

ПЕРСПЕКТИВЫ УНИВЕРСАЛЬНОЙ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ ОТ ДОБЫЧИ ТЕПЛА

Дж. У. Тестер, Х. Дж. Херцог, З. Чен, М. Г. Фрэнк

Извлечение тепла или тепловой энергии из земных недр (добыча тепла) потенциально может сыграть важную роль в технологии поставок энергии XXI века. Однако, даже если будут достигнуты цели продуктивности резервуара, значение добычи тепла при современных ценах на энергию и стоимости разработки может быть ограничено только малой частью земной поверхности. Для оптимизации конструкции и характеристик геотермальной системы сухих горячих скал (СГС) была разработана обобщенная многопараметрическая экономическая модель. В более общем контексте рассматриваются основные технические и институциональные препятствия для широкомасштабной добычи тепла. Обсуждаются перспективные концепции технологии бурения в свете их потенциального влияния на преодоление указанных препятствий широкомасштабной добычи тепла.

Все авторы работают в лаборатории энергетики Массачусетского технологического института, Кембридж, Массачусетс.

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ И КОМПРОМИССЫ

Некоторые считают геотермальную энергию сухих горячих скал (СГС) или, более широко, добычу тепла как восстанавливаемый из окружающей среды первичный источник энергии, способный уменьшить нашу зависимость от ископаемого и ядерного топлива в XXI столетии. В принципе тепловая энергия извлекается из доступных областей горячих скальных пород, используя экстраполированную технологию бурения и стимуляции нефтяных и газовых скважин для создания резервуаров, во многом похожих на природные геотермальные системы. На глубинах, где могут быть найдены достаточно высокие температуры (как правило, более трех километров), пористость и проницаемость скальных пород часто слишком мала для того, чтобы допустить удержание и циркуляцию природной жидкости. Первым шагом для добычи тепла в таких системах должно стать создание искусственной проницаемости при помощи метода гидравлической стимуляции для открытия и распространения трещин или соединений. Получившаяся сеть трещин соединяется с комплексом инъекционных и промышленных скважин, в которых тепло извлекается при циркуляции под давлением с поверхности, через первую скважину, через сеть трещин и через вторую скважину. Используя нагретую воду на соответствующим образом сконструированной станции, можно получить электроэнергию или пар. Эта конденция добычи тепла замкнута (см. рис. 1), так что эмиссия во внешнюю среду нет. Это ограничивает влияние "топливного цикла" СГС на окружающую среду подготовкой площадок, бурением скважин и другими скромными требованиями землепользования. Следовательно, добыча тепла не будет давать вклада в локальное загрязнение атмосферы и воды, в глобальные проблемы накопления парниковых газов или в угрозу здоровью от качества воды или воздуха¹. Даже при таких положительных качествах СГС можно рассматривать как весьма отдаленную альтернативу, которую, как и другие восстанавливаемые источники, можно представить как "вариант Золушки"².

Многие из потенциальных частных разработчиков СГС рассматривают текущее состояние этой проблемы как слишком неразвитое. Основные энергетические рынки управляются сейчас низкими ценами на нефть и газ и впечатлением того, что новая энергетическая технология по определению рискованна. Поэтому частные инвестиции в альтернативные энергетические системы вообще и в добычу тепла в частности были очень малы. Хотя некоторые опасения относительно риска достижения успешной добычи тепла вполне понятны, они представляются несущественными по сравнению с дру-

гими технологиями. Многие из необходимых методов уже были продемонстрированы либо специально для СГС в поддерживаемых правительством исследовательских программах, либо представляют собой расширение существующих методов для извлечения жидких углеводородов или геотермальных вод. Системы добычи тепла, так же, как и гидроэлектростанции, требуют больших начальных капиталовложений, включающих оборудование для преобразования энергии и поставки "топлива". Это частично снижает риск СГС по сравнению со станциями на ископаемом горючем, цены на которое могут быть потенциально нестабильными.

Национальные и международные исследовательские программы в основном были направлены на искусственные системы трещин в горячих скальных породах с малой естественной проницаемостью³⁻⁷. Однако, в последние десять лет большая часть этих программ пострадала от недостаточного финансирования, связанного с большим количеством дешевой нефти и газа. С финансированием ниже критического уровня технические перспективы не были полностью реализованы и некоторые важные требования по разработке до сих пор остаются невыполненными.

