн напряжения быстро приходят в состояние усталости. Следует извлечь керн породы потенциально продуктивной зоны и испытать его при условиях, имеющих место у основания скважины, или изменить условия в зоне

¹⁾ В этой работе предлагается произвести разведку потенциального геотермального месторождения в районе авиабазы «Каньохе мэрин» на острове Оаху (Гавайи).



Ф и г. 6. Вызванные взрывом трещины и разрушенные связи минеральной структуры в диорите.

Средний размер обломков на микрофотографии составляет 5 мм.

стимулирования скважины, чтобы прогнозировать явления в дальней зоне. На фиг. 6 показана трещиноватость диорита, вызванная взрывом. Хотя структура породы в значительной мере разрушена, в показанном тонком срезе можно наблюдать видимые невооруженным глазом трещины. Способность породы с разрушенной структурой пропускать теплоноситель с регулируемым расходом в настоящее время не исследована, хотя это чрезвычайно важный фактор.

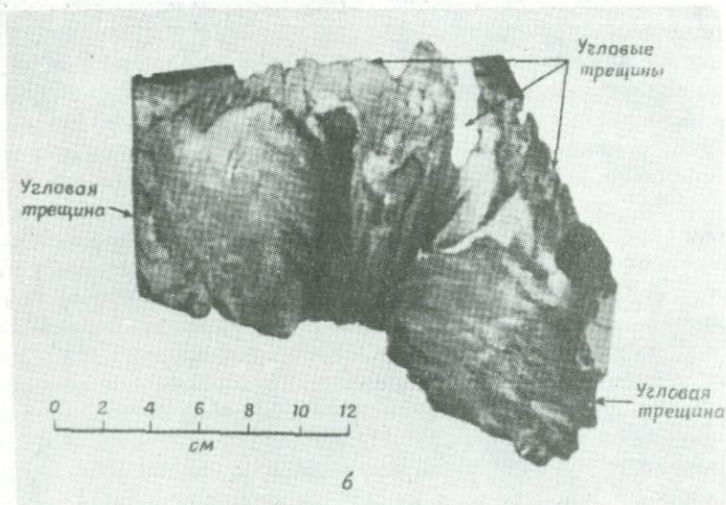
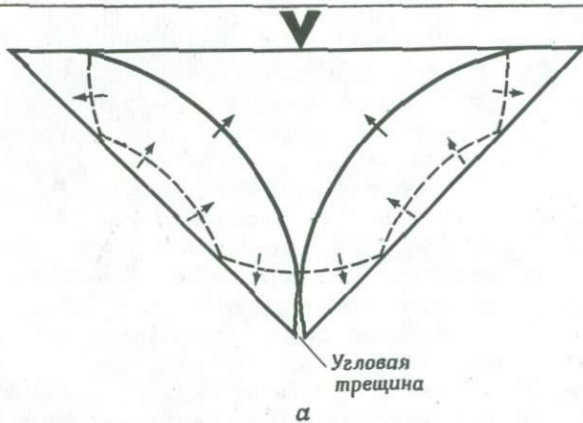
При разработке программы стимулирования геотермальных месторождений путем разрушения горных пород и содержащихся в них минералов исследователь должен учитывать основные характеристики горных пород. Так, например, при экспериментальном изучении диорита авторы /5/ пришли к заключению:

1. В средне- и крупнозернистых интрузивных породах, таких, как диориты, при взрывах образуются многочисленные трещины и сколы, а не угловые трещины, вероятно, вызываемые усилением волны напряжения.

2. Поведение средне- и крупнозернистых пород, подверженных импульсной нагрузке, нельзя моделировать на металлических образцах или негранулированных пластмассовых образцах, например плексиглазе. Эксперименты показывают, что попытки моделирования поведения горных пород с помощью других материалов должны осуществляться с предельной осторожностью.

На фиг. 7 показаны типичные угловые трещины в металлах и плексиглазе. Хотя в литературе часто приходится встречать утверждение, что они являются основным типом разрушения пород, подверженных импульсной нагрузке, этот тип растрескивания не наблюдался в исследованных до настоящего времени породах. На фиг. 8 и 9 показана структура трещин, образованных в породах под действием взрыва. Были изучены экспериментально крупнозернистая изверженная порода, известняк, песчаник и конгломераты. Такую структуру трещин можно считать типичной для блоков слоистых или разбитых отдельностью пород, испытавших воздействие взрыва (фиг. 8), а также для плит даек, кремней и более крупных массивных блоков (фиг. 9). Трещины на фиг. 9 имеют "расширенно-коническую" форму и образованы отражением продольных волн растяжения от плоского торца блока с противоположной стороны от места возникновения взрыва.

С теоретических позиций причина отсутствия усиления волны растяжения в обычных горных породах рассматривается в работе /10/ и подробнее поясняется в работе /11/. Величина коэффициента Пуассона для горных пород составляет 0,2-0,25. При таких значениях коэффициента Пуассона и больших углах падения отражаются волны сдвига, а не волны растяжения. Некоторые минералы, например кварц, действительно подвержены угловому растрескиванию

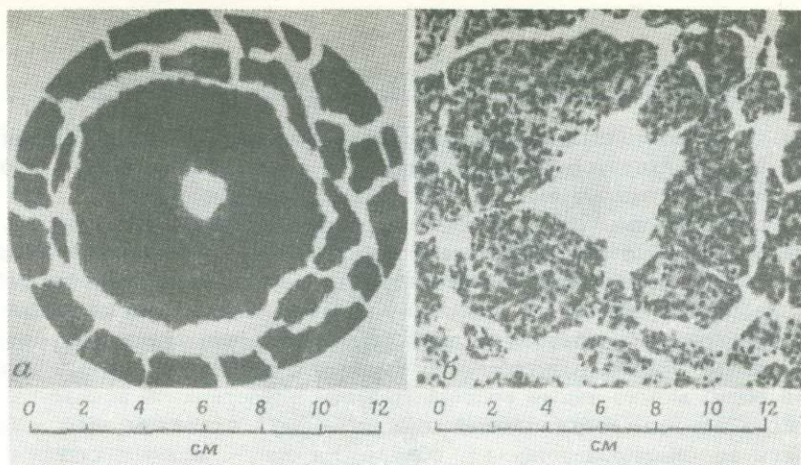


Ф и г. 7. Типичные угловые трещины, образовавшиеся вследствие усиления волны напряжения в металле и плексиглазе.

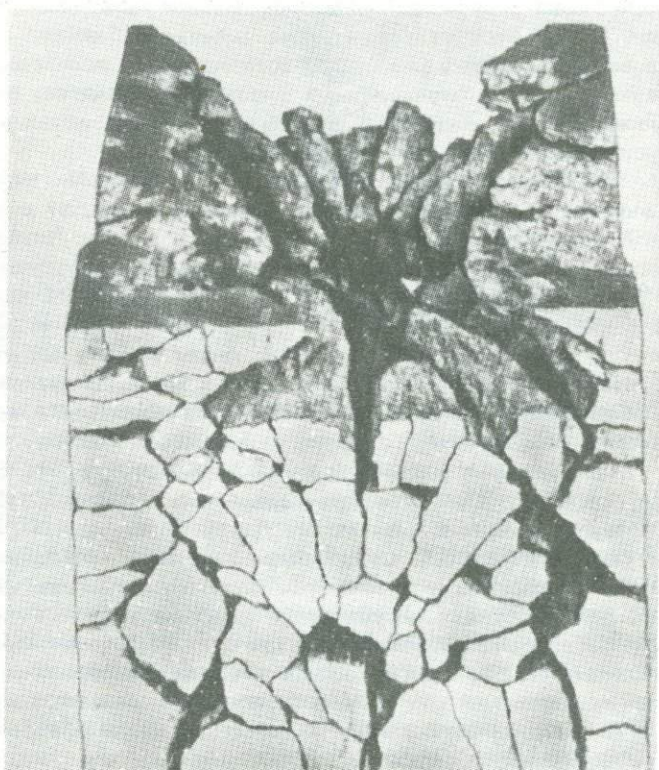
а — предполагаемая структура; б — действительная структура трещин в плексиглазе.

в монокристаллах, но этого не происходит в кристаллических агрегатах.

Явлениям в ближней зоне горной породы уделяется сравнительно мало внимания, за исключением исследований в зоне ядерного взрыва. Вкратце опишем основные явления при стимулировании с помощью взрыва. Разрушение в ближней зоне пород с наполненными газом порами обычно происходит в результате обвала. Если этот обвал обширен и образовавшаяся зона разрушения симметрична и замк-



Ф и г. 8. Типичная структура разрушения (а) в диоритах и (б) в известняках, подверженных воздействию взрыва.



Ф и г. 9. Структура разрушения в блоке известняка, подверженном воздействию взрыва.

Детонация развивалась вверх от основания. Первоначальные размеры блока составляли в основании 15 × 15 см при высоте 12,7 см.

нута, т. е. не пронизана радиальными трещинами, то прилегающая зона будет находиться в неустойчивом и сильно напряженном состоянии. Эта зона может быть в высокой степени непроницаемой, так что окончательным результатом симметричного взрыва вполне может быть уменьшение производительности скважины, несмотря на обильное трещинообразование и дезинтеграцию пород. Эту трудность можно преодолеть, используя либо кумулятивные заряды, вызывающие асимметрию, либо повторные взрывы для создания скважины достаточно больших размеров, чтобы мог произойти самопроизвольный обвал этой зоны; можно также воспользоваться естественной асимметрией свойств породы, составляющей стенки буровой скважины, для осуществления ее самопроизвольного обвала. На фиг. 9 иллюстрируются эти явления. Процессы в ближней зоне трудно воспроизвести в лабораторных условиях, поскольку всякий раз, когда трещины доходят до краев образца, замкнутость породы нарушается и потенциально непроницаемая зона разрушения самопроизвольно разваливается. Эта зона на фиг. 8 и 9 отсутствует. Другие явления в ближней зоне, включая плавление и другие фазовые кристаллические переходы, также возможны в породах определенных типов. Нам кажется, однако, что для ближней зоны важнейшей проблемой является обвал потенциально непроницаемой зоны "разрушенной" породы.

Струи, создаваемые кумулятивным зарядом с конической выемкой.

Использование струй, создаваемых кумулятивным зарядом с конической выемкой, подробно описано в работах [1, 5]. Было установлено, что под действием этих струй в горных породах образуются три основные зоны: зона разрушения, зона уплотнения и устойчивая зона.

Влияние внедрения в породе, сопровождающего образование зоны разрушения, можно сравнить с воздействием взрыва заряда в небольшой буровой скважине в полубесконечном блоке. Внутренняя поверхность образовавшейся полости оказывается покрытой разрушенным неустойчивым плотным поясом, проницаемость которого в прилегающей к скважине породе, вероятно, очень низка. Эта форма расширения встречается в крупнокристаллических породах, таких, как диорит, адамелит, гранит и непористые базальты и риолиты. Если симметрия разрушенной зоны может быть нарушена, она будет самопроизвольно обваливаться в скважину с образованием большей зоны разрушения, причем стенки обрушенного пространства оказываются значительно более проницаемыми, чем прежде. Нарушение симметрии часто происходит самопроизвольно, как в случае, изображенном на фиг. 10, когда динамическая прочность породы в разных направлениях вдоль пути разрушения заметно различается. Если предпринимается значительное стимулирование месторождения, в зоне разрушения следует разместить устройство с асимметричной струей, которая способствовала бы самопроизвольному обвалу этой зоны. В случае,

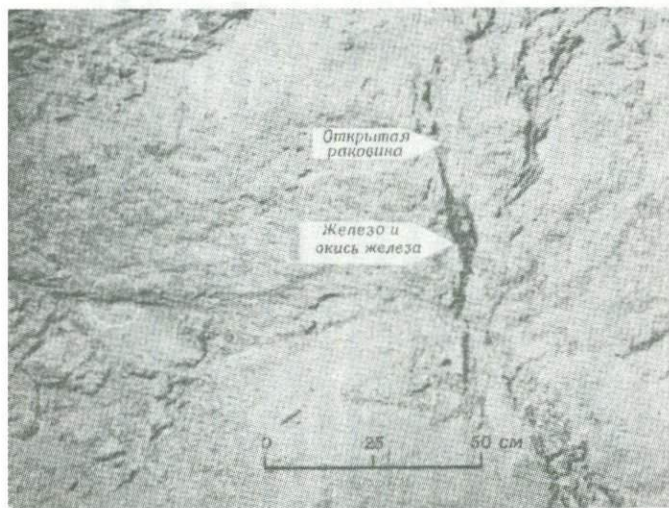


Ф и г. 10. Воздействие взрыва кумулятивного заряда с конической выемкой на гидротермально измененную гранитную породу с анизотропной динамической прочностью.

изображенном на фиг. 10, первоначальная скважина была большой и эллиптической и в течение 5 мин ее диаметр увеличился от 5 до $\sqrt{8}$ см по мере обваливания зоны разрушения.

Разрушение породы с образованием зоны уплотнения обычно происходит в песчаниках или пемзовых туфах. В породах этого типа скважина образуется главным образом путем обвала пористых пород, но большая плотная зона обвала почти не запасает энергии, так что самопроизвольный обвал маловероятен. Стимулирование с помощью кумулятивных зарядов с конической выемкой таких пород должно производиться потоком для вымывания зоны уплотнения из области расширения при наличии перепада давления.

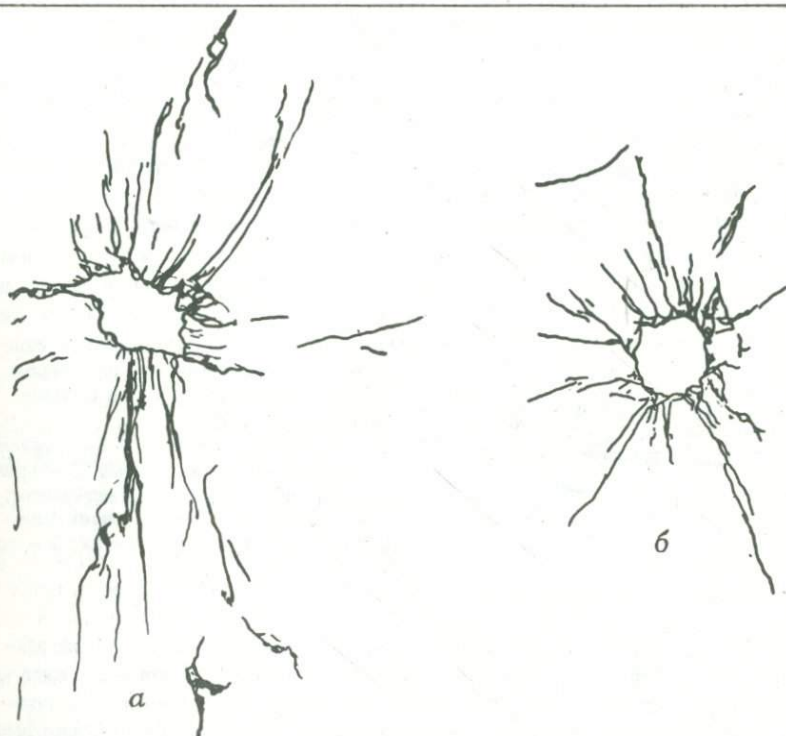
Скважины, в которых создаются разрушения устойчивого типа, в настоящее время обнаружены только в известняках, но их можно ожидать в некоторых плотных карбонатах, в том числе в доломите и в таких гидротермальных карбонатах, как анкевит. Образование



Ф и г. 11. Зоны разрушений в риолите с трещинами, заполненными металлом обсадной трубы и его окислами.



Фиг. 12. Асимметричное развитие трещин в известняке в случае, когда кумулятивный взрыв направлен в сторону открытой трещины. Трещины заполнены металлом обсадной трубы и его окислами. Стрелкой показана естественная трещина; ширина изображенной поверхности составляет 9 см.

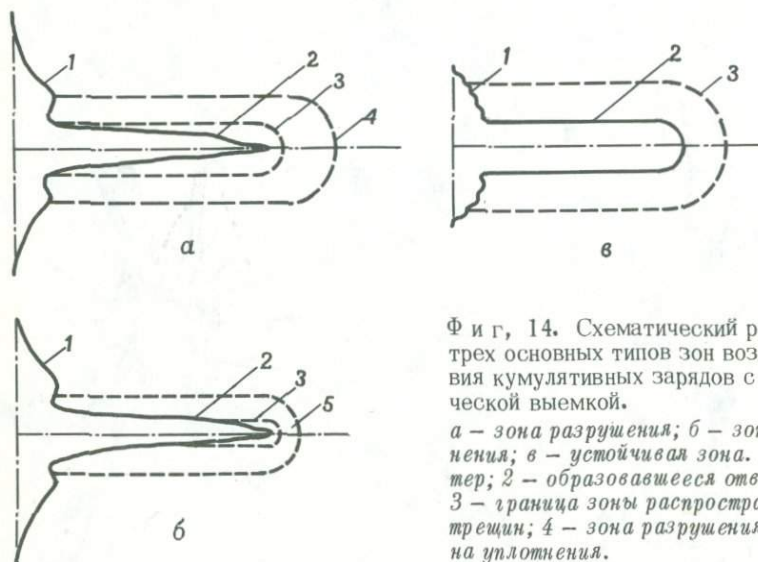


Ф и г. 13. Структура трещин, образованная в трещиноватом сравнительно тонком слоистом известняке.

Трещины заполнены металлом обсадной трубы и его окислами. а — вид снизу при наблюдении со дна отверстия (по направлению к источнику струи), ширина трещины $\approx 2,5$ см; б — вид сверху участка скважины на расстоянии 5,5 см от дна скважины.

скважин устойчивого типа в массивных формациях не вызывает разрушения коренной породы за пределами тонкого обожженного слоя (толщиной 1 мм или менее), покрытого коркой металла или его окисла. Этот вид расширения обеспечивает увеличение периметра скважины, но существенно не изменяет свойств коренной породы.

Струи, создаваемые кумулятивным зарядом с профилированной выемкой, иногда все же образуют трещины в породах. Если порода состоит из брекчии, первый же твердый блок породы на пути струи может подвергнуться интенсивному растрескиванию, но если струя вводится в разлом с малым углом наклона или наталкивается на наклонную грань породы, то она будет отклоняться, и существенного расширения скважины не произойдет. Критический угол отклонения зависит от типа горной породы и типа струи; испытания диорита на воздухе показали, что значительное отклонение струи происходит при углах падения 20 и 30° .



Ф и г, 14. Схематический разрез трех основных типов зон воздействиякумулятивных зарядов с конической выемкой.

а – зона разрушения; *б* – зона уплотнения; *в* – устойчивая зона. 1 – кратер; 2 – образовавшееся отверстие; 3 – граница зоны распространения трещин; 4 – зона разрушения; 5 – зона уплотнения.

При воздействии струикумулятивного заряда с конической выемкой наблюдаются две интересные группы трещин: одна – в зоне разрушения, другая – в известняках, имеющих незначительную возможность смещения (обычно по плоскостям отдельности или напластования). На фиг. 11 показан образец риолита, извлеченный из зоны разрушения путем колонкового бурения. Эта зона потеряла свою монолитность, и образовавшиеся трещины заполнились металлом обсадной трубы и его окислами. Образовавшаяся зона, по-видимому, обладает меньшей проницаемостью, чем это требуется для стимулирования. На фиг. 12 и 13 показана структура трещин в известняке, причем трещины снова заполнены металлом обсадной трубы и его окислами. В трещиноватых известняках образованию такой структуры способствовали трещины отдельности. На фиг. 14 схематически представлены поперечные сечения трех основных типов зон воздействиякумулятивных зарядов с конической выемкой.

Как показывают эксперименты, рыхлые горные породы, заполненные газом, обрушиваются вследствие разрушения пор, тогда как породы, пропитанные жидкостью, обрушиваются в результате сдвига. Следовательно, влажные, подверженные гидротермальному изменению породы будут вести себя иначе, чем хорошо изученные сухие породы. В этой области необходимы дальнейшие экспериментальные исследования.

Пулевые перфораторы. Пулевые перфораторы имеют два преимущества по сравнению со струямикумулятивных зарядов с конической

кой выемкой: 1) по формуле, определяющей глубину внедрения, эта глубина вычисляется довольно точно, 2) пулям можно придать форму, вызывающую обвал зоны уплотнения. Обвал зоны разрушения, по-видимому, маловероятен вследствие ограниченной способности снарядов проникнуть в прочные изверженные и метаморфические породы. Особенно удобны для обрушения зоны уплотнения квадратные пули. Хотя часто утверждается, что при расширении скважины с помощью струй не возникает завалов из обломков пород или обрушения, это условие для большинства горных пород редко выполнимо. При пулевой перфорации обычно происходит закупорка отверстия от пули, если только она не изготовлена из растворимого, плавящегося или корродирующего материала или обладает какими-либо другими подходящими свойствами.

Превосходное исследование расширения скважин с помощью малокалиберных пуль выполнено в работе /13/. В этой работе используется выражение

$$X = K_p (W/d^2) d^{1/2} (V/1000),$$

где X — глубина проникновения, дюймы; K_p — константа, зависящая от типа породы; W — вес снаряда, фунты; d — диаметр снаряда, дюймы; V — скорость проникновения, фут/с.

Второе выражение, приведенное здесь в наиболее употребительном виде, получено Робертсоном /12/

$$X = (P/2 g b i) \ln [1 + (b/a) V^2],$$

где X — максимальная глубина проникновения, футы; $P = W/A$ — местное давление, фунт/дюйм²; W — вес снаряда, фунты; A — максимальная площадь поперечного сечения снаряда, дюйм²; g — ускорение свободного падения, фут/с²; b — инерционный коэффициент, фунт·с²/(дюйм·фут²); i — безразмерный формфактор проникающего устройства; a — сопротивление дроблению, фунт/дюйм²; V — скорость проникновения, фут/с.

Взрывчатое вещество

Современная технология изготовления взрывчатых веществ (ВВ) позволяет создавать заряды для стимулирования, используемые при температурах до 400°C. При более высоких температурах такие устройства становятся чрезвычайно дорогими. В зависимости от типа стимулирования, осуществляемого либо путем создания волн напряжения, либо с помощью кумулятивной струи, либо с помощью пулевой перфорации, в качестве источника энергии должно быть выбрано такое ВВ, стабильность и рабочие характеристики которого соответствуют поставленным задачам. Условия в геотермальной скважине,

которые могут повлиять на эффект взрыва, включают такие температурные явления, как плавление, которое может полностью изменить ожидаемую геометрию взрыва, а также рассеяние и спекание, которые могут происходить в результате самопроизвольного возгорания, взрыва или детонации ВВ, нагретых до температуры и давления выше критических значений. Кроме того, газы и жидкость в скважине могут взаимодействовать с ВВ, вызывая увеличение или уменьшение их сенсебилизации, если они надежно не герметизированы. Важно также учитывать возможность повышенной чувствительности ВВ к материалам, используемым при бурении скважин, включая связывающие составы и смазочные вещества.

Следует также принимать во внимание возможность токсичности или загрязнения после взрыва. Так, например, при использовании зарядов с высоким выходом ртути или других ядов (как биологических, так и металлургических) должны тщательно регулироваться количества этих веществ. Необходимо также предусмотреть меры избавления от неиспользованных и невзорвавшихся зарядов. Выбор формы заряда в зависимости от типа горной породы был рассмотрен в предыдущих разделах этой главы; термоустойчивость за рамками рассмотренных выше условий будет подробно обсуждена ниже в связи с использованием ВВ, заключенных в оболочку.

Не заключенные в оболочку ВВ. Эти ВВ, особенно в жидком виде и в виде суспензий, обладают весьма реальными преимуществами благодаря непосредственному контакту со стенками буровой скважины и в некоторых случаях благодаря возможности впрыскивания непосредственно в поры горной породы: но предсказание поведения не заключенного в оболочку ВВ затруднительно. Превосходной иллюстрацией этой проблемы является практический опыт металлодобывающей промышленности, когда использование определенных типов пастообразных ВВ в пробуренных скважинах, стенки которых содержали пирит, приводило к явной неустойчивости ВВ. Устойчивость взрывчатых расплавов, паст и жидкостей по отношению к плотным металлическим растворам, таким содержащим серу минералам, как пирит, и к продуктам коррозии бурового инструмента неизвестна или в лучшем случае изучена слабо, хотя опасный и активизирующий характер воздействия на ВВ некоторых тяжелых окислов металлов и солей хорошо известен, на что указывалось в работах /7, 14/.

Возможность использования взрывчатых веществ без оболочки определялась стойкостью этих веществ в той форме, которая в состоянии выдерживать температуры порядка 400°C. Такие ВВ изготовлены в лабораторных условиях, но их стоимость колеблется от 330 до 40 000 долл./кг. В то же время при широком использовании и приемлемых возможностях сбыта стоимость ВВ из некоторых очень устойчивых материалов могла бы сократиться до уровня 1.1 долл./кг для партий по 50 кг каждая, а в некоторых случаях

стоимость может быть доведена до стоимости тринитротолуола, составляющей 0,35 долл/кг. Одно из наиболее термостойких ВВ, выпускаемое в промышленном масштабе фирмой "Дюпон", известно под названием ТАКОТ.

Плотность и растворимость не заключенных в оболочку ВВ может также создавать некоторые трудности: ВВ может стремиться всплывать или погружаться в некоторых участках у основания скважины, а при изменении условий в верхней части скважины может осадаться и таким образом скапливаться в неожиданных местах.

Заключенные в оболочку ВВ. При использовании заключенного в оболочку ВВ можно избежать многих неожиданностей у основания скважины. Такой заряд обладает заданными характеристиками и поэтому может быть снабжен производственными инструкциями и гарантиями.

В настоящее время из заключенных в оболочку зарядов наиболее доступным, недорогим и относительно устойчивым является тринитротолуол (ТНТ). Хотя ТНТ плавится при температуре 80°C, его свойства как жидкого ВВ довольно хорошо известны. Жидкий ТНТ можно взрывать с помощью детонатора из азида свинца и воспламенителя-детонатора марки НМХ. Большинство действующих в настоящее время геотермальных скважин в районах естественных выходов геотермальных источников связано с подпочвенными грунтовыми водами и вскрывает эпitherмальную температурную зону 50–200°C. В этой зоне требуется только легкая оболочка для заряда, чтобы предотвратить перемешивание ВВ с жидкостью в скважине. Несколько скважин получают мезотермальные жидкости с температурами 200–300°C; в будущих скважинах можно будет встретить гипотермальные жидкости с температурами 300–550°C. (Например, в середине 60-х годов в скважине "Ривер Ранч" №1 глубиной более 2,4 км, принадлежавшей фирме "Юнион Ойл", была зарегистрирована температура ~370°C.) Хотя ТНТ устойчив при долговременном хранении при температуре 185°C, при температуре выше 190°C начинается его разложение, а при температуре выше 200°C разложение становится довольно быстрым. При скорости нагрева 20 град/с разложение становится очень быстрым, если температура выше 240°C, и завершается воспламенением или взрывом заряда еще до достижения температуры 300°C. Вследствие ограниченной термоустойчивости ТНТ при температурах выше 200°C в скважинах с более высокой температурой можно использовать изолированную оболочку или охладить скважину до размещения в ней ВВ, или применять и то и другое. Однако охлаждение может вызывать сжатие, а также значительное разрушение структуры зерен коренной породы вблизи буровой скважины, тем самым видоизменяя характер передачи энергии к коренной породе. Оболочка заряда будет также видоизменять передачу

энергии к стенкам буровой скважины. В любом случае конструкция оболочки должна свести к минимуму число обломков в скважине.

Для доказательства возможности использования ТНТ для стимулирования скважин с температурой $\sim 400^{\circ}\text{C}$ в забое в Центре ВМФ США в 1972 г. были проведены испытания с применением упакованных в тефлон образцов ТНТ. Тефлон был выбран из-за низкого коэффициента теплопроводности, совместимости с ТНТ и способности противостоять быстрому разложению при температурах до 440°C . Кроме того, применение тефлона исключает внесение металлических обломков в скважину. Для данных испытаний тефлоновые цилиндры изготовлялись из заготовки диаметром 45 мм путем высверливания отверстий с различными внутренними диаметрами, обеспечивающими толщину стенки 3,2; 6,4; 9,5 и 12,7 мм. Тефлоновые цилиндры заполнялись ТНТ до высоты 12,7 мм от верха и верхний торец закрывался тефлоновой крышкой толщиной 25,4 мм. В центре заряда и на поверхности раздела с тефлоновой стенкой располагались термомпары. Затем каждый цилиндр с зарядом был помещен в нагревательный элемент в виде алюминиевой трубки. По экспериментальным результатам для цилиндров диаметром 45 мм было рассчитано время спекания для цилиндров большего диаметра. Эти предварительные данные указывают, что тефлоновая стенка толщиной 6,4 мм гарантирует защиту ВВ в течение ~ 30 мин для цилиндров диаметром 18 см и более. Путем увеличения толщины стенки можно еще более увеличить интервал времени до спекания ВВ. Таким образом, выбор подходящей толщины тефлоновой стенки обеспечивает проведение подготовительных работ, а также размещение и взрыв зарядов из ТНТ в неохлаждаемых скважинах с температурой до 400°C .

При попытке проверить данные соображения на практике приходится сталкиваться с весьма высокими температурами, как например при разработке геотермального месторождения на Гавайях, где в зоне теплообмена можно ожидать $650-1200^{\circ}\text{C}$. При температурах выше 400°C заряды из ТНТ можно использовать при организации соответствующей защиты. Однако такая защита эффективна лишь ограниченное время, кроме того, уменьшает объем ВВ и экранирует стенки буровой скважины. Наилучшим выходом, очевидно, было бы использование материала оболочки одновременно в качестве изолирующего и абляционного материала.

Если требуется большее время, чем обеспечиваемое с помощью заключенного в оболочку ТНТ в промежуточном интервале температур $200-300^{\circ}\text{C}$, можно использовать основной заряд ТАКОТ, в котором ТАКОТ служит поглотителем тепла и изолятором для детонатора из азидо свинца с воспламенителем НОНА. В высокотемпературном диапазоне $300-500^{\circ}\text{C}$ можно использовать в качестве основного заряд НОНА до температур 400°C . Однако для защиты дето-

натора из азида свинца заряд НОНА необходимо снабдить абляционной системой с обдувом.

Заключение

На основе изложенного можно сделать только три общих вывода.

1. Стимулирование геотермальных скважин с помощью взрыва вполне осуществимо при современном уровне техники.
2. Исследование поведения горных пород, подвергающихся импульсной нагрузке, в особенности при повышенных температурах и в условиях насыщения жидкости находится на ранней стадии развития.
3. Технология изготовления высокотемпературных ВВ также находится на начальной стадии развития. Стимулирование геотермальных скважин, возможно, будет способствовать усовершенствованию технологии, а также снижению стоимости производства ВВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Austin C. F., Lined cavity shaped charges and their use in rock and earth materials, Bulletin 69, New Mexico Bureau of Mines, Socorro, N. M., 1959.
2. Austin C. F., Selection criteria for geothermal prospects, Papers presented at AIME Pacific Southwest Mineral Industry Conference, Sparks, Nev., May 5 - 7, 1965, pt. C, report 13, 1966.
3. Austin C. F., Austin W. H., Jr., Leonard G. W. Geothermal science and technology, A national program, Technical series 45-029-72, U. S. Naval Weapons Center, China Lake, Calif., 1971.
4. Austin C. F., Cosner L. N., Pringle J. K., Shock wave attenuation in elastic and anelastic media, Trans. Soc. Mining Engineers, 1966.
5. Austin C. F., Pringle J. K., Comments on explosively formed fractures in rock, Trans. Soc. Mining Engineers (1964).
6. Austin C. F., Detailed response of some rock targets to jets from lined-cavity shaped charges, *J. Petrol. Techn.* (1964).
7. Davis T. L., The chemistry of powder and explosives, New York, Wiley, 1956.
8. Goldsmith W., Austin C. F., Some dynamic characteristics of rock, In H. Kolsky, ed., Stress waves in elastic solids, Berlin, Springer Verlag, 1964.
9. Goldsmith W., Austin C. F., Wang H.-C., Finnegan S., Stress waves in igneous rocks, *J. Geophys. Res.*, **71**, No.8 (1968).
10. Rinehart J. S., Influence of Poisson's ratio on the fracture patterns generated by impulsive loads, NOTS TP 3624, Naval Ordnance Test Station, China Lake, Calif., 1964.
11. Rinehart J. S., Pearson J. Explosive working of metals, New York, Pergamon-MacMillan, 1963.
12. Robertson H. P., Terminal ballistics, Committee on Passive Protection Against Bombing, National Research Council, Washington, D. C., 1941.

13. Tolch N. A., Bushkovitch A. V., Penetration and crater volume in various kinds of rocks as dependent on caliber, mass, and striking velocity of projectile, Report 6 41, Ballistic Research Laboratories, Aberdeen Proving Ground, Md, 1947.
14. Von Egidy A., Finger M., Hill M., Ornellas D., Ellison E., Kury J., A new liquid explosive, NTN, UCRL-5861, Lawrence Radiation Laboratory, University of California, Livermore, Calif., 1960.

16. ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ ПРИ СТИМУЛИРОВАНИИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ЯДЕРНОГО ВЗРЫВА

Г. М. Сэндквист, Г. Э. Вэн¹⁾

Соединенные Штаты Америки испытывают энергетический кризис, который особенно остро ощущается в области электроснабжения. Согласно прогнозам Национальной энергетической службы и Федеральной энергетической комиссии, потребности наши в электроэнергии возрастут в 1990 г. примерно в 4 раза и составят $1,26 \cdot 10^6$ МВт произведенной мощности по сравнению с $0,34 \cdot 10^6$ МВт, потребленных в 1970 г. Увеличение потребности в электроэнергии обусловлено ростом населения, а также ростом потребления энергии на душу населения.

В будущем возможна еще большая нехватка энергии вследствие трудовых конфликтов, недостаточно быстрого расширения производства электроэнергии, низкой производительности труда, неправильно прогнозировании энергетических потребностей, изменения норм потребления, задержек, связанных с судебными исками и патентованием, а также усилением общественного беспокойства в связи с загрязнением окружающей среды при производстве и потреблении энергии. В частности, более 50% окиси серы, присутствующей в загрязненном воздухе страны, выделяется при производстве электроэнергии из органических топлив.

Острый интерес общественности к проблемам загрязнения окружающей среды пробудился в начале 60-х годов и в настоящее время достиг масштабов крестового похода за осуществление общенациональных мероприятий, направленных на улучшение и предохранение окружающей среды от загрязнения. Эта компания по охране природы заставила Федеральное правительство и местные органы управления принять ряд постановлений. Решимость наши подчинить энергетику требованиям, продиктованным заботой об окружающей среде, нашла свое выражение в следующем заявлении Федеральной энергетической комиссии, сделанном в 1970 г.: "В наше время мы наблюдаем воз-

¹⁾ Сэндквист Г. М. — профессор кафедры механики университета шт. Юта, Солт-Лейк-Сити; Вэн Г. Э. — профессор кафедры ядерной техники университета шт. Нью-Мексико, Альбукерке.

никновение новых общественных представлений, из которых наиболее важным является новое отношение к проблеме защиты окружающей среды и осознание необходимости использования наших энергетических ресурсов в соответствии с вытекающими из этого ограничениями".

В настоящее время производство основной доли электроэнергии обеспечивается ископаемым топливом и гидроэнергетическими ресурсами, однако, по утверждению многих специалистов, производство электроэнергии из геотермальных ресурсов менее вредно для окружающей среды, чем другие ныне используемые методы преобразования тепловой энергии. Опыт эксплуатации нескольких небольших геотермальных станций, по-видимому, подтверждает справедливость этого утверждения.

Число и размеры геотермальных месторождений, подобных Долине Больших Гейзеров, расположенной 130 км севернее Сан-Франциско, которые легче всего осваиваются, по всей вероятности, весьма ограничены /5, 8/ и не могут внести существенный вклад в удовлетворение национальных нужд в электроэнергии. Однако если, согласно Плушерской программе, составленной Комиссией по атомной энергии США в 1957 г., стимулирование потенциальных геотермальных месторождений с помощью подземных ядерных взрывов окажется безопасным и допустимым по воздействию на окружающую среду, то вклад геотермальной энергетики в национальную энергетику значительно увеличится. Воздействие такого ядерного взрыва на окружающую среду изучено неполно, поэтому проблема остается злободневной. В гл. 10 рассматриваются проблемы воздействия на окружающую среду при производстве электроэнергии из естественных геотермальных месторождений; в данной главе рассматриваются вопросы дополнительного воздействия стимулирования с помощью ядерного взрыва, которое экспериментально еще не исследовано.

Хотя в настоящее время нет действующих геотермальных месторождений, стимулированных ядерным взрывом, Комиссия по атомной энергии располагает обширными теоретическими и экспериментальными данными относительно подземных ядерных испытаний. Со времени подписания договора об ограничении ядерных испытаний в августе 1963 г. США сообщили о проведении около 250 подземных ядерных взрывов с тротильным эквивалентом от менее 1 кт до более 1 Мт. Большинство этих испытаний было проведено на испытательном полигоне в шт. Невада. Три испытания, согласно Плушерской программе, проводились в других районах: взрыв "Гном" произведен вблизи Карлсбада, шт. Нью-Мексико, в 1969 г.; два эксперимента по стимулированию месторождений природного газа - "Тэзбагги" вблизи Фармингтона, шт. Нью-Мексико, в 1967 г. и "Рулисон" вблизи Гранд-Валли, шт. Колорадо, в 1969 г. В будущем намечены новые эксперименты по стимулированию месторождений природного газа, например "Рио-Бланко" и "Вэгон-Вилл". На основе этих испы-

таний можно определять и прогнозировать последствия подземных ядерных взрывов для окружающей среды.

При рассмотрении вопроса о стимулировании геотермальных ресурсов с помощью ядерных взрывов будем предполагать, что основная сфера использования геотермального тепла — это производство электроэнергии. Многочисленные аспекты влияния на окружающую среду извлечения геотермальной энергии, стимулированной ядерным взрывом, удобно классифицировать по трем периодам эксплуатации геотермального месторождения: предпусковые работы, эксплуатация станции и работы после остановки станции.

Предпусковые работы

Первый период в эксплуатации стимулированного ядерным взрывом геотермального месторождения, хотя и относительно короткий по сравнению с потенциальным временем эксплуатации станции, является очень важным — именно в течение этого периода должны быть установлены безопасность, осуществимость и приемлемость всего проекта в целом с точки зрения воздействия на окружающую среду. Наибольшее беспокойство при этом вызывают возможные последствия ядерных взрывов, позволяющих получить требуемое количество тепловой энергии для работы электростанции.

Геологические исследования. Необходимость широкого и исчерпывающего геологического изучения месторождения очевидна. Во-первых, следует установить, что месторождение обладает потенциально пригодным для эксплуатации источником геотермальной энергии и что ядерный взрыв улучшит его характеристики. Геологические исследования и испытания должны также предоставить основные сведения о природе, структуре и важнейших характеристиках горных пород и почвенных образований месторождения. Эти данные необходимы для оценки смещений горных пород при взрыве и возможной утечки радиоактивности.

Гидрологические и метеорологические исследования. В окрестностях месторождения необходимо провести гидрологические исследования главным образом для того, чтобы установить наличие подземных и поверхностных вод, определить площадь их распространения и расход до и после ядерного взрыва. Эти исследования проводятся с целью предотвращения недопустимого загрязнения водных ресурсов.

Одобрение Федерального правительства и местных властей. Национальный закон об охране окружающей среды был принят 1 января 1970 г. Закон предусматривает, что деятельности, имеющей общегосударственный размах и способной оказать существенное влияние на окружающую среду, должно быть предпослана подробная декларация, содержащая: 1) оценку общего влияния предлагаемых мероприятий на окружающую среду; 2) перечень всех неблагоприятных воз-

действий на окружающую среду, которых невозможно избежать; 3) альтернативы предлагаемого мероприятия; 4) оценку соотношения между местным кратковременным воздействием на окружающую среду и продолжительным воздействием и ростом производительности; 5) оценку всевозможных необратимых и непоправимых изменений окружающей среды, которые могут быть вызваны предлагаемыми мероприятиями. Прежде чем будет одобрено применение ядерного взрыва для геотермального стимулирования, должны быть определены и оценены его общие последствия для окружающей среды. Подобные декларации подготавливаются для каждого эксперимента по стимулированию с помощью ядерного взрыва, как при осуществлении проектов "Рио-Бланко" и "Вэгон-Вилл", и рассматриваются Агентством охраны окружающей среды.

В сентябре 1971 г. министерство внутренних дел США, осуществляя постановление о геотермальном паре от 1970 г., подготовило проект "Декларации о защите окружающей среды при проведении геотермальных программ" в соответствии с требованиями Национального закона об охране окружающей среды. Помимо удовлетворения требованиям Агентства охраны окружающей среды Комиссия по атомной энергии США, согласно закону об атомной энергии 1946 г. с поправками 1954 г., несет ответственность за здоровье и безопасность нации и осуществляет контроль над ядерными взрывами, проводимыми по Плушерской программе. Более того, для проведения любых ядерных испытаний за пределами испытательного полигона в Неваде требуется одобрение президента. Необходимо также, чтобы последствия для окружающей среды, связанные с реализацией программы, были широко обсуждены и одобрены на заседаниях местных административных органов.

Последствия ядерного взрыва

Смещение горных пород. Колоссальная энергия, высвобождающаяся при подземном ядерном взрыве, вызывает испарение горной породы и создает расширяющуюся сферическую полость. Огромное давление в расширяющейся полости порождает ударную волну, распространяющуюся по всем направлениям от центра взрыва. Когда ударная волна достигает поверхности земли, происходят колебания почвы, во многом напоминающие обычное землетрясение. В результате даже на значительном расстоянии от места взрыва могут произойти геологические нарушения и разрушения сооружений созданных человеком.