В течение последних 20 лет изучение технико-экономических аспектов СГС базировалось на определенном наборе требований к параметрам резервуаров и стоимости разработки бурения, стимуляции и сооружений электростанций. Тестер и Херцог^{8,9} рассмотрели семь исследованных СГС¹⁰⁻¹⁶ для оценки их исходных предположений и получения исправленных экономических предсказаний добычи тепла. Последующие исследования экономики СГС были проведены фирмой KTC Consultants¹⁷ и Пирсом и Лайвсеем¹⁸. Недавно Геологическая служба США опубликовала отчет¹⁹ о перспективах СГС в восточной части США.

В работах^{7,20} были заданы общие подходы к экономическому моделированию систем СГС с учетом влияния качества ресурсов, производительности резервуара, его глубины и температуры. В ранних исследованиях не ставилась задача решения нелинейной многопараметрической проблемы оптимизации одновременного выбора глубины скважины, структуры резервуара (например, количества трещин и расстояния между ними), скорости потока подземных жидкостей и стратегии дополнительного бурения. Выбор схемы и эксплуатации для систем добычи тепла в некоторой степени уникален. На рис. 2 показано, что для конкретного ресурса СГС с определенными средними геотермальными градиентом, средними условиями сброса тепла и балансом потока компромисс между стоимостью разработки скважин и резервуара и стоимостью электростанции достигается для оптимальной глубины бурения (или

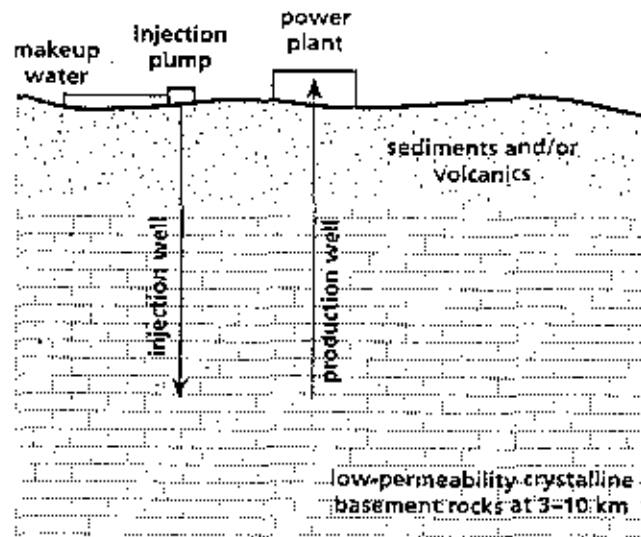


Рисунок 1

Концепция резервуара ГЭС (дублет) с системой связанных трещин в слабопроницаемой формации¹

начальной температуры скальных пород). В то время как стоимость электростанции монотонно уменьшается с температурой, стоимость бурения скважины экспоненциально растет с ростом начальной темпе-

ратуры (т.е., глубины).

В реальных резервуарах с конечным тепловым временем жизни уменьшение температуры (или иссякание) происходит с разной скоростью в зависи-

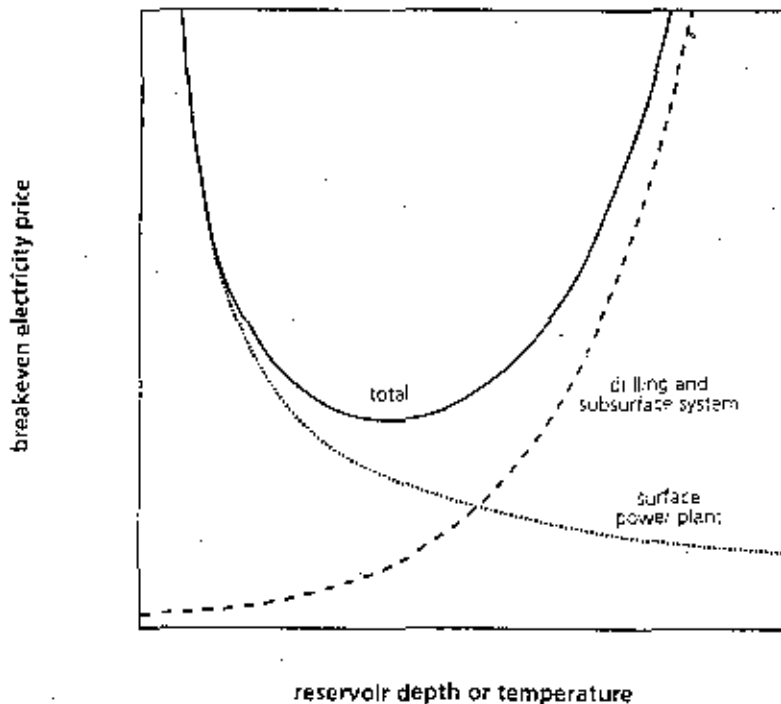


Рисунок 2

Концептуальный компромисс в терминах себестоимости электроэнергии между стоимостями бурения и электростанции в зависимости от глубины или начальной температуры резервуара для фиксированного геотермального градиента температуры.