Как и при обычном землетрясении, люди, животные и обитатели моря могут быть убиты или ранены обломками или погибнут от других последствий землетрясения. Растительность — деревья, растения и травяной покров — может быть уничтожена оползнями и обломками горных пород или разрушением корневой системы. Следует также

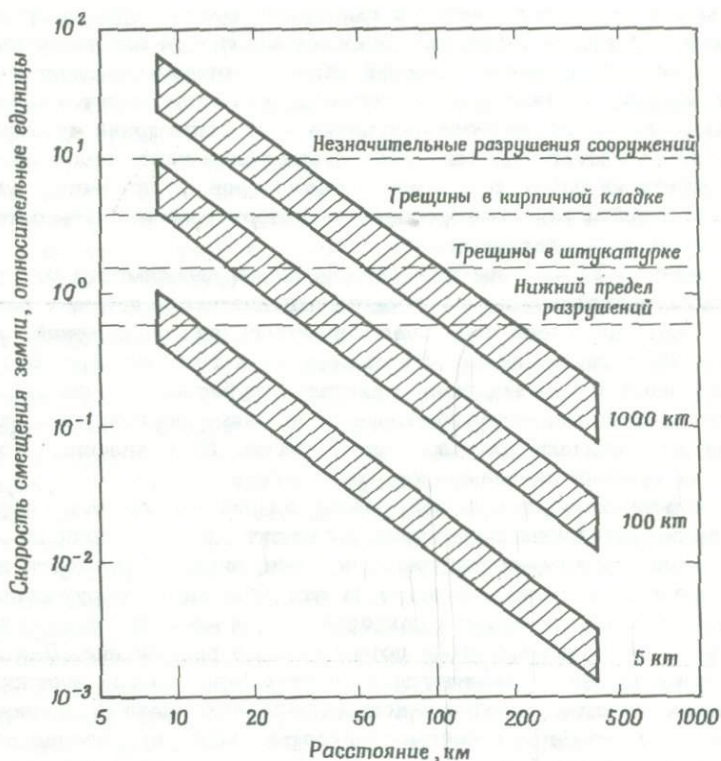
учитывать косвенные проявления смещения горных пород и грунта, например, изменения структуры дренажа местности или качества местных вод. Разрушение строений является прямым последствием землетрясений, однако промышленные предприятия несут ущерб главным образом по косвенной причине — от сокращений производства в результате остановки работ и эвакуации персонала в целях безопасности на расстояния многих километров от эпицентра взрыва. Автомобильный и железнодорожный транспорт должны быть остановлены, отдыхающие эвакуированы.

В радиусе 30–80 км от места взрыва в зависимости от глубины взрыва, мощности заряда и числа используемых ядерных зарядов должна быть проведена подробная инвентаризация сооружений. Здания, мосты, туннели, линии электропередач и телефонной связи, газовые, нефтяные и артезианские скважины, трубопроводы, шахты, аэропорты, плотины, автомобильные и железные дороги, находящиеся в радиусе потенциальных разрушений, должны быть внесены в опись с оценкой степени их возможного разрушения.

В большинстве случаев разрушение зданий вызывается главным образом сейсмическим смещением и зависит от расстояния до места взрыва, его глубины, структуры основания, числа и мощности взрывных устройств, а также сейсмостойкости отдельных сооружений. Существуют методы учета этих факторов [3], позволяющие довольно точно оценить предполагаемые потенциальные разрушения. Для данного сооружения они определяются по соотношению между прогнозируемой интенсивностью колебания почвы, местонахождением здания, его возрастом, состоянием и сейсмостойкостью. Опыт проведения подземных ядерных взрывов на полигоне шт. Невада может оказаться полезным для оценки потенциального разрушения конкретного объекта от конкретного взрыва на данном расстоянии от этого объекта. На фиг. 1 показано смещение почвы в зависимости от расстоянием от эпицентра взрыва для взрывов мощностью 5, 100 и 1000 кт и нанесены зоны различных разрушений.

При мегатонном взрыве и даже при взрыве мощностью 100 кт разрушения зданий могут быть значительными на очень больших расстояниях. Поэтому использование ядерных устройств в несколько мегатонн, согласно Плушерской программе, на большей части Соединенных Штатов, по-видимому, практически невозможно. Стоимость разрушенных зданий при проведении взрыва "Рулисон" мощностью 40 кт в относительно изолированном районе шт. Колорадо составила ~90 тыс. долл. Нетрудно показать, что взрыв мощностью 1 Мт, произведенный на расстоянии 30–50 км от города с населением 10 тыс. человек, может вызвать разрушения, оцениваемые в 0,5 млн. долл.

Подземные ядерные испытания в шт. Невада сопровождались небольшими толчками. Эти толчки вызваны небольшими смещениями



Ф и г, 1. Типичные сейсмические разрушения, вызванные подземным ядерным взрывом.

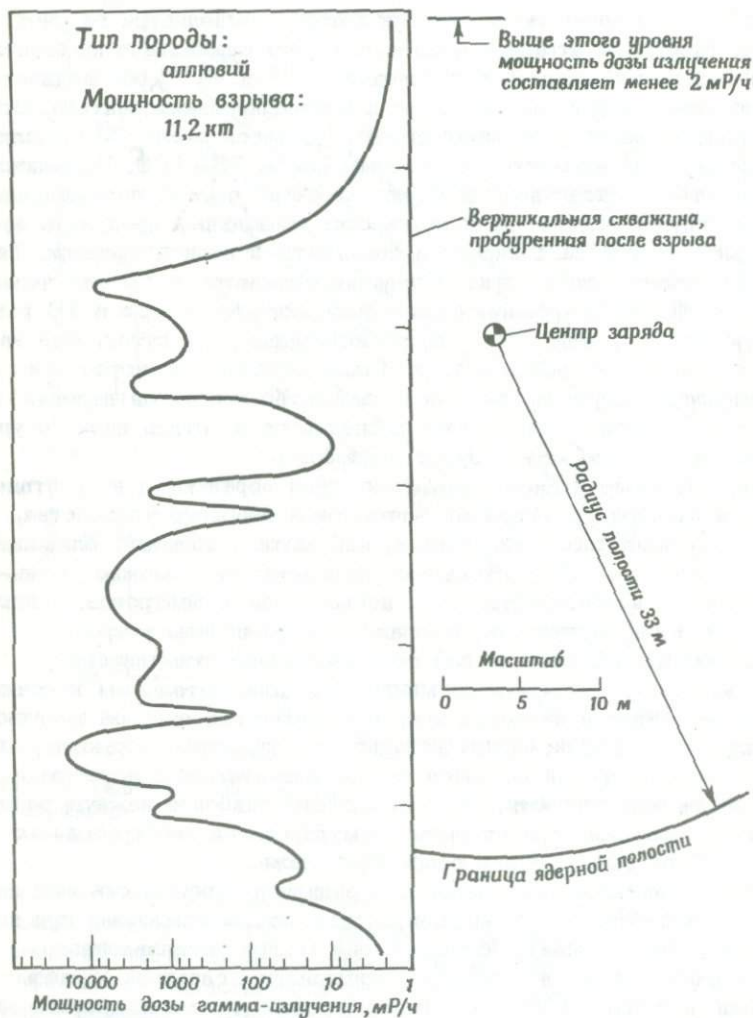
плоскостей сброса и являются результатом освобождения естественной сейсмической энергии. В районах с высокой сейсмической активностью, где часто бывают расположены потенциальные геотермальные месторождения, естественные землетрясения могут быть ускорены ядерным взрывом. Возможно, это будет способствовать уменьшению последствий от естественных землетрясений, поскольку позволит высвободить менее значительную сейсмическую энергию прежде, чем она разрядится крупным землетрясением. С другой стороны, ядерный взрыв может ускорить возникновение сильного землетрясения, которое произошло бы само по себе лишь через несколько столетий. Опыт Плушерской программы, по-видимому, позволит ответить на эти вопросы.

Выход радиоактивного излучения в атмосферу. В настоящее время для проведения любых ядерных взрывов, в том числе относитель-

но "чистых", большая часть энергии которых выделяется за счет синтеза, требуются атомные взрыватели. Эти взрыватели мощностью 3 кт и более, выделяемой при делении U^{235} и Pu^{239} обеспечивают высокую температуру, необходимую для инициирования синтеза. Вследствие реакции деления во взрывателе образуется около 200 различных изотопов 36 элементов с атомным весом 75–160. Большинство этих изотопов радиоактивны и имеют короткий период полураспада. Согласно грубой оценке, радиоактивность смешанных продуктов деления уменьшается на порядок за семикратный период времени. Так, например, испускание продуктов деления снижается в 10 раз через 7 ч по сравнению с уровнем радиации первого часа, еще в 10 раз в следующие 7 ч, еще в 10 раз по истечении двух суток, еще на порядок после двух недель и т. д. Таким образом, по истечении соответствующего периода времени большинство продуктов деления с малой продолжительностью жизни распадается до столь низкого уровня радиации, что его можно будет пренебречь.

Искусственные радиоактивные вещества образуются вследствие захвата нейтронов устойчивыми элементами ядерного устройства, а также горными породами, такими, как натрий, кремний, алюминий, железо и марганец. Искусственную радиоактивность можно уменьшить, окружая ядерное устройство поглотителями нейтронов, например бором. Радиоактивность, вызванную применением устройств, предназначенных специально для геотермального стимулирования, можно, вероятно, сократить до минимума. Дополнительным источником радиоактивности является непрореагировавшее ядерное топливо: уран, плутоний, тритий. Образовавшийся в результате термоядерных реакций синтеза тритий является самым значительным источником начальной радиоактивности, представляющим наиболее важную радиологическую проблему при ядерном стимулировании геотермальных ресурсов. Этот вопрос будет рассмотрен ниже.

Экспериментальные исследования радиации буровых скважин показывают, что основная доля радиоактивности, возникающей при подземных ядерных взрывах, сосредоточена внутри расплавленного стекловидного вещества, которое накапливается главным образом в основании полости. На фиг. 2 показан профиль гамма-излучения, полученный через год после Симаронского испытания. Профиль радиации был измерен в скважине, пробуренной на расстоянии 5 м от скважины с ядерным зарядом. Доза гамма-излучения представлена в зависимости от глубины, отсчитываемой от центра заряда. Радиус полости перед ее разрушением составлял 33 м. Большая часть радиации заключена между центром заряда и основанием полости. Выше центра заряда радиация быстро спадает до величины ≈ 2 мР/ч. Для сравнения напомним, что средняя мощность дозы излучения, которую воспринимает человек вследствие естественной радиоактивности Земли и космической радиации, составляет 125 мР/год.



Ф и г. 2. Примерный профиль γ -излучения через год после Симаронского испытания [7].

В стекловидном веществе на дне полости содержится большая часть радиоактивности, и практика показывает, что менее 10% радиоактивных солей вымывается горячей водой в течение продолжительного периода времени. Эта проблема требует серьезного исследования с целью изучения поведения радиоактивных элементов с большой

продолжительностью жизни в процессе эксплуатации геотермального месторождения.

Возможны два метода стимулирования геотермальных месторождений с помощью ядерного взрыва: 1) стимулирование геотермальных водоносных пластов на глубине 1–2,5 км с использованием ядерных устройств мощностью 5–100 кт; 2) использование ядерных взрывов мощностью 100–1000 кт для создания трещиноватости в горячих сухих горных породах на глубине 2,5–4 км. Вероятность выхода в атмосферу радиоактивного излучения в момент взрыва в этих двух случаях различна. В первом случае вероятность выхода радиоактивного излучения в атмосферу и доля начальной радиации будут выше, чем во втором. Однако вследствие того, что в первом случае ядерный взрыв, вероятно, слабее, результирующий начальный уровень радиации, возможно, соответственно меньше. Поэтому разумно предположить, что с учетом этих двух факторов произведение вероятности выхода радиоактивного излучения в атмосферу на начальный уровень радиации, возможно, будет примерно одинаковым в обоих случаях.

Хотя утечка радиации теоретически возможна, не было зарегистрировано ни одного случая утечки в атмосферу при подземных ядерных взрывах на глубине более 1,2 км. Просачивание радиоактивных веществ в грунтовые воды в такой же степени маловероятно, хотя и возможно, либо вследствие некачественного цементирования и обсадки скважины, либо вследствие образования непредвиденных разрывов и трещин в окружающих породах. Поскольку технология цементирования при высоких температурах еще не совершенна, трудно гарантировать отсутствие утечек радиации.

В табл. 1 приведены данные о начальной радиоактивности изотопов, представляющих наибольшую опасность для окружающей среды, при взрывах различных мощностей и типов, используемых для геотермального стимулирования. Наиболее вероятен мгновенный вынос или просачивание главным образом таких газов, как ксенон, аргон, криптон, йод и тритий. Но даже этим газам перед выходом на поверхность предстоит пройти извилистый путь сквозь трещины и разрывы. На основе экспериментов с кратерами установлено, что при мгновенном выходе радиации в атмосферу выносятся не более 5% общей радиоактивности, а при замедленном выходе или просачивании максимальный процент выноса будет еще ниже (табл. 2).

При мгновенном выходе радиации в атмосферу первоначальное рассеивание радиоактивных веществ будет зависеть от метеорологических условий и географии местности. Обычно район выпадения радиоактивных осадков ограничен очень узким коридором, вытянутым в преимущественном направлении ветра. На фиг. 3 приведены кривые равных доз радиации при взрыве мощностью 100 кт в предположении

Таблица 1

Начальная радиоактивность некоторых радиоизотопов, представляющих наибольшую опасность для окружающей среды, при взрывах различных мощностей и типов /2, 6/

| Радио- изотоп | Атомный взрыв | | | | Термоядерный взрыв | | | | | |
|-------------------|---------------------------------|------|-----------------------------------|-------|---|------|--------------------------------------|-------|--|-------|
| | 5 кт ($3,5 \cdot 10^6$ кКи) | | 100 кт ($7,0 \cdot 10^7$ кКи) | | атомный взрыватель 3 кт ($2,1 \cdot 10^6$ кКи) | | 100 кт (97 кт энергии синтеза) | | 1000 кт (997 кт энергии синтеза) | |
| | А | В | А | В | А | В | А | В | А | В |
| H ³ | 0,005 | 1,10 | 0,1 | 22,0 | 0,003 | 0,66 | 0,0 | а | 0,0 | б |
| C ¹⁴ | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,002 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,002 | 0,0 | 0,023 |
| Ar ³⁷ | 0,0 | 12,5 | 0,0 | 250 | 0,0 | 7,5 | 0,0 | 700 | 0,0 | 7000 |
| Kr ⁸⁵ | 0,10 | 0,0 | 2,0 | 0,0 | 0,06 | 0,0 | | | | |
| Sr ⁹⁰ | 0,75 | 0,0 | 15,0 | 0,0 | 0,45 | 0,0 | | | | |
| I ¹³¹ | 725 | 0,0 | 14 500 | 0,0 | 495 | 0,0 | | | | |
| Xe ¹³¹ | 5,0 | 0,0 | 100 | 0,0 | 3,0 | 0,0 | | | | |
| Xe ¹³³ | 1650 | 0,0 | 33 000 | 0,0 | 1000 | 0,0 | | | | |
| Cs ¹³⁷ | 0,90 | 0,0 | 18,0 | 0,0 | 0,54 | 0,0 | | | | |

а 28,0 + 1940; б 280,0 + 19 400 (последняя цифра в обоих случаях обозначает остаточный тритий при расходе 20 000 Ки/кт)

А — радиоактивность продуктов деления; В — искусственная радиоактивность изверженной породы.

Таблица 2

Присутствие потенциально летучих радиоактивных изотопов в изверженной породе через 180 суток после ядерного взрыва мощностью 1000 кт /1/

| Радиоизотоп | Период полураспада | Атомный взрыв, кКи | Термо-ядерный взрыв ^а , кКи | Концентрация радиации ^б , Ки/мл | | Летучесть в паре (8 МН/м ² , 623°К) |
|-------------------|--------------------|--------------------|--|--|------|---|
| | | | | воздух | вода | |
| Kr ⁸⁵ | 10,8 года | 20 | 0,06 | 0,3 | - | Остаточный газ Газообразный предшественник |
| Sr ⁹⁰ | 28,8 года | 150 | 0,45 | 3 · 10 ⁻⁶ | 0,3 | |
| Ru ¹⁰³ | 40 суток | 1150 | 3,45 | 0,003 | 80 | При окислении - высокая, при восстановлении - низкая |
| Ru ¹⁰⁶ | 1 год | 1000 | 3,0 | 2 · 10 ⁻⁴ | 10 | При окислении - высокая, при восстановлении - низкая |
| Sb ¹²⁵ | 2,7 года | 60 | 0,18 | 9 · 10 ⁻⁴ | 100 | По-видимому, высокая |
| Te ¹²⁷ | 109 суток | 90 | 0,27 | 0,001 | 50 | Высокая |
| Cs ¹³⁷ | 30 лет | 180 | 0,54 | 5 · 10 ⁻⁴ | 20 | В присутствии CO ₂ - низкая, без CO ₂ - высокая (30%) |

Искусственные радиоизотопы в почве

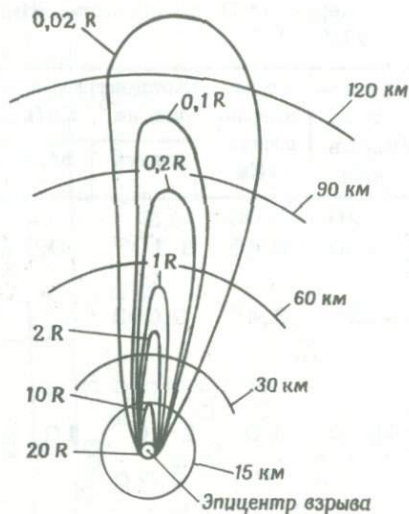
| | | | | | | |
|-------------------|------------|-----|---------------------|----------------------|------|---|
| H ³ | 12,3 года | 220 | 20 290 ^в | 0,2 | 3000 | Остаточный газ и тритийсодержащий пар |
| Na ²² | 2,6 года | - | 0,6 | 3 · 10 ⁻⁴ | 30 | - |
| P ³² | 14,3 суток | 2 | 2,5 | 0,002 | 20 | - |
| S ³⁵ | 88 суток | 29 | 40,0 | 0,009 | 60 | - |
| Ar ³⁷ | 35 суток | 70 | 200 | 100 | - | Остаточный газ |
| Cs ¹³⁷ | 2 года | 14 | 18,3 | 4 · 10 ⁻⁴ | 9 | В присутствии CO ₂ - низкая, без CO ₂ - высокая (30%) |

Примечание. К другим представляющим интерес изотопам, которые обычно присутствуют в виде нелетучих соединений, относятся Fe⁵⁹, Co⁶⁰, Ce¹⁴⁴, Ru²³⁹, Ru²⁴¹ и многие трансурановые изотопы.

а) Эти значения рассчитаны в предположении линейной зависимости по данным для 50-килотонного атомного и термоядерного устройств. Предполагается, что для термоядерного устройства используется атомный взрыватель мощностью 3 кт.

б) Максимальные значения концентрации радиации для неограниченного пространства без учета растворимости смеси.

в) Предполагается, что остаточный тритий составляет 2 г/кт энергии синтеза.



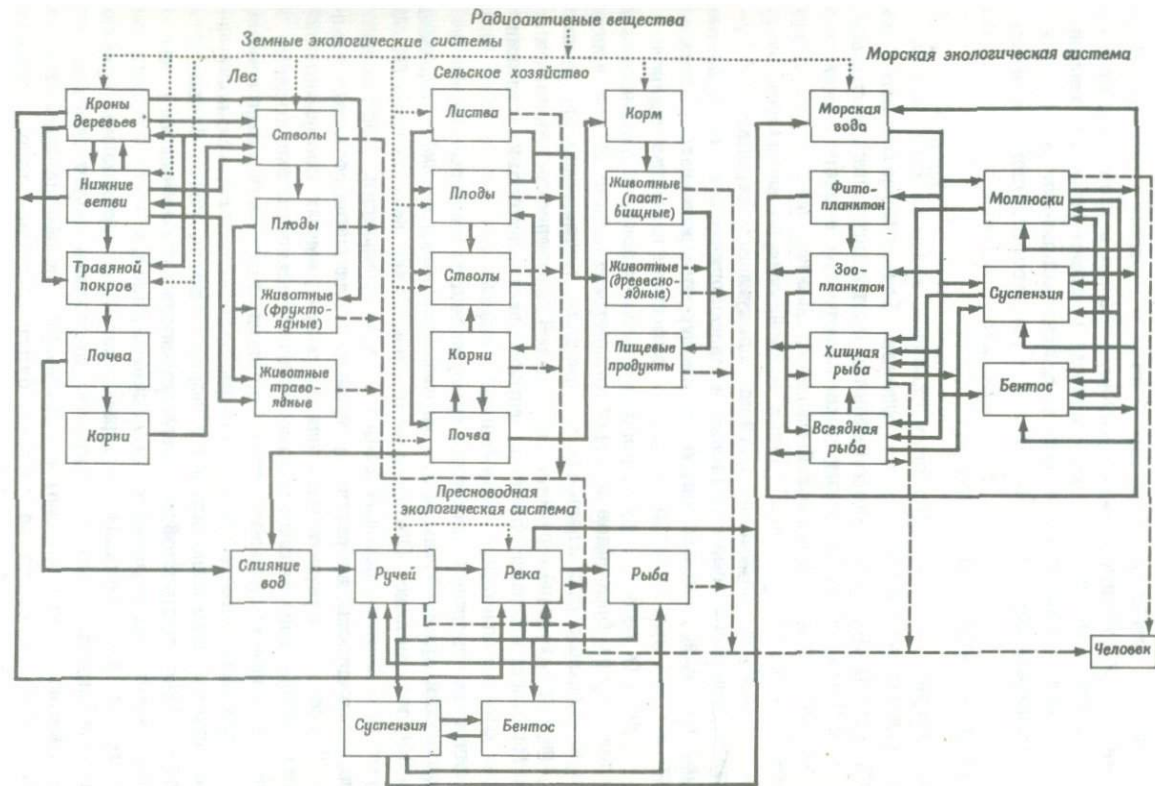
Ф и г. 3. Примерные кривые равных доз излучения при взрыве мощностью 100 кт и выходе в атмосферу 2 – 5% радиоактивности [9].

выхода в атмосферу 2 – 5% радиоактивности. Из этого графика видно, что такой значительный выход радиации в атмосферу может нанести серьезный ущерб окружающей среде в относительно узкой полосе на расстоянии 50 – 100 км.

Воздействие на окружающую среду радиоактивного излучения можно систематизировать, как и оценки сейсмичности. Хотя прямое радиоактивное облучение людей вызывает наибольшее беспокойство, необходимо принимать во внимание радиоактивные осадки на растениях и в водоносных горизонтах и реках, а также вторичное воздействие радиации на человека через пищу. На фиг. 4 приведена идеализированная диаграмма переноса продуктов питания к человеку, Неотъемлемой частью программы безопасного использования ядерного взрыва для стимулирования геотермального тепла должна быть разработка методов защиты окружающей среды, способных регистрировать и контролировать перенос и концентрацию радиоактивных веществ в биосфере.

Другие явления при ядерных взрывах. Геологический анализ потенциального геотермального месторождения должен содержать тщательную оценку еще двух возможных явлений, хотя их вероятность невелика.

Во-первых, должна учитываться возможность излияния на поверхность горных пород, расплавленных в результате подземного



Ф и г. 4. Идеализированная диаграмма переноса продуктов питания к человеку [4].
 --- перенос к человеку; . . . радиоактивность; — пути переноса веществ.

ядерного взрыва. Вероятность возбуждения вулканического извержения зависит от глубины залегания магмы и наличия открытых разрывов или жерл вулканов, через которые магма могла бы излиться на поверхность. Во-вторых, при наличии подземных вод с температурой, близкой к температуре кипения, ядерный взрыв может привести к мгновенному испарению воды и гидротермальному взрыву.

Сооружение и оборудование станции

Рассмотрим теперь подготовку скважин, а также сооружение станции и вспомогательного оборудования. Хотя считается, что воздействие на окружающую среду бурения, рытья котлована и строительства хорошо известно, опыт показывает, что экологический ущерб от этих операций может быть не меньшим, чем от подземного ядерного взрыва. С точки зрения воздействия на окружающую среду должны быть тщательно изучены следующие операции: 1) бурение для проведения геологических и гидрологических исследований, закладка ядерного заряда, а также бурение дозиметрических скважин; 2) выемка и насыпка грунта для строительства дорог, железнодорожных путей, трубопроводов, линий электропередачи, каналов, охлаждающих бассейнов и строительных площадок; 3) транспортировка и хранение строительных материалов, возведение временных жилищ для строительных рабочих и т. д.; 4) перераспределение и потери материалов и стоки; 5) проектирование и планировка станции с учетом совместимости с окружающей средой.

Количество тепловой энергии, требуемое для работы тепловой электростанции средней мощности, в течение срока службы, оцениваемого в 30 лет, велико. Обычная электростанция мощностью 250 МВт расходует за 30 лет работы $\sim 250 \cdot 10^9$ кВт·ч энергии. Поскольку допустимая мощность ядерного устройства для мирного использования в США ограничена потенциальными разрушениями сооружений, радиологическим заражением, возможными сейсмическими последствиями, мнением общественности и прочими экологическими соображениями, для успешной и безопасной разработки геотермального месторождения с помощью ядерного взрыва потребуется большое количество зарядов средней и малой мощности, в особенности для использования тепла горячих сухих горных пород.

Программу эксплуатации геотермального месторождения, требующего многократных взрывов, можно осуществлять двумя способами. Либо все ядерные устройства, необходимые для обеспечения станции энергией в течение срока ее службы, будут взорваны перед началом сооружения станции, либо устройства будут взрываться по мере необходимости в течение времени эксплуатации станции, а сама станция должна быть сейсмостойкой, чтобы противостоять землетрясениям, или мобильной, чтобы ее можно было перемещать в безопасное

место на время взрыва, например используя водный путь и систему барж [1].

С точки зрения сохранения окружающей среды второй способ обладает определенными преимуществами, так как позволяет проводить радиологические измерения, а также контроль и другие исследования окружающей среды, требующие продолжительного времени для выявления значительных эффектов.

Работа станции

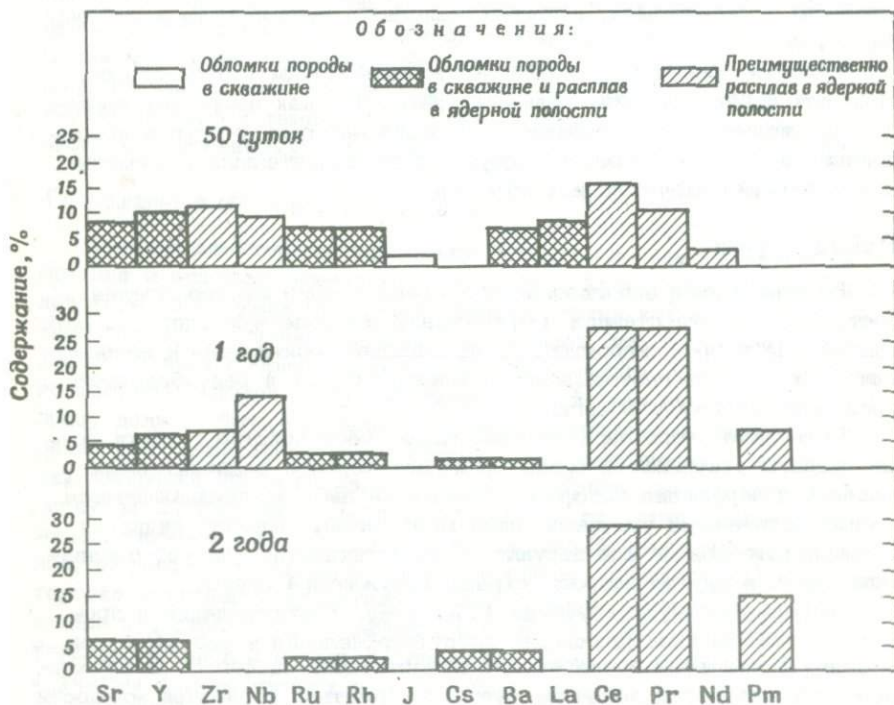
Второй период использования геотермального месторождения составляет работа станции, вырабатывающей полезную энергию. Это длительный период, вероятно, охватывающий десятилетия в зависимости от запасов геотермального месторождения и рентабельности производства электроэнергии.

В течение этого периода наибольшее беспокойство с точки зрения защиты окружающей среды вызывает перенос радиоактивных веществ и заражение биосферы, вызванные либо накапливающимися производственными утечками, либо мгновенным выносом радиации в результате аварии или нарушения герметичности. Следует проанализировать и другие вопросы охраны окружающей среды.

Вынос радиоактивных веществ в биосферу. Распределение и процентное содержание различных продуктов деления через 50 суток и через 1 и 2 года после взрыва представлено на фиг 5. В небольшом количестве эти вещества будут содержаться в рабочей жидкости (воде), используемой для переноса тепловой энергии из геотермального источника к станции. Количество каждого высвобождающегося изотопа будет зависеть от его химической и физической структуры, температуры и давления в полости и природы рабочей жидкости.

Вероятно, наибольшую опасность вызывают летучие радиоактивные вещества, которые не конденсируются внутри подземной полости и легко переносятся на поверхность земли рабочей жидкостью или через трещины. Хотя тщательный геологический анализ и глубокая закладка ядерных зарядов должны предотвратить случайную утечку этих газов через трещины, перенос их рабочей жидкостью, по-видимому, неизбежен. Эти потенциально летучие радиоактивные изотопы присутствуют в окружающей среде спустя 6 мес после ядерного взрыва мощностью 1000 кт (табл. 2). В геотермальной системе тритий может присутствовать в молекулярно-связанном состоянии в воде, газообразном водороде, H_2S , CH_4 , NH_3 и других подобных соединениях.

Неконденсирующиеся газы, присутствующие в паре тепловой электростанции, собираются в холодильнике. В естественных бассейнах эти газы обычно выбрасываются в атмосферу. В геотермальных системах, стимулируемых с помощью ядерных взрывов, выброс боль-



Ф и г. 5. Распределение и процентное содержание основных радиоактивных изотопов относительно общей радиоактивности продуктов деления [4].

щих количеств производственных газов с радиоактивными компонентами может быть нежелательным, поэтому, возможно, придется контролировать радиоактивность отработанных веществ, и если радиоактивность превышает установленный максимум концентрации, следует накапливать и консервировать эти радиоактивные компоненты или возвращать их в бассейн.

Если применяется прямой энергетический цикл с использованием пара из "ядерного котла" для работы турбины, возникает опасность загрязнения всей системы отложениями радиоактивных веществ, и возможность выброса радиации в атмосферу увеличивается. С точки зрения безопасности окружающей среды предпочтительнее использование в цикле незагрязненной вторичной жидкости, но к. п. д. станции при этом уменьшается. Независимо от применяемой системы требуется соответствующая регистрация и регулирование содержания радиоактивных веществ во всех блоках системы (трубопроводах, ре-

зернуарах, турбинах, холодильниках, вентилях и т. д.), в которых перемешаются или накапливаются радиоактивные вещества, в соответствии с установленными нормами.

Другим механизмом возможного переноса радиоактивных веществ, содержащихся в ядерной полости, является поток грунтовых вод вблизи полости. Скорости течения грунтовых вод в водоносных горизонтах обычно меняются от 0,3 до 300 м/год, хотя течение жидкости в непосредственной близости от полости может быть более интенсивным из-за щелей и трещин, созданных взрывом. Большинство радиоактивных веществ, однако, обычно движется значительно медленнее транспортирующей их воды вследствие процессов сорбции и дисперсии. Таким образом, скорость движения грунтовых вод представляет собой максимальную скорость перемещения радиоизотопов в водной системе.

Однако тритий (тритиевая вода) составляет исключение, перемещаясь со скоростью грунтовой воды. За промежуток времени в 10 периодов полураспада радиоактивность изотопа уменьшается в $\sim 10^3$ раз, а за промежуток в 20 периодов полураспада радиоактивность падает в 10^6 раз. Таким образом, даже при переносе с грунтовыми водами со скоростью 300 м/год радиоактивность трития с периодом полураспада ~ 12 лет уменьшится в 1000 раз на расстоянии 35 км от места взрыва. Тритий имеет биологический период полураспада в теле человека ~ 12 суток и не накапливается в человеческом организме благодаря процессам естественного удаления. Следовательно, он является одним из наименее опасных радиоактивных веществ, производимых ядерным взрывом, и поэтому его допустимая концентрация определяется величиной 3000 пКи/мл для воды любого назначения. Тем не менее вследствие большого количества непрореагировавшего трития (обычно около 2 г или 20 тыс. Ки/кт энергии синтеза) и проблем, связанных с диагностикой (тритий является низкоэнергетическим излучателем β -частиц без излучения фотонов, за исключением тормозного излучения с образованием β -частиц), а также с регулированием содержания различных фаз и соединений, которые могут включать в себя тритий, проблема контроля за тритийсодержащими веществами является наиболее значительной радиологической проблемой при разработке геотермальных ресурсов с помощью ядерных взрывов.

Другой серьезной проблемой является возможное выделение радиоактивных веществ в результате нарушения герметичности системы или повреждения трубопроводов. Проблемы переноса пара и отложений при стимулировании геотермальных месторождений с помощью ядерных взрывов рассматриваются в гл. 17.

Последствия аварий на станции и стихийных бедствий. Действующая геотермальная станция, подобно другим специальным промышленным объектам, отличается разнообразием процессов и оборудования.

При оценке целесообразности разработки данного геотермального месторождения следует принимать во внимание воздействие на окружающую среду стихийных бедствий или серьезных аварий, связанных с работой оборудования станции. Вероятность таких аварий на геотермальных электростанциях, по-видимому, такая же, как на обычных атомных станциях и станциях на органическом топливе. Специфические аспекты этой проблемы определяются типом месторождения и расположением геотермальной станции.

Выделение нерадиоактивных веществ и жидкие отходы станции. Хотя радиоактивное заражение биосферы представляет наибольшую потенциальную угрозу для окружающей среды стимулируемого геотермального месторождения, по-видимому, следует ожидать выделения и других отравляющих веществ. Необходимо исследовать выделение и отвод из действующей системы газов (CO_2 , H_2S , H_2 , CH_4NH_3 , галогенов), жидкостей (т. е. рассолов), а также твердых веществ (солей) и тепловой энергии. Эта проблема подробно рассматривается в гл. 10.

Биологические и общественные аспекты проблемы защиты окружающей среды. Чтобы гарантировать соблюдение Национального закона об охране окружающей среды от 1969 г., необходимо провести анализ биологической безопасности окружающей среды при стимулировании данного геотермального месторождения с помощью ядерных взрывов. На основе этого анализа можно было бы предсказать возможные последствия ядерного взрыва на экологические системы прилегающего района и рекомендовать действия, направленные на предупреждение или уменьшение возможных вредных последствий, а также мероприятия для предупреждения нежелательных явлений. Основная биологическая задача заключается в сведении к минимуму экологических изменений, которые могут возникнуть при разработке и эксплуатации геотермального месторождения. Поэтому необходимо изучить экологическую динамику данного района и описать земную и водную экологические системы. Необходимо также оценить возможные нарушения этих систем, включая угрозу различным биологическим видам, и принять соответствующие меры.

Важной проблемой воздействия на окружающую среду, которая часто недооценивается при строительстве больших промышленных объектов, являются возможные социально-экономические последствия. Появление крупных объектов часто вызывает изменения жилищных условий, деловой активности, распределения населения, работы транспорта занятости населения и функций местного управления. Хотя прогнозирование и оценка многих явлений затруднительны, общественное настроение и поддержка будут существенно зависеть от этих факторов, которым следует уделять пристальное внимание при комплексном изучении возможных воздействий на окружающую среду.

Период после прекращения работы станции

После того как работа электростанции прекратится, следует осуществлять контроль и меры предосторожности, гарантирующие безопасность общества и экологическую совместимость. Вследствие большой продолжительности жизни многих радиоактивных изотопов, образующихся в ядерной полости (таких, как Kr^{85} , Cs^{137} , тритий, Sr^{90} , плутоний, Ce^{144} и Ru^{106}), необходимо продолжать периодическую диагностику и регулирование радиации из полости, а также отоборудования. При необходимости следует регулировать и другие источники газообразных и жидких радиоактивных веществ, а также предусмотреть очистку территории месторождения и восстановление земель. Особого внимания заслуживает возложение постоянных обязанностей и ответственности за использованное геотермальное месторождение.

Заключение

Поскольку освоение ресурсов геотермальной энергии представляется привлекательным как с экономической точки зрения, так и с позиций сохранения окружающей среды, использование ядерных взрывов для стимулирования потенциальных геотермальных площадей заслуживает дальнейшего изучения. Однако проведение одного или нескольких подземных ядерных взрывов поднимает важные вопросы и проблемы, требующие критической оценки. Для стимулирования тепловой энергии сухих горных пород на значительной глубине в настоящее время представляется целесообразным использовать очень мощные (200–1000 кт) взрывы, которые могут вызвать землетрясения. При стимулировании гидротермальных бассейнов можно использовать менее мощные ядерные взрывы, но вследствие вероятной близости геологических образований к земной поверхности возможны серьезные последствия для окружающей среды как от воздействия радиоактивности, так и от землетрясения.

Стимулирование глубоких непроницаемых бассейнов природного газа с помощью ядерных взрывов было начато в 1967 г. К настоящему времени было осуществлено только два экспериментальных взрыва и еще два запланированы на следующие 2 года. Данные по воздействию на окружающую среду, полученные в этих экспериментах, представляют бесценную информацию для составления проекта геотермального стимулирования с помощью ядерных взрывов. По-видимому, целесообразно показать безопасность для окружающей среды стимулирования добычи природного газа, прежде чем переходить к стимулированию геотермальных месторождений.

Действенность принятых мер безопасности при проведении экспериментов по Плоушерской программе обнадеживает: ни одного слу-

чая травмы, лишь незначительные повреждения построек и минимальное воздействие на окружающую среду, обусловленное собственно взрывом. Кроме того, согласно Плушерской программе, ядерное устройство может быть взорвано, только когда установлено, что это не принесет прямого или косвенного ущерба людям или животным, а также экологическим системам, памятникам природы и созданным человеком сооружениям. Тем не менее при стимулировании с помощью подземного ядерного взрыва наибольшую опасность вызывает большое количество отложившихся в земле радиоактивных веществ и возможность их выхода в будущем на поверхность.

ЛИТЕРАТУРА

1. American Oil Shale Corporation, Battelle-Northwest, Westinghouse Electric Corporation, U. S. Atomic Energy Commission, Lawrence Livermore Laboratory, and Nevada Operations Office-AEC, A feasibility study of a geothermal power plant, USAEC Technical Report, No. PNE-1550, 1971.
2. Barge D. C., King W. C., Fission gas release curves, University of California Lawrence Livermore Laboratory Technical Report UCRL-50656, 1969.
3. Blume J. A., Ground motion effects, In Proc. Symp. Public Health Aspects of Peaceful Uses of Nuclear Explosives, USAEC Technical Report, No. SWRHL-82, 1969.
4. Glasstone S., Public safety and underground nuclear detonations, USAEC Technical Report, No. TID- 25708, 1971.
5. Hubbert M. K., Resources and man, "energy resources", Report to National Academy of Sciences, San Francisco, Freeman, 1969.
6. Knox J. B., et al., Radioactivity released from underground nuclear detonations: Source, transport, diffusion, and deposition, University of California Lawrence Livermore Laboratory Technical Report, UCRL-50230 (Rev. 1), 1970.
7. University of California Lawrence Livermore Labor. Technical Report, UCRL-7350, Rev. 1.
8. White D. E., Geothermal energy, U. S. Geological Survey Circular 519, 1965.
9. Williamson M. M., Fallout calculations and measurement, Proc. Third Plowshare Symposium, USAEC Technical Report, No. TID-7695, 1964.

Библиография

- Battelle Memorial Institute, Bioenvironmental safety studies, Amchitka Island, Progress report for fiscal year, USAEC Technical Report, No. BMI-171 - 116, 1968.
- Eisenbud M., Environmental radioactivity, New York, McGraw-Hill, 1969.
- El Paso Natural Gas Company, Technical studies report, Project Wagon Wheel, USAEC Technical Report, No. PNE-WW-1, 1971.
- Fuller R. G., Amchitka biological information summary, Battelle Memorial Institute, 1969.

- Green J. B., Lessler R. M. Reduction of tritium from underground nuclear explosives, University of California Lawrence Livermore Laboratory Technical Report, UCRL-73258, 1971.
- Holzer A., Calculation of seismic source mechanisms, University of California Lawrence Livermore Laboratory Technical Report, UCRL-12219, 1965.
- Holzer A., Plowshare and the environment, University of California Lawrence Livermore Laboratory Technical Report, UCRL-72830, 1970.
- Knox J. B., Water quality in flood nuclear craters, University of California Lawrence Livermore Laboratory Technical Report, UCRL-50531, 1968.
- Larson, J. D., Beetem W. A., Chemical and radiochemical analysis of water from streams, reservoirs, wells and springs in the Rulison Project area, U.S. Geological Survey Report, No. USGS-474-67, 1970.
- Lawman F. G., et al., Effects of the marine biosphere, hydrosphere, and geosphere upon the specific activity of contaminant radionuclides, USAEC Technical Report, No. CONF-690406-10, 1967.
- Merritt M. L., Physical and biological effects, Milrow event, U. S. Atomic Energy Commission Nevada Operations Office, USAEC Technical Report, No. NVO-79, 1970.
- Robison W. L., Anspaugh L. R., Assessment of potential biological hazards from Project Rulison, University of California Lawrence Livermore Laboratory Technical Report, UCRL-50791, 1969.
- Schultz V., References on Nevada Test Site biological research, *Great Basin Naturalist*, 26, No. 3 - 4, p. 79 (1966).
- Smith C. F., Gas analysis results for Project Rulison calibration flaring samples, University of California Lawrence Livermore Laboratory Technical Report, UCRL-50986, 1971.
- Teller E., et al., The constructive uses of nuclear explosives, New York, McGraw-Hill, 1968.
- U. S. Atomic Energy Commission, Environmental statement, Underground nuclear test programs, Nevada Test Site, fiscal year, 1970.
- U. S. Atomic Energy Commission, Environmental statement, Cannikin, 1971.
- U. S. Atomic Energy Commission, Environmental statement, Rio Blanco Gas Stimulation Project, USAEC Technical Report, No. WASH-1519, 1972.
- U. S. Atomic Energy Commission Nevada Operations Office, 1969a. Technical discussion of offsite safety programs for underground nuclear detonations, USAEC Technical Report, No. NVO-40 (Rev. 2), 1969; Project Rulison, Post-shot plans and evaluations, USAEC Technical Report, No. NVO-61, 1969.
- U. S. Bureau of Mines, Blasting vibrations and their effects on structures, Bull. 656, 1971.
- U. S. Dept. of Health, Education, and Welfare, Proc. Symposium on Public Health Aspects of Peaceful Uses of Nuclear Explosives, Las Vegas, Nevada, USAEC Technical Report, No. SWRHL-81, 1969.