мости от потока массы на единицу площади скальной породы или объема, доступного циркулирующей жидкости. Оптимальная стратегия достижения минимальной стоимости требует сбалансированного режима использования. Мгновенная мощность выделения энергии $P(t)$ пропорциональна произведению потока массы \dot{m}/dt и практической доступности подземной жидкости ($\eta_u \Delta B$), где η_u - коэффициент полезного действия топливного цикла и ΔB - термодинамическая эксергия, или доступность, т.е. максимальный потенциал производства энергии (более подробно см. в^{20,21}). Как η_u , так и ΔB сильно зависят от температуры подземной жидкости T , так что мгновенную мощность на единицу эффективного размера резервуара ($\langle A \rangle$) можно представить в виде:

$$\frac{P(t)}{\langle A \rangle} = \frac{\dot{m}(t)\eta_u(T)\Delta B(T)}{\langle A \rangle}$$

где $\Delta B = \Delta H - T_0 \Delta S$ в интервале от T до T_0 . T_0 - минимальная температура при сбросе тепла; ΔH и ΔS соответственно представляют собой изменения удельной энтальпии и энтропии чистой подземной жидкости в интервале от T до T_0 .

Величина $P(t)/\langle A \rangle$ является мерой качества резервуара в терминах его производительности. Скорость выкачивания тепла характеризуется величиной $(\dot{m}/dt)/\langle A \rangle$, в то время как производство электроэнергии зависит от $\eta_u(T)\Delta B(T)$. Если \dot{m}/dt возрастает при фиксированном размере ($\langle A \rangle$), то T уменьшается быстрее и, поскольку обе величины $\eta_u(T)$ и $\Delta B(T)$ быстро уменьшаются с падением T , общая производительность источника уменьшается, источник "периспользуется" (как качественно показано на рис. 3). Если \dot{m}/dt уменьшается медленнее оптимально, то скорость падения температуры уменьшается, но одновременно уменьшается и производительность $P(t)/\langle A \rangle$. Эта ситуация соответствует

"недоиспользованию" источника.

РАЗВИТИЕ МОДЕЛИ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ

Для оптимизации схемы и параметров геотермальных систем добычи тепла была разработана обобщенная многопараметрическая экономическая модель. Она представляет собой уточнение существующей экономической модели СГС Массачусетского технологического института^{8,9}. Основные изменения таковы:

- 1) изменение нашего простого представления резервуара СГС введением концепции резервуара с многочисленными параллельными трещинами и параметра девиации скважины;
- 2) адаптацией модели к оптимизационной среде и связью этой исправленной модели системы СГС с оптимизационным пакетом SQP (Successive Quadratic Programming);
- 3) связью алгоритма уровневой стоимости жизненного цикла (УСЖЦ) с моделью;
- 4) изменением стоимостей для самой последней доступной даты (в нашем случае для 1991 года).

Так же, как и раньше, производство электроэнергии рассчитывалось на основе потока подземного течения (под "подземным течением" понималась циркуляция воды с растворенными минералами в стационарных условиях) в зависимости от применения корреляции эффективности утилизации. Производство электроэнергии корректировалось для учета прибавления паразитной подкачки, вызванной перепадом давления в системе, исправленном по вычислениям в давлении из-за сил плавучести. Себестоимость электроэнергии в модели рассчитывалась по алгоритму УСЖЦ. Этот алгоритм, согласующийся с методологией Исследовательского института электроэнергии и разработанный в Лос-Аламосской национальной лаборатории²², был полностью включен в исправленную модель СГС. Все представлено