17. КОРРОЗИЯ И НАКИПЕОБРАЗОВАНИЕ НА ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ ПРИ СТИМУЛИРОВАНИИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ЯДЕРНОГО ВЗРЫВА

О. Х. Крикорьян¹⁾

Чистота пара, производимого в полости, образованной с помощью ядерного взрыва ("ядерном котле"), или окружающей ее зоне разрыва будет оказывать решающее воздействие на конструкцию, стоимость и работу геотермальной электростанции, построенной на стимулируемом месторождении. Количество и состав переносимых паром загрязнений могут влиять на срок службы скважины, конструкцию блока турбина – конденсатор, производительность станции, правила безопасности и защиты окружающей среды.

Предположим, что геотермальное месторождение стимулируется ядерным взрывом суммарной мощностью 1 Мт с одним или несколькими атомными или термоядерными взрывными устройствами, причем каждое из них снабжено атомным взрывателем мощностью 3 кт. Предположим также, что производительная скважина будет испытана через 180 суток после взрыва и будет производить в полости пар с температурой приблизительно 350°C и давлением 8 МН/м². Соответствующее давление в устье скважины после ее испытания будет составлять ~5 МН/м², и следует предусмотреть дополнительный период закупорки скважины продолжительностью 1,5–2 года до ее вступления в строй. Далее будет рассмотрено влияние этого периода закупорки на количество и виды радиоизотопов, переносимых паром.

Принятые в данной статье предположения ограничивают круг рассматриваемых систем системами с горячей сухой породой или с сухим паром. По-видимому, проблемы коррозии в месторождениях, содержащих пароводяную смесь или горячую воду, значительно важнее, чем в бассейнах сухого пара. Проблемы, связанные с горячей водой, также следовало бы проанализировать, в особенности из-за того, что бассейны с горячей водой, расположенные на умеренной глубине, более обширны, чем месторождения пара на такой же глубине; но подробный анализ выходит за рамки настоящего исследования.

Проблемы качества пара связаны с содержанием в нем минералов, радиоактивных веществ и неконденсирующихся газов и будут рассмотрены ниже в этом же порядке.

¹⁾ Крикорьян О. Х. – сотрудник лаборатории «Лоуренс Ливермор» при Калифорнийском университете, Ливермор.

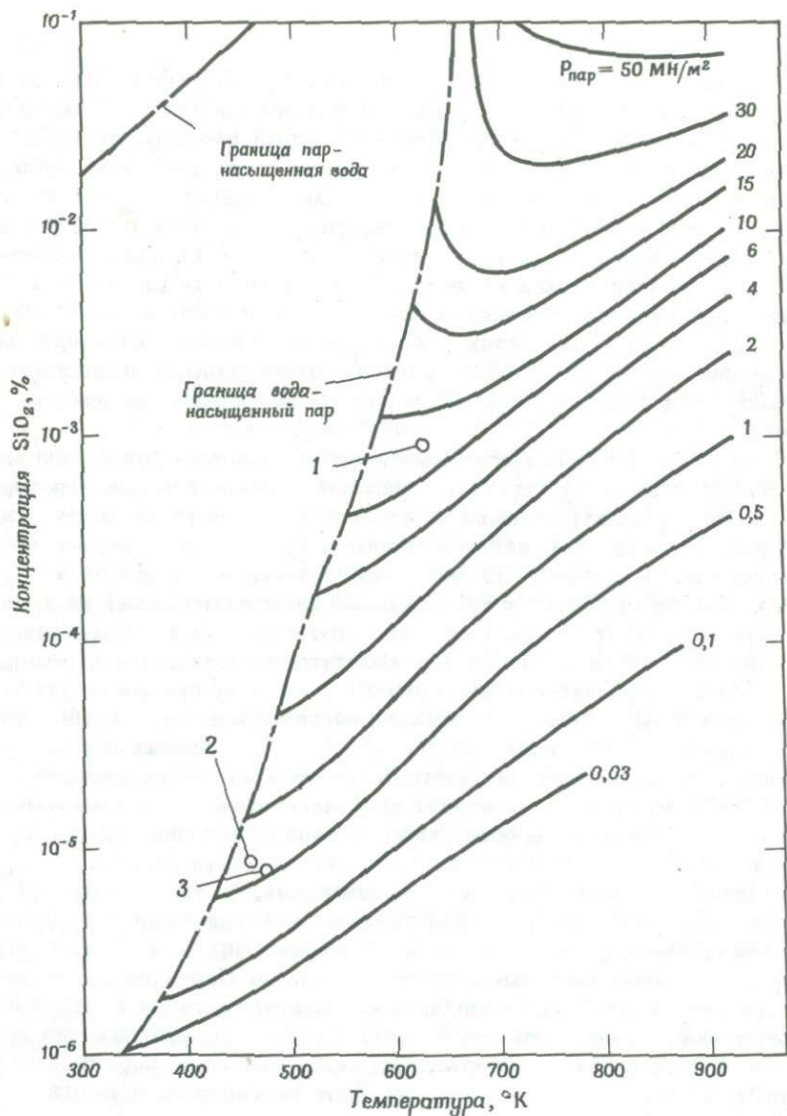
Содержание минералов в паре

Как известно, ряд минеральных веществ при взаимодействии с паром принимает форму летучих газовых соединений, которые переносятся производимым паром. Основная задача предыдущих исследований переноса минеральных веществ паром состояла в том, чтобы лучше понять гидротермальные явления, хотя значительный интерес представлял и процесс образования накипи на лопатках паровой турбины. Экспериментальные сведения об этих двух явлениях, особенно об образовании накипи на лопатках турбины, полезны для объяснения и предсказания поведения минеральных веществ в таких элементах геотермальных систем, как буровые скважины, и в энергетическом цикле станции. Перенос радиоактивных веществ и их связь с переносом минеральных веществ рассматриваются в следующем разделе.

Проблемы, которые могут возникнуть вследствие отложения минеральных веществ на трубах, в паровой турбине и в конденсаторе геотермальной электростанции, построенной на месторождении, стимулируемом с помощью ядерного взрыва, чреваты серьезными последствиями. В работе /21/ показано, что отложения солей и кремнезема (а следовательно, связанной радиоактивности) на лопатка турбин зависят от содержания примесей в паре и его давления. Отложения солей на лопатках паровых турбин растворимы в воде и при правильно организованном процессе работы могут вымываться водой. Наиболее важными из этих солей являются NaCl , NaOH , силикаты натрия, Na_2CO_3 и иногда Na_2SO_4 . Нерастворимыми в воде отложениями являются в большинстве случаев кремниевая кислота, аморфный кремнезем и различные кристаллические виды кремнезема. Встречаются также и нерастворимые в воде отложения окислов железа и CaCO_3 .

Наличие нерастворимых в воде отложений, в особенности различных видов кремнезема, представляет наиболее серьезную проблему. Эти отложения могут вызвать деформацию профиля лопаток турбины и, следовательно, уменьшение ее к. п. д. Более того, они могут привести к разбалансу турбины и в конечном счете к вибрациям, которые могут разрушить ее. Нерастворимые в воде отложения вымываются с помощью раствора NaOH , если массовая скорость отложений невысока, но эта операция требует длительного времени и больших усилий.

Чтобы отложения кремнезема были на приемлемом уровне, максимальная допустимая концентрация кремнезема в паре с давлением $8,1 \text{ МН/м}^2$ на входе в турбину должна составлять $\sim 5 \cdot 10^{-6} \% /21/$. Стырикович /22/ пришел к заключению, что общее содержание растворенных твердых веществ (солей и кремнезема) в паре, используемом при нормальной работе турбины, не должно превышать



Ф и г. 1. Зависимость концентрации кремнезема от температуры и давления в паре и в системе пар – насыщенная вода при равновесной концентрации с силикагелем.
 1 – предполагаемый геотермальный источник, стимулируемый с помощью ядерного взрыва; 2 – месторождение Долина Больших Гейзеров; 3 – месторождение Лардерелло.

$(5-20) \cdot 10^{-6} \%$, что согласуется с оценкой /21/. Однако такую чистоту пара трудно обеспечить даже в лучших парогенераторах.

Оценка концентрации кремнезема в паре для геотермальных приложений дана в работе /13/, автор которой установил равновесный состав силикагеля, кремниевой кислоты и кварца в паре высокого давления. Данные для силикагеля представлены на фиг. 1. Силикагель и различные кремниевые кислоты взаимопревращаемы в зависимости от температуры и давления пара. Поэтому на фиг. 1 не делается различия между ними. Кварц в 10 раз хуже растворяется в воде по сравнению с силикагелем при температуре 97°C и в 2 раза при температуре 327°C . В паре концентрации испаряющихся кремнезёмов ниже для кварца, чем для силикагеля, но они обычно различаются не более чем вдвое при температуре 327°C и давлении пара $3-5 \text{ МН/м}^2$. Приведенная на фиг. 1 концентрация кремнезема в паре равна $9 \cdot 10^{-4} \%$ при температуре 350°C и давлении пара $8,1 \text{ МН/м}^2$. Для подземного "ядерного котла", в котором могут присутствовать либо кварц, либо более активные соединения кремнезема, концентрация кремнезема в паре может иметь значение в интервале $(5-9) \cdot 10^{-4} \%$. Таким образом, содержание кремнезема в паре из подземной полости слишком велико и примерно на 2 порядка превышает концентрацию, требуемую для нормальной работы турбины. Это может вызвать значительные отложения на лопатках турбины, если пар поступает непосредственно в турбину. Положение еще более осложняется вследствие присутствия в паре радиоактивных веществ, поскольку такие радиоизотопы, как Sb^{125} , Cs^{137} и Cs^{134} , могут осаждаться на лопатках турбины вместе с кремнезёмом и различными солями.

В природных месторождениях пара содержится "грязный" пар при более низких температуре и давлении, чем указанные на фиг. 1, так что образование накипи становится второстепенной проблемой. Цикл турбины становится менее эффективным, но этот недостаток компенсируется низкой стоимостью природного пара.

Если геотермальный пар из подземной полости, образованной с помощью ядерного взрыва, предполагается непосредственно использовать в турбине высокого давления, то, вероятно, появится необходимость в его очистке для предотвращения непроизводительной работы турбины и чрезмерного накопления радиоактивности. Предложенный в работе /21/ метод очистки заключается в промывке пара перед поступлением его в турбину водой высокой чистоты. К сожалению, во время этого процесса пар охлаждается, его энергия падает, а к. п. д. снижается. Кроме того, пар после промывки находится в состоянии насыщения и его использование в турбине может приводить к эрозии лопаток турбины водяными брызгами. Следовательно, пар требовалось бы повторно нагревать.

Таблица 1

Относительные соединения кремнезема в паре и воде, а также содержание кремнезема в паре подземного "ядерного котла" до промывки и после нее

| Температура пара, °С | Давление насыщения, МН/м ² | $C_{II}/C_{В}$ для SiO ₂ | SiO ₂ , 10 ⁻⁴ % | |
|----------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|---------------|
| | | | в паре подземного "ядерного котла" | промытом паре |
| 251 | 4,0 | 1 · 10 ⁻³ | 1,7 | 0,0017 |
| 296 | 8,1 | 5 · 10 ⁻³ | 7 | 0,035 |
| 312 | 10,1 | 9 · 10 ⁻³ | 12 | 0,11 |
| 350 | 16,5 | 1 · 10 ⁻² | 50 | 2,5 |

Эффективность такой промывочной обработки можно оценить, исходя из данных Стыриковича [22] по относительному распределению различных "растворенных" веществ в насыщенном паре и воде. В табл. 1 приведены относительные содержания кремнезема в паре и воде ($C_{II}/C_{В}$) для нескольких температур. Представлены также содержание кремнезема в паре в предположении равновесия с кремнеземом в конденсированном состоянии в подземном "ядерном котле" (согласно фиг. 1) и ожидаемое содержание кремнезема в паре после промывки.

На основании табл. 1 можно заключить, что промывка является осуществимым способом очистки пара до температуры 296–312°С, соответствующих давлению насыщения 8–10 МН/м². В работе [22] содержатся также данные по относительным распределениям NaCl, NaOH и многих других солей и гидроокисей. Величина отношения $C_{II}/C_{В}$ для этих соединений не превышает 10⁻⁴; поэтому различные соли и гидроокиси удаляются промывкой более эффективно, чем SiO₂. Если не допускать образования отложений на лопатках турбин, любые радиоактивные вещества, не удаленные промывочной водой, будут выноситься из системы с конденсатом, выходящим из турбины.

Заслуживают внимания и другие способы. Например, для удаления кремнезема может оказаться эффективным такой твердый очиститель, как известняк. Другой способ – это введение в систему теплообменника, в котором вода или другая вспомогательная жидкость (например, изобутан, как предлагается в гл. 8) испарялась бы, а пар из "ядерного котла" конденсировался. Хотя это дополнительное устройство уменьшает тепловой к.п.д. процесса, оно позволяет собирать в одном месте накипь и радиоактивность. Экономическая выгода этого способа заключается в возможности использования менее дорогой турбины и обычного оборудования для остальной части станции. Если образование накипи в теплообменниках окажется

значительным, можно либо предусмотреть второй теплообменник, либо использовать химические или механические методы удаления накипи.

После очистки пара загрязняющие вещества будут присутствовать в промывочных системах. Если для промывки используется жидкость, становится возможным освободиться от радиоактивности и загрязняющих веществ путем закачки жидкости в подземный "ядерный котел".

Радиоактивные вещества в паре

В работе /11/ перечисляются радиоактивные вещества, которые могут присутствовать в паре в виде летучих компонентов через 180 суток после атомного или термоядерного взрыва. К ним относятся продукты деления $^{*}\text{K}^{85}$, $^{*}\text{Ru}^{103}$, Ru^{106} , Rh^{106} , $^{*}\text{Sb}^{125}$, $^{*}\text{Te}^{127\text{m}}$ и $^{*}\text{Cs}^{137}$ и вещества с искусственной радиоактивностью H^3 , Na^{22} , P^{32} , S^{35} , Ar^{37} и Cs^{134} (звездочкой отмечены сильные гамма-излучатели). Для взрыва мощностью 1 Мт после 180 суток распада количество остаточного γ -излучения составляет $3,0 \cdot 10^{16}$ МэВ/с для чисто атомного взрыва и $1,1 \cdot 10^{15}$ МэВ/с для термоядерного взрыва с использованием 3-кт атомного взрывателя (табл. 2) Хотя летучие радиоизотопы, выделившиеся после термоядерного взрыва, характеризуются более низким уровнем гамма-излучения, уровень бета-излучения трития очень высок.

Следует отметить, что приведенная в табл. 2 искусственная радиоактивность относится к взрыву без нейтронного экранирования. Расчеты показывают, что каждые 15 см нейтронного экрана из окиси бора в десять раз снижают радиоактивность подземного взрыва /18/. Искусственная радиоактивность зависит также от состава горных пород (данные табл. 2 относятся к хардхатскому граниту) и конструкции бомбы.

Присутствующие в паре неконденсирующиеся газы, включая радиоактивные изотопы, будут отделяться в конденсаторе. В бассейнах природного пара неконденсирующиеся газы выпускаются из конденсатора в атмосферу. При использовании стимулирования с помощью ядерного взрыва газы можно собирать, а радиоактивные примеси, такие, как K^{85} , Ar^{37} и H^3 , отделять или накапливать с последующим подземным захоронением. Летучие химические и радиоактивные загрязнения с низким уровнем радиоактивности можно было бы сбрасывать в атмосферу.

При использовании термоядерных взрывчатых веществ криптона выделяется на несколько порядков меньше, зато аргона и трития — намного больше. Если тритий участвует в реакции обмена с водородом в воде или паре, его отделение, по-видимому, наиболее сложно, и потребуются соответствующие меры, обеспечивающие безопасные концентрации.

Таблица 2

Потенциальное присутствие летучих радиоактивных изотопов через 180 суток после ядерного взрыва общей мощностью 1 Мт /11/

| Изотоп | Период полураспада | Атомный взрыв | | Термоядерный взрыв ^{а)} (с атомным взрывателем 3 кт) | |
|---|--------------------|---------------|----------------------|---|----------------------|
| | | кКи | МэВ/с | кКи | МэВ/с |
| <i>Продукты деления</i> | | | | | |
| Kr ⁸⁵ | 10,7 года | 19 | $1,41 \cdot 10^{12}$ | 0,057 | $4,2 \cdot 10^9$ |
| Ru ¹⁰³ | 40 суток | 1150 | $2,1 \cdot 10^{16}$ | 3,45 | $6,3 \cdot 10^{13}$ |
| Ru ¹⁰⁶ Rh ¹⁰⁶ | 1 год | 1000 | $3,37 \cdot 10^{15}$ | 3,0 | $1 \cdot 10^{13}$ |
| Sb ¹²⁵ | 2,7 года | 60 | $9,6 \cdot 10^{14}$ | 0,18 | $2,9 \cdot 10^{12}$ |
| Te ^{127m} | 109 суток | 90 | $6,7 \cdot 10^{11}$ | 0,27 | $2,0 \cdot 10^9$ |
| Cs ¹³⁷ | 30 лет | 180 | $3,8 \cdot 10^{15}$ | 0,54 | $1,14 \cdot 10^{13}$ |
| <i>Искусственная радиоактивность в почве^{б)}</i> | | | | | |
| H ³ | 12,3 года | 220 | - | 20 290 ^{в)} | - |
| Na ²² | 2,6 года | - | - | 0,6 | $4,9 \cdot 10^{13}$ |
| P ³² | 14,3 суток | 2 | - | 2,5 | - |
| S ³⁵ | 88 суток | 29 | - | 40,0 | - |
| Ar ³⁷ | 35 суток | 70 | - | 200 | - |
| Cs ¹³⁴ | 2 года | 14 | $7,8 \cdot 10^{14}$ | 18,3 | $1,0 \cdot 10^{15}$ |

а) Продукты деления представлены только для одного термоядерного взрыва; количество радиоактивности получается умножением на число используемых термоядерных взрывов.

б) Величины радиоактивности вычислены с помощью линейной зависимости по данным для атомного и термоядерного взрывов мощностью 50 кт [11].

в) К искусственной радиоактивности в почве 290 кКи добавлена радиоактивность остаточного трития, выделяющегося при термоядерном взрыве; предполагается, что на 1 кт мощности приходится 2 г остаточного трития, что обеспечивает дополнительную радиоактивность 20 000 кКи [18].

Действительные значения летучести различных гамма-излучающих радиоизотопов, определенные с помощью термодинамической модели, можно использовать для качественной или полуквантитативной оценки гамма-излучения пара, поскольку предположение о полной летучести этих веществ представляется излишне строгим. Для использования в данной задаче термодинамических расчетов необходимо сделать определенные предположения о происходящих во время образования подземного "ядерного котла" процессах и реакциях. Вскоре

после ядерного взрыва практически вся испарившаяся порода и продукты взрыва сконденсируются (за исключением пара и остаточных газов) в виде расплавленного стекла. В этом стекле будут заключены огнеупорные радиоактивные вещества и некоторое количество более летучих радиоактивных веществ. Стекло может иметь форму капель внутри расширенной полости или покрывать поверхностным слоем ее стенки; при этом оно обычно скапливается на дне полости, образуя ванну из расплавленного стекла. После обвала покрывающих пород эта ванна сначала быстро охлаждается вследствие конвекции и излучения, а затем после понижения температуры охлаждение замедляется. Можно ожидать значительного падения скорости охлаждения, если минералы начнут кристаллизоваться. Для обычных базальтов при давлении пара $8,1 \text{ МН/м}^2$ интервал температур кристаллизации составляет $1077 - 1227^\circ\text{C}$, а для обычных гранитов $927 - 1127^\circ\text{C}$. Независимо от того, происходит кристаллизация или нет, вязкость силикатных расплавов при этих температурах очень велика, и это ограничивает скорость взаимодействия газа с жидкостью.

Исходя из этого рассмотрения, можно, по-видимому, предположить, что "поздняя конденсация", которая определяет количество летучих радиоактивных веществ, происходит при температурах ниже 1227°C . (Используемый здесь термин "поздняя конденсация" относится к конденсации, которая происходит, когда поверхность расплавленной горной породы настолько охлаждена, что ее диффузионное и химическое взаимодействие с образованным впоследствии паровым конденсатом чрезвычайно слабое.) Ряд факторов, по-видимому, влияет на количество и состав позднего конденсата. Самым важным из них, вероятно, является время обвала подземной полости. При раннем обвале плавление будет прерываться при высокой температуре и из полости будет выделяться пар с высокой концентрацией умеренно летучих компонентов породы (а также умеренно и высоколетучих радиоизотопов). При позднем обвале и соответственно более низких температурах плавления большая часть умеренно летучих компонентов породы и радиоизотопов будет оставаться в расплавленном состоянии. Другие факторы, такие, как давление пара, окислительная или восстановительная среда, величина ядерного заряда, также, вероятно, воздействуют на результаты поздней конденсации.

Можно оценить количество позднего конденсата при давлении пара $8,1 \text{ МН/м}^2$ и температуре 1227°C , соответствующих условиям отделения от расплавленной зоны. Давление пара в полости будет зависеть от количества воды в горной породе и глубины взрыва. При температуре 1227°C в полости установится давление пара $8,1 \text{ МН/м}^2$, если порода содержит либо 3 вес.% воды на глубине 0,5 км, либо 1 вес.% воды на глубине 3 км, и каждый взрыв мощностью 1 Мт приводит к испарению воды, содержащейся в $1,2 \cdot 10^9 \text{ кг}$

горной породы. Соответствующие объемы полостей оцениваются в $3 \cdot 10^6 \text{ м}^3/\text{Мт}$ на глубине 0,5 км и в $1 \cdot 10^6 \text{ м}^3/\text{Мт}$ на глубине 3 км. Последними из испарившихся компонентов горной породы в присутствии пара конденсируются остаточные количества щелочных металлов и кремнезема. Основными щелочными компонентами пара при названных выше условиях, вероятно, являются NaOH (газ) и KOH (газ). В сконденсированном состоянии находятся, по-видимому, карбонаты и силикаты; для выполнения термодинамических расчетов можно предположить наличие таких соединений, как $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$, Na_2SiO_3 , K_2CO_3 , $\text{K}_2\text{Si}_4\text{O}_9$ и $\text{K}_2\text{Si}_2\text{O}_5$. При рассматриваемых условиях соединение Na_2CO_3 является неустойчивым. Сконденсируется ли щелочь в виде карбоната или прореагирует с породой с образованием силиката, будет зависеть от парциального давления CO_2 в газе и кинетических коэффициентов. NaOH и KOH не будут конденсироваться из-за высокого давления их паров при этих условиях. На основе имеющихся термодинамических данных [5, 15, 20] при давлении пара приблизительно 8 МН/м^2 и температуре 1227°C расчетное значение давления пара гидроокиси щелочных металлов составляет 10^2 Н/м^2 . Хлориды щелочных металлов, вероятно, также будут очень летучими, особенно в присутствии пара. Однако нет данных по летучести этих хлоридов в расплавленных породах при низкой концентрации хлора, которая типична для изверженных пород ($\sim 0,01\%$). Давление пара летучих соединений гидроокиси кремния при этих условиях превышает 10^2 Н/м^2 [17], так что прямые реакции в газовой фазе также могут приводить к образованию силикатов. Таким образом, могут происходить либо реакции между газом и поверхностью, либо реакции в газовой фазе, за которыми затем следует поздняя конденсация силикатов и карбонатов щелочных металлов при температуре 1227°C и ниже.

Предположение о том, что суммарное парциальное давление молекул NaOH (газ) и KOH (газ) в объеме 10^6 м^3 составляет 10^2 Н/м^2 , означает, что около $2 \cdot 10^4$ г-атом щелочных металлов будет конденсироваться при температуре ниже 1227°C . Эта грубая оценка количества позднего конденсата сравнивается в табл. 3 с оценкой количества потенциально летучих гамма-излучателей при атомном взрыве мощностью 1 Мт. Очевидно, что концентрации радиоизотопов низки по сравнению с общим количеством позднего конденсата. Постулируем, что все потенциально летучие изотопы, приведенные в табл. 3, за исключением остаточных газов, связаны с силикатами и карбонатами щелочных металлов поздней конденсации. Следующее предположение заключается в том, что процесс конденсации протекает в течение нескольких минут. Вследствие того, что этот конденсат образуется на поздней стадии, он, вероятно, распределится по подземной полости и покроет поверхность породы.

Таблица 3

Относительная летучесть в паре потенциально летучих γ -излучателей, выделившихся при ядерном взрыве общей мощностью 1 Мт в вулканической породе, через 180 суток после взрыва

| Изотоп | Содержание изотопа, атомы | Летучесть в паре ($8,1 \text{ MN}/\text{M}^2$, 350°C) |
|--------------------|---------------------------|---|
| Kr ⁸⁵ | 0,57 | Остаточный газ |
| Ru ¹⁰³ | 0,35 | При окислении высокая, при восстановлении низкая |
| Ru ¹⁰³ | 2,8 | То же |
| Sb ¹²⁵ | 0,45 | Вероятно, высокая |
| Te ^{127m} | 0,075 | Высокая |
| Cs ¹³⁷ | 15,1 | Первоначально высокая, уменьшающаяся со временем; CO_2 уменьшает летучесть, а Cl^- увеличивает ее |
| Cs ¹³⁴ | 0,08 | То же |

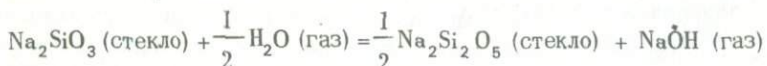
Летучесть радиоактивных веществ при работе электростанции

Можно сделать несколько прогнозов относительно летучести перечисленных в табл. 3 гамма-излучателей в условиях работы электростанции. Считаем, что пар в "ядерном котле" имеет давление $8,1 \text{ MN}/\text{M}^2$ и температуру 350°C . В интересующих нас условиях летучесть NaCl, KCl и NaOH в паре изучалась Шпильнером /19/, а летучесть NaCl и NaOH - Штраубом /21/. Результаты этих исследований были проверены Эллиотом /8/. Данные Штрауба и Шпильнера для NaCl достаточно хорошо согласуются, а для KCl тождественны. При давлении пара $8,1 \text{ MN}/\text{M}^2$ и температуре 350°C парциальное давление галоидов щелочных металлов в паре на $\sim 10 \text{ H}/\text{M}^2$ выше давления чисто галоидных солей. Для беспримесной жидкой щелочи NaOH Шпильнер установил, что при рассматриваемых условиях парциальное давление газообразной гидроокиси щелочного металла составляет $\sim 100 \text{ H}/\text{M}^2$. Штрауб имел дело только с водными растворами NaOH, но он установил, что летучесть NaOH в паре выше, чем при соответствующих концентрациях NaCl в воде. Эллиот показал, что газовые компоненты, содержащие летучие галоиды и гидроокиси щелочных металлов, при этих условиях очень сложны. Он предположил наличие таких соединений, как $\text{NaCl} \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (газ) и $\text{NaOH} \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (газ). Хотя существование этих соединений точно не установлено, их присутствие позволяет объяснить полученные зависимости летуче-

части галоидов и гидроокисей щелочных металлов от давления пара. Было обнаружено, что изменение давления пара на порядок приводит к изменению летучести галоидов и гидроокисей щелочных металлов на 7 порядков. По-видимому, не следует ожидать существенной роли этих сложных соединений при более высоких температурах (например, 1227°C), при которых будут преобладать простые молекулы типа NaCl (газ) или NaOH (газ).

В подземном "ядерном котле" гидроокиси щелочных металлов в виде сконденсированной фазы неустойчивы, в то время как галоиды щелочных металлов могут быть устойчивыми. Если галоиды щелочных металлов присутствуют в чистом виде, они будут иметь парциальное давление 10 Н/м². Можно предположить, что различные газообразные гидроокиси щелочных металлов поступают в подземную полость как часть позднего конденсата, превращаются в конденсированные силикаты или в конденсированные карбонаты. Поэтому они будут характеризоваться более низкой активностью NaOH по сравнению с исследованной Шпильнером чистой гидроокисью натрия.

Термохимическую активность NaOH в горной породе можно оценить, сравнивая рассчитанное давление пара NaOH (газ) в соответствии с реакцией



с давлением пара NaOH (газ) над чистой щелочью NaOH (жидкость). Определенная таким образом активность NaOH (жидкость) составляет $1,3 \cdot 10^{-2}$. С помощью этого значения и полученной Шпильнером величины летучести чистого NaOH в паре можно определить летучесть паров натрия над силикатом натрия, равную 1 Н/м².

На данном этапе нецелесообразно стремиться к более полному рассмотрению возможных реакций между летучими веществами. Можно предположить, что при давлении пара 8,1 МН/м² и температуре 350°C все щелочные металлы будут иметь одинаковую летучесть как в форме гидратированных галоидов, так и гидроокисных соединений при величине парциального давления от 1 до 10 Н/м².

Следует отметить, что парциальное давление щелочных металлов при постоянном давлении пара 8,1 МН/м² уменьшается всего от 10 до 100 раз при изменении температуры от 1227 до 350°C. Это означает, что от 2,5 до 25% щелочного металла все еще остается в газообразном состоянии при охлаждении от 1227 до 350°C, если рассчитывать концентрации в соответствии с законом идеального газа. В этом температурном интервале происходит существенное изменение вида газовых соединений. Если при температуре 1227°C преобладают такие соединения, как NaOH (газ), то при температуре

350°C, по-видимому, наиболее важными становятся такие соединения, как $\text{NaOH} \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (газ).

Можно предположить в первом приближении, что радиоактивный цезий образует идеальную смесь с основными соединениями щелочных металлов либо в газовой фазе, либо в виде позднего конденсата. Так, например, до 25% радиоактивного цезия может присутствовать в газообразном состоянии в подземной полости при давлении 8,1 МН/м² и температуре 350°C. Любые другие радиоактивные изотопы щелочных металлов; например Na^{22} , ведут себя аналогичным образом.

Следует рассмотреть и ряд усложняющих факторов. Во-первых, нужно принять во внимание, что Cs^{137} имеет летучих предшественников, которые существуют в течение части, если не всего периода ранней конденсации. Известны такие предшественники, как I^{137} с периодом полураспада 24 с, I^{138} с периодом полураспада 6 с и Xe^{137} с периодом полураспада 3,9 мин. В качестве более правдоподобного объяснения образования Cs^{137} можно было бы предположить, что на начальной стадии поздней конденсации часть изотопов I^{137} и I^{138} оказывается захваченной основной массой силикатов или карбонатов щелочных металлов и что большая часть вещества, перемещаясь вверх по подземной полости, превращается в Xe^{137} и окончательно конденсируется в виде Cs^{137} . Таким образом, конечный конденсат будет располагаться дальше от области расплавленной ванны и будет более обогащен Cs^{137} по сравнению с основной массой щелочного металла. В области обогащения конденсата изотопом Cs^{137} наблюдается тенденция к образованию карбонатов, а не силикатов. Несмотря на отсутствие термодинамических данных о силикатах цезия, известно, что термодинамическая устойчивость карбонатов щелочных металлов возрастает по сравнению с устойчивостью силикатов с увеличением атомного номера щелочного металла /15, 20/. Летучесть цезия в карбонатном соединении будет на 2 - 3 порядка ниже, чем в силикатном, при отношении $p(\text{H}_2\text{O})/p(\text{CO}_2)$ в интервале от 1 до 1000.

При извлечении пара из подземной полости радиоактивно-щелочное содержимое пара подвергается следующим качественным изменениям. Первоначально радиоактивное содержание пара будет высоким, но, вероятно, не столь высоким, каким могло бы быть в случае идеального перемешивания, и все же составит ~1% общего количества радиоактивного щелочного металла. Вначале можно ожидать, что содержание Cs^{137} в паре будет пропорционально ниже (по сравнению с Cs^{134} и Na^{22}), чем его содержание вследствие образования карбоната. Позднее изотопы Cs^{134} и Na^{22} , которые, как предполагается, присутствуют в виде силикатов, начнут улетучиваться первыми, приводя к постепенному уменьшению общего содержания в паре радио-

активных щелочных металлов и увеличению доли Cs^{137} в газообразных радиоактивных щелочах. И наконец, основным компонентом станет Cs^{137} , который, вероятно, будет образовываться вследствие разложения карбонатной фазы.

Что касается изотопов Ru^{103} и Ru^{106} , их летучие соединения в присутствии пара неизвестны, так что расчет выполнить нельзя. Тем не менее радиохимические наблюдения указывают на присутствие этих изотопов в подземной полости при проведении некоторых ядерных испытаний, хотя поведение их неустойчиво. Радиоизотоп Ru^{103} имеет в качестве предшественников Mo^{103} с периодом полураспада 62 с и Tc^{103} с периодом полураспада 50 с, тогда как изотопу Ru^{106} предшествует изотоп Tc^{106} с периодом полураспада 37 с. Известно, что молибден является летучим в паре в виде соединения $\text{MoO}_2(\text{OH})_2$ (газ) в условиях окисления, и можно предположить, что технеций по аналогии с рением /14/ является летучим в виде $\text{TcO}_3(\text{OH})$ (газ). Рутений также может присутствовать в виде летучих соединений, например в виде $\text{RuO}_2(\text{OH})_2$ (газ). Согласно расчетам, основанным на оценках Джексона /14/, роль соединений с низким содержанием кислорода, таких, как RuOH (газ) и $\text{Ru}(\text{OH})_2$ (газ), несущественна. Кроме того, опыты /1/ с кальцинацией растворов нитратов радиоактивными отходами показывают, что летучесть рутения возрастает в функции концентрации ионов водорода. Эти результаты можно рассматривать как свидетельство того, что летучесть рутения является функцией парциального давления кислорода, поскольку присутствующая в кислотных растворах HNO_3 в процессе кальцинации будет разлагаться с образованием кислорода.

Можно сделать качественный вывод о том, что в химически нейтральной среде, когда парциальное давление кислорода определяется только диссоциацией пара, при температуре $\sim 1230^\circ\text{C}$ такие соединения, как $\text{MoO}_2(\text{OH})_2$ (газ), $\text{TcO}_3(\text{OH})$ (газ) и $\text{RuO}_2(\text{OH})_2$ (газ) будут, вероятно, летучими. Если при взрыве образуется значительное количество водорода, летучесть этих соединений будет уменьшаться. При давлении пара $8,1 \text{ МН/м}^2$ и температуре 350°C следует ожидать, что летучесть Ru^{103} и Ru^{106} будет очень низкой в условиях восстановительной среды и, вероятно, низкой в нейтральных условиях, но может быть высокой в условиях окислительной среды.

Предшественниками для Sb^{125} являются Sn^{125} с периодом полураспада 9,4 сут и Sn^{125m} с периодом полураспада 9,7 мин. Олово и сурьма, несомненно, имеют летучие гидроксиды, но их молекулярные соединения неизвестны и термодинамические данные отсутствуют. Радиоизотоп Te^{127} имеет в качестве предшественника Sn^{127} с периодом полураспада 2,1 ч и Sb^{127} с периодом полураспада 93 ч. Теллур, вероятно, существует в виде $\text{TeO}(\text{OH})_2$ (газ), который полностью летуч /14/. К счастью, изотоп Te^{127m} играет значительно меньшую роль, чем другие рассмотренные здесь продукты деления.

Следует подчеркнуть, что выполненные расчеты летучести обес- печивают точность лишь до порядка величины. Основная цель заклю- чалась в том, чтобы произвести разумные оценки концентрации лету- чих γ -излучающих радиоизотопов в паре. По мере накопления экс- периментальных данных эти выводы могут измениться. Радиоизотопы Cs^{137} и Sb^{125} могут обладать меньшей летучестью, чем предпола- гается, или их количество в подземной полости может оказаться не- достаточным, чтобы могло произойти улетучивание. Другие радиоак- тивные вещества, которые рассматривались нами как тугоплавкие, могут в действительности содержаться в больших количествах. Ясно лишь, что для получения точных представлений об этих сложных хими- ческих взаимодействиях: необходимо их изучение в лабораторных и полевых условиях.

Если предположить, что скважина вступит в действие через 1,5 - 2 года после 180-суточных испытаний, химические процессы пере- носа радиоизотопов паром останутся неизменными, но уровень радио- активности уменьшится. С учетом периода полураспада за это время содержание изотопов Ru^{103} и Te^{127m} уменьшится до очень низкого уровня, содержание изотопа Ru^{106} уменьшится в ~ 4 раза, Sb^{125} , Na^{22} и Cs^{134} - в 2 раза, а содержание изотопа Cs^{137} сохранит- ся примерно на том же уровне. Принимая во внимание, что расчет летучести выполнен с точностью до порядка величины и что изотоп Sb^{125} и радиоизотопы щелочных металлов являются, вероятно, наи- более летучими радиоизотопами в паре, основные выводы, сделанные на основе проверки, проведенной спустя 180 суток после взрыва, применимы также и к производственному периоду.

Неконденсирующиеся газы в паре

Для оценки коррозионных характеристик геотермального пара необходимо установить, какие примеси присутствуют в породе и вод- ных источниках скважины. После этого можно сделать некоторые за- ключения относительно увлекаемых паром конденсирующихся и некон- денсирующихся примесей и химического воздействия этих примесей на паротурбинную систему. Большая часть данных по коррозии и об- разованию накипи получена для природных геотермальных скважин. Следует проявлять осторожность при экстраполяции этих данных на случай скважины, стимулируемой с помощью ядерного взрыва, по- скольку в ней могут преобладать другие паровые и геологические условия.

В табл. 4 приведены результаты химического анализа геотер- мальных вод скважин Исландии и Новой Зеландии и поверхностных вод Чили. Анализ геотермального пара из ряда источников представ- лен в табл. 5. За исключением данных для вулкана Шова-Шинзия /16/, составы взяты из различных докладов сб. "Труды Американ-

ХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ ВОД РЯДА ИСТОЧНИКОВ

| Тип породы | Район | Максимальная температура источника, °C | Общее количество твердого вещества, % | Na ⁺ | K ⁺ | NH ₄ ⁺ | Mg ⁺⁺ |
|------------------------------|--------------------------|--|---------------------------------------|-----------------|----------------|------------------------------|------------------|
| Базальтовая лава | Хенгидль, Исландия | 230 | 0,0913 | 0,0174 | 0,0010 | 0,00001 | 0,0 |
| То же | Кризувик, Исландия | 230 | 0,203 | 0,0500 | 0,0068 | 0,0 | 0,00005 |
| Пемзообразные брекчи | Уайракей, Новая Зеландия | 265 | 0,5 | 0,1285 | 0,0201 | 0,00002 | 0,00026 |
| То же | Уайотапу, Новая Зеландия | 295 | 0,35 | 0,0825 | 0,0122 | 0,0001 | 0,00035 |
| Вулканического происхождения | Эль-Тацио, Чили | 40-90 ^a | - | - | - | - | - |
| То же | Рейкьявик, Исландия | 88 ^a | 0,0285 | 0,0159 | 0,00014 | 0,0 | 0,00003 |

^a) Поверхностные воды.

^б) Общий состав аммиака, двуокси углерода и H₂S будет изменяться в зависимости от метода отделения воды от пара. Определенные с помощью химического анализа значения ниже, чем действительные концентрации в подземных водах.

ской национальной конференции по новым источникам энергии," 1961 г. /2, 4, 6, 7, 9, 12/. Ряд несущественных компонентов в таблицу не включен. Представленные типы пород преимущественно вулканического происхождения.

Данные анализа растворенных веществ, которые могут образовывать газообразные продукты (табл. 4), не соответствуют действительным концентрациям растворенных веществ в подземных водах скважин вследствие потерь в процессе отделения геотермальных вод от пара. Во время отделения летучие растворенные вещества стремятся сосредоточиться в паровой фазе, тогда как нелетучие вещества концентрируются в воде. Например, действительное содержание CO₂ в воде скважин Уайракей (Новая Зеландия) ~0,02-0,06% в подземных условиях, а в воде скважин Уайотапу (Новая Зеландия)

Таблица 4

| Ca ⁺⁺ | H ₃ BO ₃ | Al ⁺⁺⁺ | Fe ⁺⁺⁺ | SiO ₂ | Cl ⁻ | HCO ₃ ^{-b} | CO ₃ ^{=b} | SO ₄ ⁼ | Общее количество сульфида в виде H ₂ S ^б), % |
|------------------|--------------------------------|-------------------|-------------------|------------------|-----------------|--------------------------------|-------------------------------|------------------------------|---|
| 0,00028 | 0,00049 | 0,00004 | 0,00001 | 0,0283 | 0,0152 | 0,0024 | 0,0057 | 0,0072 | 0,00052 |
| 0,00087 | 0,00097 | 0,00001 | 0,0 | 0,0425 | 0,0735 | 0 | 0,0050 | 0,0067 | 0,0007 |
| 0,0012 | 0,0160 | - | - | 0,0602 | 0,2178 | 0,0071 | 0,0035 | 0,0034 | 0,00024 |
| 0,0009 | 0,0085 | - | - | 0,0470 | 0,1380 | 0,0145 | 0,0106 | 0,0052 | 0,0011 |
| 0,0007-0,0028 | 0,0060-0,1050 | 0,0003-0,0019 | 0,0003-0,0027 | 0,0014-0,0036 | - | - | - | - | - |
| 0,00019 | 0,00003 | 0,0001 | 0,0 | 0,0126 | 0,0030 | - | 0,0043 | 0,0017 | 0,00002 |

симости от метода отделения воды от пара. Определенные с помощью химического

~0,08-0,25% /9/, в то время как в табл. 4 приведены значительно более низкие концентрации для HCO₃⁻ и CO₃⁼.