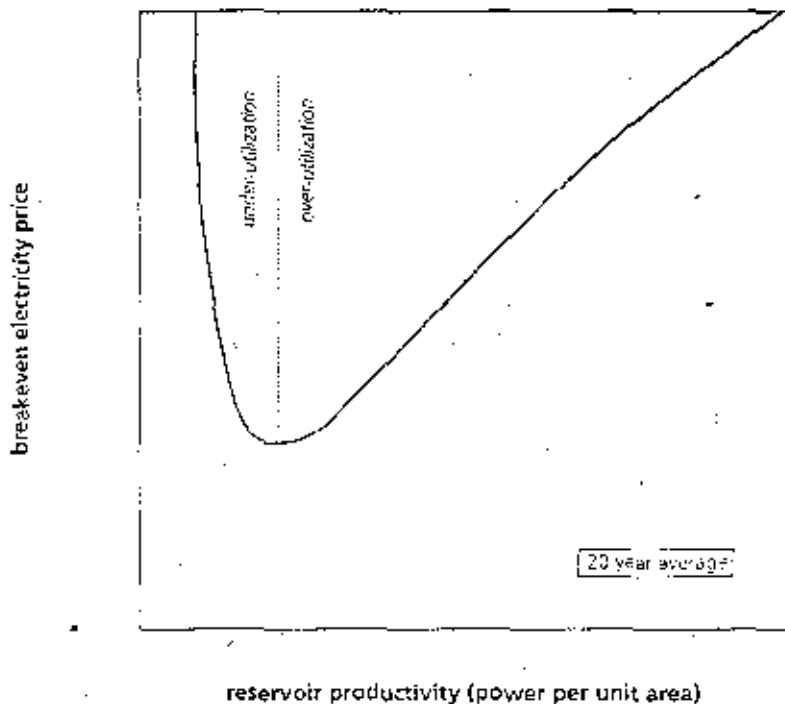


Рисунок 3
 Качественное соотношение между себестоимостью электроэнергии и производительностью резервуара для конкретного источника (с известными градиентом, площадью резервуара, глубиной, начальной температурой и т.д.).

ные в этой статье результаты получены по алгоритму УСЖЦ и выражены в долларах 1991 года. В последующем для простоты мы будем ссылаться на эту модель как на оптимизационную модель СГС.

Для предсказания зависимости температуры подземной жидкости от времени необходимо должное понимание скорости уменьшения температуры резервуара. Резервуары СГС представляют собой сложную систему пересекающихся трещин, которые могут возникнуть при активации набора природных соединений или ослабленных зон в формации. Для того, чтобы сделать трактовку модели более понятной, предполагается идеализированный набор одиночных или параллельных трещин (см. рис. 4). Эта модель была впервые предложена в работе²³. Модель резервуара называется "концептуальной" из-за того, что не имеется существенной информации для доказательства того, что определяющие резервуар параметры имеют строгое физическое значение. При течении подземной жидкости по этим трещинам она извлекает тепло из окружающих скальных пород. Качество резервуара зависит от геометрии набора трещин, расстояния между ними и импеданса потока, который определяет скачок давления в резервуаре и может ограничивать скорость подземного потока. Мы учитываем также зависимость температуры от глубины вдоль скважины.

Модель системы СГС состоит из инъекционной и производственной скважин, пробуренных по вертикали до определенной глубины, после которой они изгибаются, оставаясь параллельными. Скважины связаны конечным числом равноотстоящих трещин постоянной толщины, разделенных блоками непроницаемой однородной скалы. Предполагается, что все эти трещины перпендикулярны инъекционной и производственной скважинам. Потоком тепла через границу резервуара пренебрегается. Поток тепла в скальной породе считается перпендикулярным к поверхности трещины. Возможным расширением от тепловых нагрузок пренебрегается. Вода

инжектируется с поверхности, проходит по трещинам в равномерно распределенном потоке, поднимается вверх по производственной скважине и поступает на электростанцию. Геометрия резервуара определяется пятью параметрами: глубиной и девиацией скважины, эффективной площадью отдельной трещины, числом трещин и расстоянием между ними. В модели указываются глубина скважины, полная эффективная площадь теплопередачи, средняя глубина резервуара и средняя начальная температура скальных пород. Иссякание резервуара рассчитывается с помощью дифференциального уравнения, связывающего одномерную теплопроводность скалы и одномерный конвекционный поток в плоских структурах постоянного сечения.