Как видно из табл. 4 и 5, имеется большое количество веществ, которые вызывают коррозию. Наличие подобных веществ можно ожидать и в случае месторождения, стимулированного с помощью ядерного взрыва. Будут ли в действительности происходить коррозия и образование накипи, зависит от условий в каждом конкретном случае. Известно, что хлориды, NH₃, CO₂ и H₂S в определенных условиях вызывают коррозию металлов. Пар и горячая вода оказывают коррозионное воздействие на все силикатные материалы, такие, как цементный раствор в сочленениях труб, железобетонные трубы или резервуары и силикатные фильтрующие установки. Все эти материалы следует либо исключать, либо защищать подходящими покрытиями.

Таблица 5

Химический анализ неконденсирующихся газов в геотермальном паре

| Месторождение | Максимальная температура источника, °C | Температура в устье скважины, °C | Содержание неконденсирующегося газа относительно общего расхода, вес. % | Мольные доли, % | | | | | | Остатки |
|---|--|----------------------------------|---|-----------------|----------------|------------------|-----------------|-----------------|----------------|-------------------|
| | | | | CO ₂ | H ₂ | H ₂ S | CH ₄ | NH ₃ | N ₂ | |
| Хенгидль, Исландия | 230 | ~160 | 0,3 | 84,6 | 2,1 | 4,9 | 0,0 | - | - | 8,4 ^{а)} |
| Хверагерди, Исландия | 230 | ~160 | 0,1 | 78,5 | 1,1 | 17,2 | - | - | - | 3,2 ^{а)} |
| Кризувик, Исландия | 230 | ~160 | 1,3 | 83,9 | 5,4 | 9,6 | 0,1 | - | - | 1,0 ^{а)} |
| Уайракей, Новая Зеландия | 265 | ~195 | 0,01-0,5 | 93,0 | 0,8 | 3,8 | 0,8 | ~0,2 | 1,4 | - |
| Уайотапу, Новая Зеландия | 295 | - | 0,07-0,2 | 90,0 | 1,5 | 7,8 | 0,3 | ~0,2 | 0,2 | - |
| Лардерелло, Италия (1870) | - | - | - | 90,5 | 2,0 | 4,2 | 1,4 | - | 1,9 | - |
| Лардерелло, Италия (1960) | 245 | ~190 | 4,5 | 92,4 | 1,4 | 2,5 | 1,0 | 1,7 | 0,6 | 0,4 ^{б)} |
| Долина Больших Гейзеров, шт. Калифорния | >205 | 175 | 0,7 | 69,3 | 12,7 | 3,0 | 11,8 | 1,6 | 1,6 | - |
| Вулкан Шова-Шинзэн, Япония | - | 196 | 0,6 | 69,4 | 12,4 | 3,9 | 0,1 | 0,0 | 9,1 | 5,1 ^{в)} |
| То же | - | 328 | 2,2 | 84,9 | 6,6 | 1,0 | 0,1 | 0,0 | 5,2 | 2,2 ^{в)} |

а) Включая N₂б) Преимущественно H₃BO₃.в) Преимущественно HCl и в меньших количествах HF и SO₂.

Накипь (или отложения) могут образовываться в трубах, турбинах или конденсаторах вследствие наличия в паре таких летучих примесей, как хлориды, гидроокиси, карбонаты, сульфаты и силикаты щелочных металлов, карбонат кальция и кремнезем. Неконденсирующиеся примеси в паре, такие, как CO_2 , H_2S , H_2 и CH_4 , необязательно будут вызывать коррозию, но их нельзя пропускать через турбину, чтобы не снижалась ее эффективность.

Имеются некоторые данные о коррозионной устойчивости по отношению к геотермальным водам обычных сплавов и других материалов [3, 6, 10]. Установлено, что наиболее устойчивыми к коррозии материалами являются титан, аустенитные нержавеющие стали и стали с хромовым гальваническим покрытием. Эпоксидные смолы обладают коррозионной устойчивостью до температуры 100°C . Были проведены испытания образцов сплавов водой при температуре от 50 до 240°C и паром при температуре от 100 до 200°C продолжительностью 150 суток.

Хотя было установлено широкое разнообразие механизмов коррозии, наиболее важной для сплавов является, по-видимому, коррозия под напряжением. Известно, что коррозия этого типа может быть вызвана незначительными количествами хлоридов или сульфидов и может привести к образованию трещин и изломов в различных сплавах, которые используются для изготовления турбин. Считается, что минимальные концентрация и температура хлорида, вызывающие коррозию под напряжением, составляют $0,0005\%$ и 50°C соответственно. Присутствие кислорода ускоряет развитие коррозии под напряжением. Не существует предельной нагрузки, ниже которой трещина не образуется. Вызванное сульфидами растрескивание под напряжением может произойти в присутствии H_2S при температуре до 190°C . Газ H_2S вызывает также явление, известное под названием "водородного внедрения", которое может привести к хрупкости, образованию раковин и изломов в нержавеющих сталях.

Другими коррозионными механизмами, которые следует упомянуть, являются химическая коррозия и механическая эрозия. Химическая коррозия может происходить при наличии в геотермальном паре NH_3 , H_2S , CO_2 и хлоридов. Обычно коррозионное действие этих соединений усиливается в присутствии воздуха. Химическую коррозию можно свести к минимуму или вообще исключить в большинстве геотермальных электростанций, работающих на природном теплоносителе, путем соответствующего выбора сплавов и предотвращения доступа воздуха. Однако при более высоких давлениях и температурах пара, предполагаемых в случае ядерного стимулирования, химическая коррозия может превратиться в более серьезную проблему.

Вопрос о механической эрозии возникает, когда влажный пар с высокой скоростью действует на лопатки турбины. Такое воздей-

ствие может привести к комбинированному коррозионно-эрозионному процессу, способному вызвать серьезные повреждения лопаток турбины. Определенный успех с точки зрения эрозионной стойкости был достигнут при использовании сплавов нержавеющей стали 13X.

Опыт, приобретенный в борьбе против коррозии и образования накипи на геотермальных электростанциях, работающих на природном теплоносителе, со всей очевидностью показал, что подобные проблемы, вероятно, встретятся и в случае стимулирования с помощью ядерного взрыва. Более полно эти проблемы могут быть исследованы путем проведения испытаний образцов сплавов в геотермальном паре и воде при предполагаемых условиях применения ядерного взрыва. В таких испытаниях важно, чтобы состав пара и воды соответствовал бы конкретному геотермальному месторождению. Лучшее всего было бы отбирать пар из скважины, стимулированной с помощью ядерного взрыва; в случае отсутствия действующей скважины можно делать заключение об ожидаемых в паре примесях по анализу проб из кернов, взятых из данного образования. Как и в случае природных геотермальных скважин /9, 10, 12/, с помощью таких выборочных испытаний можно найти подходящие сплавы и другие конструкционные материалы для турбинных систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Blasewitz A. G., Mendel J., Battelle Memorial Institute Northwest, Richland, Washington, 1970 (частное сообщение).
2. Bodvarsson C., Physical characteristics of natural heat resources in Iceland, In "Geothermal energy I: Proc. United Nations Conf. on New Sources of Energy, Rome, 1961", v. 2, 1964, pp. 82-90.
3. Bruce A. W., Experience generating geothermal power at The Geysers power plant, Sonoma County, California, "In Geothermal energy II: Proc. United Nations Conf. on New Sources of Energy, Rome, 1961", v. 3, 1964, pp. 284-295.
4. Burgassi R., Prospecting of geothermal fields and exploration necessary for their adequate exploitation performed in various regions of Italy, In "Geothermal energy I: Proc. United Nations Conf. on New Sources of Energy, Rome, 1961", v. 2, 1964, pp. 117-133.
5. Dow Chemical, JANAF thermochemical tables, with supplements through June 30, Dow Chemical Co., Midland, Mich., 1970.
6. Einarsson S. S., Proposed 15-megawatt geothermal power station at Hveragerdi, Iceland, In "Geothermal energy II: United Nations Conf. on New Sources of Energy, Rome, 1961", v. 3, 1964, pp. 354-362.
7. Elizondo J. R., Rapporteur's summation, In "Geothermal energy I: Proc. United Nations Conf. on New Sources of Energy, Rome, 1961", v. 2, 1964, pp. 48-50.
8. Elliott G. R., Gaseous hydrated oxides, hydroxides, and other hydrated

- molecules, Ph. D. thesis, University of California Radiation Laboratory, Berkeley, Report UCRL-1831, 1952.
9. Ellis A. J., Geothermal drillholes: Chemical investigations, In "Geothermal energy I: Proc. United Nations Conf. on New Sources of Energy, Rome, 1961", v. 2, 1964, pp. 208 -216.
 10. Foster P. K., Marshall T., Tombs A., Corrosion investigations in hydrothermal media at Wairakei, New Zealand, In "Geothermal energy II: Proc. United Nations Conf. on New Sources of Energy, Rome, 1961", v. 3, 1964, pp. 186 -194.
 11. Green J., Lessler R., Lawrence Livermore Laboratory, 1970 (частное сообщение).
 12. Hansen A., Thermal cycles for geothermal sites and turbine installation at The Geysers power plant, California, In "Geothermal energy II: Proc. United Nations Conf. on New Sources of Energy, Rome, 1961", v. 3, 1964, pp. 365 -377.
 13. Heitmann H., *Glastechn. Ber.*, **38**, p. 41 (1965).
 14. Kelley K. K., Heats and free energies of formation of anhydrous silicates, U. S. Dept. of Interior, Bur. of Mines Report of Investigations 5901, 1962.
 15. Jackson D. D., Thermodynamics of the gaseous hydroxides. Lawrence Livermore Laboratory, Livermore, California. Reports UCRL-71132 and UCRL-51137, 1970, 1971.
 16. Krauskopf K. B., Introduction to geochemistry, New York: McGraw-Hill, 1967, p. 461.
 17. Krikorian O. H., Thermodynamics of the silica-steam system, In "Symposium on Engineering with Nuclear Explosives, January 14 - 16, 1970", Las Vegas, Nevada. CONF-700101, v. 1, Clearinghouse for Federal Scientific and Technical Information, U. S., Dept. of Commerce, Springfield, Va., 1970.
 18. Lessler R. M., Reduction of radioactivity produced by nuclear explosives, In "Symposium on Engineering with Nuclear Explosives, January 14 - 16, 1970", Las Vegas, Nevada, CONF-700101, v. 2, Clearinghouse for Federal Scientific and Technical Information, U. S. Dept. of Commerce, Springfield, Va., 1970.
 19. Spillner F., *Chem. Fabrik*, **13**, No.2, 1940, p. 405.
 20. Stern K. H., Weise E. L., High-temperature properties and decomposition of inorganic salts, Pt. 2, Carbonates. U. S. Dept. of Commerce, Nat. Bur. of Standards Report NSRDS-NBS 30, 1969.
 21. Straub F. G., Steam turbine blade deposits, Urbana: University of Illinois, Bull. 43, No. 59, Engineering Experiment Station Bull. ser. No. 364, 1964.
 22. Styrikovich M. A., Investigation of the solubility of low volatility substances in high pressure steam by radioisotopes. In "Radioisotopes scientific research; Proc. International Conf., Paris, 1957", London: Pergamon Press, v. 1, 1958, pp. 411 - 425.

18. ПРОГРАММА ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ

Дж. К. Дентон, Д. Д. Данлоп¹⁾

На протяжении тысячелетий человеку было известно о существовании геотермальной энергии; уже первобытный человек был знаком с вулканами; индейские племена северо-запада Америки знали о существовании гейзеров и теплых источников. Более 100 лет назад началось бурение скважин для добычи нефти. И по крайней мере уже в течение 40 лет осуществляются различные сложные виды буровых работ: бурение под разными углами наклона, бурение пучков скважин, глубинное подводное бурение, бурение на большие глубины и т. д. Но несмотря на весь накопленный опыт, только в течение последних 20 лет в США стало возможным использование геотермальной энергии для выработки электроэнергии. Почему же этот источник энергии не вносит существенного вклада в общенациональный энергетический бюджет? До определенной степени это обусловлено неудовлетворительной разведанностью геотермальных ресурсов и недостатком знания о возможной рентабельности извлечения энергии из геотермальных теплоносителей. Исключение составляют такие редкие месторождения, как Долина Больших Гейзеров в Калифорнии. В этой главе рассказывается об усилиях, предпринятых Федеральным правительством для выявления насущных потребностей в исследовании геотермальных ресурсов, и излагается программа исследований, которая позволила бы получить значительное количество геотермальной энергии.

В течение ряда лет различными правительственными учреждениями проводились исследования с целью расширения наших знаний о геотермальных ресурсах. В 1973 финансовом году в соответствии с бюджетом Президента США на разработку программ по геотермальным исследованиям федеральным ведомствам отпущено менее 6,5 млн. долл. По-видимому, общая сумма финансирования с учетом всех сопутствующих работ не превышает 10 млн. долл.

¹⁾ Дентон Дж. К. работает в Пенсильванском университете в Национальном центре по разработке энергетических ресурсов и производству электроэнергии, Филадельфия; Данлоп Д. Д. работает в Фейерфаксе, шт. Виргиния.

В соответствии с перспективами развития национальной энергетики, намеченными Президентом США в его послании от 4 июня 1971 г. Отдел науки и техники совместно с Федеральным советом по науке и технике и соответствующими федеральными агентствами проводит широкую программу оценки различных способов производства электроэнергии. В декабре 1971 г. Отдел науки и техники возложил на министерство внутренних дел ответственность за оценку перспектив выработки геотермальной энергии и поручил ему разработать программу исследований и разработок. Геологическое управление США проводит в этом направлении работу, в которой принимают участие, с одной стороны, рабочие группы Национальной конференции по исследованию геотермальных ресурсов, которая состоялась в сентябре 1972 г., и, с другой стороны, не имеющий официального статуса межведомственный координационный комитет, созданный в сентябре 1971 г. с целью содействия обмену информацией между заинтересованными федеральными ведомствами. Этот комитет по крайней мере раз в месяц проводит заседания, в которых принимают участие представители Бюро по разработке недр, Ведомства по опреснению вод, Геологического управления, Шахтного управления, Бюро по управлению сельским хозяйством, Комиссии по атомной энергии, Национального управления по авиации и исследованию космического пространства, Агентства по разработке перспективных научно-исследовательских проектов, Агентства по охране окружающей среды и Национального научного фонда.

В ответ на предложение Университета Аляски, разработанное под научным руководством В. Дж. Хикеля, Национальный научный фонд учредил фонды для финансирования рабочей конференции по исследованию геотермальных ресурсов. Эта конференция, состоявшаяся в сентябре 1972 г., была созвана с целью оценить современный уровень развития геотермальной науки и техники и составить рекомендации по разработке программы исследований, призванной определить место геотермальных ресурсов в обеспечении страны 1) дополнительными ресурсами электроэнергии и тем самым способствовать разрешению энергетического кризиса, 2) дополнительными ресурсами воды и 3) дополнительными ресурсами минеральных солей.

Работа конференции проходила в шести рабочих группах, которые занимались рассмотрением следующих вопросов: 1) разведка геотермальных ресурсов, 2) оценка геотермальных ресурсов, 3) разработка бассейна и организации добычи, 4) методы эксплуатации и рентабельность, 5) влияние на окружающую среду, 6) правовые вопросы. О работе конференции был опубликован отчет /1/.

В данной главе выделены проблемы, которые относятся к исследованию геотермальных ресурсов, причем автор основывается главным образом на докладах конференции 1972 г. и классифицирует

материал в соответствии с шестью направлениями, намеченными этой конференцией.

Разведка геотермальных ресурсов

Разведка геотермальных ресурсов производится с целью отыскания месторождений, залегающих над горячей породой, оценки объема, температуры и проницаемости пород месторождения и установления природы геотермального теплоносителя, который можно получить из данного бассейна. Для удобства все геотермальные системы можно разделить на четыре типа: конвективные гидротермальные системы, системы, находящиеся под геостатическим давлением, горячие непроницаемые горные породы и магматические системы. Каждый тип характеризуется своими физическими свойствами и своими проблемами.

Относительно конвективных гидротермальных систем возникают такие важные проблемы, как определение возраста, размера и магматических условий месторождения; природы и причин структурных особенностей, определяющих положение конвективных гидротермальных систем и горячих сухих непроницаемых горных пород; связи конвективных гидротермальных систем с обширными областями, отличающимися повышенным тепловым потоком.

Геохимические данные, собранные в ходе разведки, полезны на всех стадиях оценки, разработки и эксплуатации месторождения. Ряд гидрохимических индикаторов успешно используется при разведке геотермальных ресурсов, однако использование других данных представляет трудности. Необходимо исследовать химические, физические и термодинамические свойства водных растворов при температурах 100–400°C; соотношение между химическим составом геотермальных жидкостей и температурой горячей коренной породы; изменения содержания изотопов в геотермальных водах.

Геотермальные системы имеют различное удельное электрическое сопротивление. Необходимо исследовать влияние пористости породы, солености воды и ее температуры на величину удельного электрического сопротивления в геотермальных бассейнах; улучшить методику измерения электрического поля и способы определения истинного удельного сопротивления по результатам полевых измерений; разработать дополнительные методы изысканий, которые облегчат обработку данных по удельному сопротивлению. Исследования электрических свойств бассейна должны включать дальнейшее изучение методов электроразведки (измерения сопротивления постоянному току и потенциала), а также электромагнитных, теллурических и магнитотеллурических характеристик. При разведке крупных месторождений особый интерес, возможно, представляет аэрофотосъемка.

Как отмечается в гл. 5, при разведке геотермальных ресурсов полезно использовать активные и пассивные сейсмические методы. Активные сейсмические методы позволяют определить характеристики поглощения и затухания волн, а также сдвиги частоты в известных высокотемпературных системах. Точное определение картины землетрясения способствует определению границ разломов, по которым может подниматься теплоноситель до уровня, достигаемого буровой скважиной. Необходимо также лучше понять влияние геотермальных теплоносителей и высоких температур на смещение по сбросам и скольжение пород. Изучение сейсмических шумов производится для оценки их изменения во времени и пространстве, для определения характеристик опознанных источников шума, спектра шума, его когерентности, положения источника и причины шума, а также направления распространения шума и его кажущейся скорости.

В зависимости от геологии района меняются гравитационные и магнитные характеристики геотермальных систем. Необходимы дальнейшие исследования для выявления причин гравитационных и магнитных аномалий, которые связаны с известными геотермальными районами, с тем чтобы решить, можно ли считать эти аномалии индикаторами высоких температур в нижних слоях системы.

Измерения тепловых характеристик бассейна являются непосредственным способом определения размера и потенциала геотермальной системы. Для уточнения оценок геотермальных ресурсов необходимы дополнительные измерения регионального теплового потока, а также исследования с целью определения соотношений между геотермическим градиентом, распределением температур на глубине и геометрией геотермальных систем. Было бы полезно провести лабораторные исследования температур на модели геотермальных систем. Для более глубокого понимания влияния движения грунтовых вод на локальные геотермические градиенты требуются гидрологические исследования.

Разработка новых, более дешевых методов бурения на глубину более 8 км в значительной степени облегчила бы разведку геотермальных, нефтяных и газовых месторождений, хотя усовершенствование методов бурения на меньшей глубине также необходимо. Основные трудности при использовании современной техники связаны с ее применением при высоких температурах. Это относится в первую очередь к резиновым уплотнениям, клапанам, цементам, буровым растворам, теплоизоляции, глушителям шума и т. д. При разведке геотермальных бассейнов может оказаться весьма полезным опробование пласта из скважины, не обсаженной трубами. Важно определение интервала взятия проб в рыхлых и трещиноватых породах геотермальных бассейнов. Для определения модели геотермальной ячейки было бы желательно использовать дешевый способ извлечения образ-

да породы вместе с заключенной в ней геотермальной жидкостью. Крайне необходима разработка скважинной регистрирующей аппаратуры, способной работать при температурах выше 180°C и передавать информацию из забоя скважины на поверхность. Разработка дешевой буровой жидкости с низкой плотностью, малой вязкостью, не чувствительной к изменениям температуры, с высокой теплопроводностью и высоким коэффициентом поверхностного натяжения позволила бы снизить стоимость бурения и сохранить поверхность забоя скважины в почти невозмущенном состоянии. Частицы выбуренной породы, керн и записи бурового журнала следует сохранять. Необходимо усовершенствовать технику роторного бурения и исследовать новые методы, такие, как эрозивное бурение, бурение с электроплавкой и турбобурение.

Наряду с исследованиями прикладного характера необходимо проводить фундаментальные исследования с целью изучения физических свойств геотермальных пароводяных смесей, решения проблем геотермальной физики и гидрологии, а также проблем, связанных с расчетами на ЭВМ.

Оценка геотермальных ресурсов

Хорошо известно, что геотермальные месторождения содержат не только запасы энергии, но и воду, а во многих местах также запасы ценных минералов. Таким образом, программа исследований должна предусматривать оценку всех трех потенциальных компонентов. Можно ожидать, что первоначально основное внимание программы исследований будет сосредоточено на энергетических ресурсах. Известно, что в глубинах земли находится магма – расплавленная масса при температуре в несколько тысяч градусов. По мере удаления от магмы температура непрерывно уменьшается. Теоретически к этому источнику энергии можно получить доступ в любой точке земного шара, если пробурить достаточно глубокие скважины и с помощью некоего теплоносителя извлекать из недр тепло. Однако в большинстве районов источники тепловой энергии залегают слишком глубоко, чтобы можно было использовать их тепло. Но в некоторых местах эти источники расположены близко к поверхности и проявляются в виде гейзеров и горячих ключей.

Необходимость в оценке геотермальных ресурсов становится очевидной, если обратить внимание на то расхождение, которое существует между прогнозами различных экспертов. Так, в работе /4/ содержится прогноз, согласно которому при современных экономических требованиях и уровне техники возможна выработка 5000 – 10 000 МВт мощности в течение по крайней мере 50 лет. Согласно оценке Национального совета по добыче нефти /2/, к 1985 г. США сможет вырабатывать 7000 – 19 000 МВт мощности из гео-

термальных источников. А Рекс /3/ в своем заявлении перед сенатской комиссией по внутренним делам 15 июня 1972 г. утверждал, что в ближайшие 20 лет только на западе США выработка геотермальной электроэнергии может быть доведена до уровня 400 000 МВт и будет поддерживаться на этом уровне в течение 100 лет. Самые последние оценки этого автора приводятся в гл. 3.

Исследование с целью оценки существующих геотермальных ресурсов должно проводиться для трех типов геотермальных месторождений: 1) конвективные гидротермальные системы; 2) системы под геостатическим давлением и 3) системы с горячими сухими горными породами. В ходе осуществления программы исследования по оценке ресурсов следует установить общие национальные запасы геотермальных месторождений, включая запасы энергии, воды и минералов.

Известны два основных типа конвективных гидротермальных систем. В настоящее время во всем мире в основном используется геотермальная энергия относительно редко встречающихся систем с преобладанием паровой фазы. В будущем ожидается значительное увеличение производства электроэнергии на основе использования более распространенных систем с преобладанием жидкой фазы. Для более полного использования конвективных гидротермальных систем необходимо: 1) изучить объем, жизнь месторождения, происхождение и динамику природных геотермальных систем с горячей водой и 2) изучить геологические, геохимические, гидрологические и геофизические характеристики геотермальных систем как основу для установления срока службы и инженерной разработки геотермальных ресурсов.

Водоносные слои под геостатическим давлением встречаются в прогибах, ограниченных сбросами, обычно параллельными береговой линии Мексиканского залива. Из воды, добываемой из таких месторождений, можно извлечь, во-первых, тепловую энергию, во-вторых, механическую энергию, обусловленную высоким давлением, и, в-третьих, метан, который содержится в растворе. Необходимо провести региональное исследование для сбора данных о температуре, структуре, содержании соли, типах осадочных пород, распределении потенциала давления, а также исследование возможных методов сброса отработанной воды в районе побережья Мексиканского залива, где геотермальная область простирается далеко в глубь материка (примерно на 1000 км) и выходит на прилегающую материковую отмель. В ходе исследования следует определить место трех площадок для проведения полевых работ, которые помогут определить жизнь месторождения, его объем и общий запас энергии. Потребуется пробурить скважины и взять пробы с выбранных площадок, оборудовать их соответствующей аппаратурой и провести наблюдения за работой скважин, через которые удаляется отработанная жидкость.

Еще не существует эффективных методов извлечения тепловой энергии из горячих сухих горных пород и использования этой энергии на поверхности Земли. Согласно современным представлениям, задача заключается в образовании искусственной системы циркуляции горячей воды путем бурения скважины для создания трещиноватой зоны пород. Для этого можно применять различные способы: гидравлическое разрушение, тепловое растрескивание, химический разрыв и растрескивание с помощью ядерных взрывов. Затем в зону образовавшихся трещин следует пробурить вторую менее глубокую скважину и создать систему с циркулирующей горячей воды, в которую через более глубокую скважину закачивается холодная вода, а более мелкая используется для извлечения нагретой воды. На поверхности между скважинами размещается теплообменник. Для определения рентабельности такого источника энергии необходимо выбрать подходящую площадку, пробурить глубокую скважину, создать на глубине зону трещиноватой породы, исследовать и смоделировать механические свойства и гидрологию скважин, площадки и трещиноватой породы; пробурить и оснастить соответствующей аппаратурой продуктивную скважину; сконструировать, изготовить и установить теплообменники между продуктивной скважиной и скважиной для закачивания холодной воды. Очевидно, что в дальнейшем потребуются новые скважины в новых местах для проверки различных методов разрушения породы.

Разработка бассейна и организация добычи

О потоках жидкостей в пористой среде известно довольно много из опыта нефтяных и газовых разработок. Существуют методы создания трещин в породах в местах залегающих нефти и газа с тем, чтобы увеличить проницаемость вмещающих пород бассейна. Данные о тепловом потоке в пористой среде получены в результате непосредственного изучения процесса горения. Первый важный шаг состоит в том, чтобы применить эти методы к разработке геотермальных ресурсов.

Для выработки электроэнергии теплоноситель необходимо извлекать на поверхность. Поток теплоносителя может непосредственно извлекаться из бассейна или может сначала потребоваться закачка жидкости в бассейн, где она будет нагреваться, и затем опять поступать на поверхность. Независимо от того, выводится ли на поверхность естественная жидкость бассейна или предварительно закачанная, из этой жидкости вполне можно извлечь растворенные в ней минеральные соли. Производство минералов может создать проблемы в связи с расходом электроэнергии, но в то же время явится дополнительным источником дохода.

Потребуется большое количество исследований для разработки и эксплуатации геотермальных бассейнов. Требуется провести исследования геологической формации, методов бурения, инженерных проблем разработки бассейна и его эксплуатации, организации производства, а также методов и техники стимулирования с целью увеличения производительности скважин. Необходимость в исследовании методов бурения и оценки геологической формации бассейна уже отмечалась выше.

Инженерные проблемы включают определение размера и производительности месторождения, а также планирование его оптимальной разработки. Необходимы фундаментальные исследования физического, химического и теплового поведения многофазных водных систем в пористой среде для установления физических принципов с целью создания действенных физических и математических моделей систем с геотермальной жидкостью. Эти исследования должны включать детальное изучение свойств переноса жидкости. Крайне необходимы полевые инженерные исследования геотермальных бассейнов для создания достаточно подробных математических моделей, позволяющих определить оптимальные значения таких важных параметров, как расстояние между скважинами, извлечение жидкости из водоносных слоев, закачка конденсата и холодных жидкостей в бассейн, охлаждение за счет местного кипения жидкостей, изменение проницаемости породы и проводимости жидкостей вследствие выпадения солей и твердых осадков и др. Для проведения таких полевых исследований необходимы специальные исследовательские площадки, на которых будет происходить сбор информации и проверка теоретических расчетов, касающихся инженерных и гидрологических проблем. Инженерные проблемы эксплуатации и организации производства связаны с истощением скважин, стимулированием их производительности, коррозией и образованием отложений, сепарацией геотермальной жидкости и измерением расхода потока с критической скоростью в трубопроводах и клапанах, а также с глубинными насосами.

Методика и техника стимулирования предназначены для улучшения проницаемости породы и поэтому имеют большое значение как при рассмотрении проблем выработки геотермальной жидкости, так и в связи с проблемами закачки. Следует рассмотреть все способы стимулирования: гидравлическое растрескивание, обработку кислотой, тепловое растрескивание, химический и ядерный взрывы. В частности, большие полости, образованные с помощью ядерных взрывов, могли бы быть использованы для сбора минеральных отложений, выпадающих при испарении горячей воды. Ядерные взрывы могли бы также способствовать осушению влажных систем с испарением, обеспечивая необходимое пространство для испарения под землей.

Методы эксплуатации и рентабельность

Следующее направление исследований связано с выбором наиболее подходящего способа извлечения энергии для каждого типа геотермального месторождения. Хорошо разработаны методы экономичной выработки энергии для систем с преобладанием паровой фазы и систем с преобладанием жидкой фазы, характеризующихся высокими температурами ($\sim 200^\circ\text{C}$). В системах с преобладанием паровой фазы, как в Долине Больших Гейзеров, пар можно получать в устье скважины. После фильтрации он поступает в турбины относительно низкого давления, которые приводят в действие генераторы. В высокотемпературных системах с преобладанием жидкой фазы жидкость в бассейне превращается в смесь жидкости и пара вследствие снижения давления в скважине. После отделения жидкости от пара он подается в турбину. Очевидно, для этих двух случаев нет никакой необходимости в дополнительных исследованиях. Если окажется возможным извлечь тепловую энергию из горячих сухих горных пород, то, по-видимому, сказанное окажется справедливым и в тех случаях, когда температура формации достаточна высока, чтобы закачанная в нее жидкость нагрелась.

Во всех случаях было бы желательно иметь больше информации о содержании газа, о выведении твердых частиц, о регулировании уровня шума, об удалении растворенных солей, таких, как боросодержащие и кремнеземы, о методах сброса отработанного раствора, конденсата и твердых осадков.

Большое количество геотермальных бассейнов (возможно, до 80% всех геотермальных бассейнов) имеет недостаточно высокую температуру, чтобы при существующем уровне техники можно было наладить рентабельное производство электроэнергии. Если бы такие месторождения могли стать рентабельными источниками электроэнергии, а также промышленной добычи минеральных солей и пресной воды, число геотермальных бассейнов, пригодных для эксплуатации, увеличилось бы во много раз. Для получения электроэнергии из таких бассейнов в США созданы промышленные паротурбинные установки с вторичным теплоносителем, в которых тепло передается жидкости с низкой температурой кипения (фреон или изобутан), а затем эта жидкость используется в качестве рабочего тела в системе с замкнутым циклом (гл. 8). Требуется дальнейшее исследование на опытных электростанциях различных систем с другими энергетическими циклами, получающими тепло от концентрированных растворов. Необходимы также опытно-промышленные опреснительные станции, использующие геотермальную энергию. Станции такого же типа могут потребоваться для изучения проблем, связанных с производством минеральных солей.

Для извлечения геотермальной энергии следует также изучить системы с несмешивающимися теплоносителями. В этих системах производится закачка в геотермальный бассейн жидкости, не смешивающейся с водой, с образованием сложного теплоносителя. С помощью процесса механической сепарации на поверхности выделяется горячее чистое рабочее тело. Требуется информация о коррозии материалов, контактирующих с геотермальными растворами. При использовании месторождений под геодавлением необходимо исследовать способы удаления метана из геотермального раствора. Следует изучить возможности прямого преобразования геотермального тепла в электричество, как, например, при термоэлектрическом преобразовании.

Влияние на окружающую среду

Геотермальные месторождения уникальны в том смысле, что все виды деятельности, связанные с энергетическим циклом, локализируются в непосредственной близости к электростанции. Не существует операций по добыче, получению топлива, его транспортировке и других вспомогательных операций. По этой причине возможное влияние разработки месторождения на окружающую среду зависит от местных условий. Такие нежелательные отходы производства, как сероводород, могут распространиться на несколько километров от геотермального поля и оказать определенное влияние на окружающую среду района.

Потенциальное воздействие на окружающую среду включает выделение газов и частиц, изменение и оседание почвы, сейсмическую опасность, загрязнение поверхностных и грунтовых вод, шумовые, биологические и социальные воздействия. Следует точно определить и оценить характер и величины этих воздействий. Необходимо разработать тщательную программу контролирования хода разработок геотермальных источников энергии, и возможно, потребуются разработать способы уменьшения некоторых воздействий на окружающую среду. Нельзя, например, закачивать отработанную геотермальную жидкость в бассейн, не позаботившись о чистоте грунтовых вод.

Организационно- правовые вопросы

Важнейшей задачей является установление организационных, юридических и уставных положений, которые позволят разрабатывать геотермальные источники с гарантией безопасности, экономической выгоды, сохранения окружающей среды и интересов всех участвующих сторон. К последним относятся: население, выступающее в качестве потребителей, промышленные фирмы, выступающие в качестве разработчиков месторождения, а также местные власти, администрация штатов и учреждения федерального правительства, выступающие в качестве контролирующей стороны.

Геотермальная энергетика является самой молодой отраслью энергетики, и правовые проблемы должны быть решены на самом высшем уровне, если предполагается, что геотермальные источники энергии будут вносить существенный вклад в энергетический бюджет страны. Необходимо рассмотреть ряд законодательных вопросов, а также вопросов, касающихся роли Федерального правительства в промышленных исследованиях и разработках. Следует оценить соответствие существующих правовых положений применительно к новому источнику энергии. Более того, желательно сохранить в новой отрасли существующую практику, при которой организация производства, сулящего прибыли, предоставляется промышленникам, однако необходимо решить вопрос о том, как определить заранее, достаточно ли высок возможный процент прибыли для того, чтобы заинтересовать предпринимателей в промышленной разработке. Какие надо принять постановления, которые обеспечивали бы оптимальную разработку источника с наибольшей выгодой для страны? Следует пересмотреть все соответствующие законодательные положения.

Далее требуется решить вопрос о том, как следует организовать исследования, субсидируемые правительством. В настоящее время ряд федеральных агентств осуществляет небольшие программы разработки геотермальных месторождений. Целесообразно ли создание нового учреждения по координации новых научно-исследовательских программ? Следует ли Федеральному правительству создать совет по национальной энергетике, частью которой являлась бы геотермальная энергетика? Ясно, что нужно рассмотреть и решить ряд острых вопросов организационного порядка в связи с осуществлением программы исследований по разработке геотермальных ресурсов. Мы рекомендуем создать при Президенте специальный комитет по изучению этих вопросов, который выяснил бы достоинства различных организационных структур.

Рассматривая вопрос на более высоком уровне, не следует пренебрегать возможным политическим аспектом развития геотермальных ресурсов. Например, если действительно геотермальную энергию можно получать во всем мире, США сильно выиграли бы в политическом отношении, разработав программу развития геотермальной энергетики в Индии или в каком-либо другом государстве Азии или в других местах земного шара. В этом смысле, исходя из узконациональных интересов, США, по-видимому, представляется еще один удобный случай для экспорта своей технологии. А разработка геотермальных источников энергии подняла бы жизненный уровень многих стран и, возможно, улучшила бы их экономическое положение. Все это косвенным образом могло бы способствовать благу всего остального мира.

Решению этих организационно-правовых вопросов должна предшествовать большая программа исследований, которая должна вклю-

чать обзор всех существующих законов и постановлений Федерального правительства, администрации штатов и местных органов управления, касающихся разработки геотермальных ресурсов. Далее необходимо проанализировать, как эти законы и постановления действуют и взаимодействуют, подготовить проект кодекса, проанализировать вопрос о праве собственности на геотермальные ресурсы и проблемы, связанные с их эксплуатацией, до окончательного определения права собственности. Необходимо изучить вопросы сотрудничества всех заинтересованных сторон и исследовать возможные механизмы такого сотрудничества, создать федеральную службу по сбору информации с тем, чтобы содействовать систематическому сбору и быстрому распространению данных о геотермальных исследованиях и разработках, и учредить комитет по изучению организационных изменений и постановке задач.

Заключение

С самого начала программа научных исследований должна включать как ближайшие задачи, так и задачи более отдаленного будущего. Одна из первостепенных задач заключается в том, чтобы разработать программу, которая соответствовала бы величине нового источника энергии и отвечала бы требованиям ускоренной разработки. Основное внимание в такой программе должно быть уделено разработке: 1) систем паротурбинных генераторов; 2) улучшению методов разведки; 3) методов опреснения геотермальных растворов; 4) методов более дешевого глубинного бурения горячих пород; 5) улучшенных моделей геотермальных бассейнов.

Однако вся эта научно-исследовательская работа не будет иметь никакого значения, если не будет достаточно изучен экономический аспект проблемы. Для правомерного сравнения на первом этапе анализа необходимо использовать те экономические параметры, которые используются в обычной энергетике. Но поскольку в настоящее время потребление связано с рентабельностью коммунального сектора национальной экономики, по-видимому, единственно правильным будет подход с точки зрения стоимости энергии для потребителя. В отношении коммунального сектора национального хозяйства действуют определенные постановления, поэтому, вероятно, возникнет необходимость в пересмотре этих постановлений.

Очевидно, что энергетический, водный и, возможно, минеральный потенциалы геотермальных источников огромны. Не менее очевидно на основе значительного опыта, приобретенного в других областях, что этот источник можно начать эксплуатировать при существующем уровне техники. Однако методы определения границ и местоположения самих геотермальных месторождений, как таковые, а также оценка экономических факторов, связанных с разработкой, требуют дополнитель-

ных исследований. Вопросы, связанные с влиянием на окружающую среду, и организационно-правовые вопросы также требуют изучения, но они в принципе разрешимы. Остается главный вопрос о возможности экономически выгодной эксплуатации основной массы геотермальных ресурсов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Nickel W. J., et al., "Geothermal energy: A national proposal for geothermal resources research (сообщение на конференции, состоявшейся в 1972 г. в Сиэтле, шт. Вашингтон).
2. National Petroleum Council, "U. S. energy outlook, an interim report", an initial appraisal by the New Energy Forms Task Group, 1971 – 1985, 1972.
3. Rex R. W., Testimony before the Senate Interior Committee, 1972.
4. White D. E., Geothermal energy, U. S. Geological Survey Circular 519, 1965.

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|-----|
| От редакции | 5 |
| Предисловие | 6 |
| Предисловие редакторов | 8 |
| 1. Отто К., Кругер П. Введение. Перспективы производства и потребления энергии (<i>перевод Кабакова В.И.</i>) | 9 |
| 2. Кениг Дж. Б. Состояние разработок геотермальных месторождений в мире (<i>перевод Кабакова В.И.</i>) | 22 |
| 3. Рекс Р. В., Хауэлл Д. Дж. Оценка геотермальных ресурсов США (<i>перевод Кабакова В.И.</i>) | 69 |
| 4. Уайт Д. И. Характеристики геотермальных систем (<i>перевод Кабакова В.И.</i>) | 79 |
| 5. Комбс Дж., Маффлер Л. Дж. П. Разведка геотермальных месторождений (<i>перевод Шаховой Н.И.</i>) | 104 |
| 6. Бадд Ч. Ф. мл. Добыча водяного пара в Долине Больших Гейзеров (<i>перевод Зродникова В.С.</i>) | 139 |
| 7. Финней Дж. П. Устройство и работа электростанции "Большие Гейзеры" (<i>перевод Зродникова В.С.</i>) | 154 |
| 8. Андерсон Дж. П. Цикл паротурбинной установки для геотермальной электростанции (<i>перевод Зродникова В.С.</i>) | 172 |
| 9. Лейрд А. Д. К. Получение пресной воды из гидротерм (<i>перевод Шаховой Н.И.</i>) | 185 |
| 10. Боуэн Р. Дж. Влияние геотермальных разработок на окружающую среду (<i>перевод Шаховой Н.И.</i>) | 206 |
| 11. Ивинг Э. Г. Стимулирование геотермальных систем (<i>перевод Передерия А.Д.</i>) | 225 |
| 12. Бэрнхем Дж. Б., Стюарт Д. Х. Извлечение геотермальной энергии из горячей сухой горной породы с помощью ядерных взрывов (<i>перевод Шаховой Н.И.</i>) | 231 |
| 13. Рэми Г. Дж. мл., Кругер П., Рэгхвен Р. Стимулирование гидрогеотермальных бассейнов с помощью взрыва (<i>перевод Шаховой Н.И.</i>) | 239 |

| | |
|---|-----|
| 14. Смит М., Поттер Р., Браун Д., Амодт Р.Л. Создание и развитие трещин в горячих горных породах (<i>перевод Шаховой Н.И.</i>) | 257 |
| 15. Остин К.Ф., Леонард Г.У. Стимулирование геотермальных скважин с помощью химических взрывов (<i>перевод Зродникова В.С.</i>) | 276 |
| 16. Сэндквист Г.М., Вэн Г.Э. Воздействие на окружающую среду при стимулировании месторождения с помощью ядерного взрыва (<i>перевод Зродникова В.С.</i>) | 299 |
| 17. Крикорьян О.Х. Коррозия и накипеобразование на геотермальных электростанциях при стимулировании месторождения с помощью ядерного взрыва (<i>перевод Шаховой Н.И.</i>) | 320 |
| 18. Дентон Дж.К., Данлоп Д.Д. Программа исследования геотермальных ресурсов (<i>перевод Шаховой Н.И.</i>) | 340 |

УВАЖАЕМЫЙ ЧИТАТЕЛЬ!

Ваши замечания о содержании книги, ее оформлении, качестве перевода и другие просим присылать по адресу:
129820 Москва, И-278,
1-й Рижский пер., д. 2, издательство "Мир".

ГЕОТЕРМАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ

Редакторы *О.Н. Прядкина, Ю.Б. Воронов*

Художник *Е.Н. Урусов*

Художественный редактор *В.К. Бисенгалиев*

Технический редактор *Е.В. Бурмистрова*

Подписано к печати 29/IX 75

Бум. офсет. № 1 60×90/16 = 11,13 бум. л.

Печ. л. 22,25. Уч.-изд. л. 23,62. Изд. № 20/7537

Цена 2 р. 36 коп. Зак. 3619

Издательство "Мир"

Москва, 1-й Рижский пер., 2

Типография № 9 Союзполиграфпрома

Волочаевская, 40

2 p. 26 x.

1743