Оптимизационная модель СГС состоит из системы нелинейных дифференциальных уравнений, которая должна быть решена точно. Переменные модели ограничены верхними и нижними пределами. Некоторые параметры модели также должны удовлетворять линейным или нелинейным неравенствам. Например, давление жидкости на дне резервуара должно быть меньше или равно критической прочности разрушения для уменьшения потери воды. Математическая структура требует использования алгоритма ограниченной нелинейной оптимизации для эффективного решения мелкомасштабных сильно нелинейных задач. Целью оптимизации является минимизация себестоимости электроэнергии. Альтернативными задачами могут быть максимизация мощности электростанции, теплового выхода или доступности подземной жидкости. Для ускорения сходимости и предотвращения выпадения оптимизации в локальные минимумы контрольные параметры масштабируются на единицу. Другие детали модели и анализа чувствительности можно найти в отчете лаборатории энергетики МТИ²⁴.

В этом исследовании изменяемыми параметрами оптимизации являются следующие:

1) Глубина бурения. При заданном геотермаль-

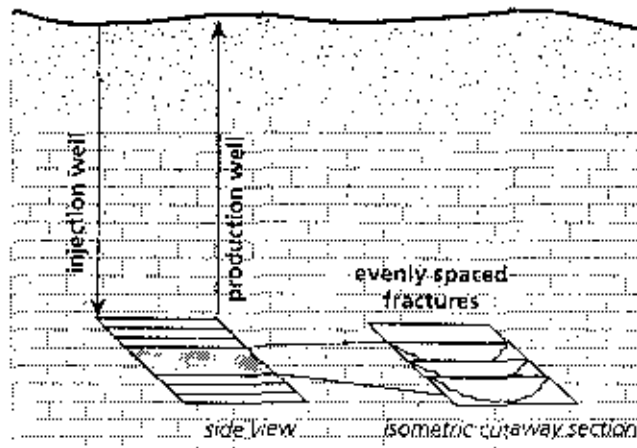


Рисунок 4

Схема концептуальной модели резервуара СГС для базового варианта оптимизационной модели СГС (модели резервуара с множественными параллельными трещинами).

ном градиенте оптимальная глубина бурения определяется из баланса между увеличением стоимости бурения с глубиной и увеличением эффективности производства электроэнергии при повышенной температуре подземной жидкости.

Таблица 1

Значения параметров для основного варианта	
Параметр модели	Значение
Максимальная температура жидкости	330 °C
Средняя температура поверхности	15 °C
Средняя температура теплообменника	25 °C
Скачок температуры в скважине	15 °C
Импеданс трещины	2,57 МПа с/м
Потеря жидкости под землей	
Плотность скалы	
Теплопроводность скалы	
Теплоемкость скалы	
Девияция от вертикали	
Площадь теплопередачи трещины	
Расстояние между трещинами	
Температура инъекции	
Эффективность насосов	
Срок эксплуатации	

2) Число трещин. При заданных расстоянии между скважинами и между трещинами число трещин будет определять объем резервуара. Большой объем резервуара приводит к понижению скорости уменьшения температуры, к более высокой капитальной стоимости и к несколько меньшей начальной температуре подземной жидкости. Для удобства расчетов количество трещин рассматривалось как непрерывный контрольный параметр (хотя смысл имеют только целые числа).

3) Поток подземной жидкости. Большой поток жидкости увеличивает начальную мощность генерации, но ускоряет уменьшение температуры.

Расчеты проводились в диапазоне средних геотермальных градиентов от 20 до 100 °C/км. Другие параметры основного варианта приведены в табл. 1. Используя подход из работы [1], и современные относительно высокие цены на бурение и строительство, был построен трехмерный график зависимости себестоимости электроэнергии в зависимости от потока подземной жидкости и количества трещины, показанный на рис. 5. На этом графике проявляется "долина" от области малого потока и малого количества трещины в направлении большого потока и большого количества трещины. В области малых значений долина узкая, а при росте параметров она расширяется. Из рисунка заметно также, что значительная область поверхности себестоимости является сравнительно плоской. Оптимальная точка соответствует потоку в 87,9 кг/сек и 26,7 трещинам; в ней себестоимость электричества равна 9,2 цента на киловатт-час. Полное падение температуры за 20-летний срок эксплуатации примерно равно 17,6 процентам; это означает, что

$$[T(t = 0) - T(t = 20)]/[T(t = 0) - T_0] = 0,176$$

где $T(t)$ - температура жидкости на выходе в момент времени t , а T_0 - внешняя температура теплообменника.

На рис. 6 показан вклад основных компонентов в себестоимость электроэнергии. По мере уменьшения геотермального градиента увеличивается вклад стоимости бурения и строительства. При очень малом градиенте в 20 °C/км капитальная стоимость установки мощностью в 50 МВт составит 5,5 млрд.

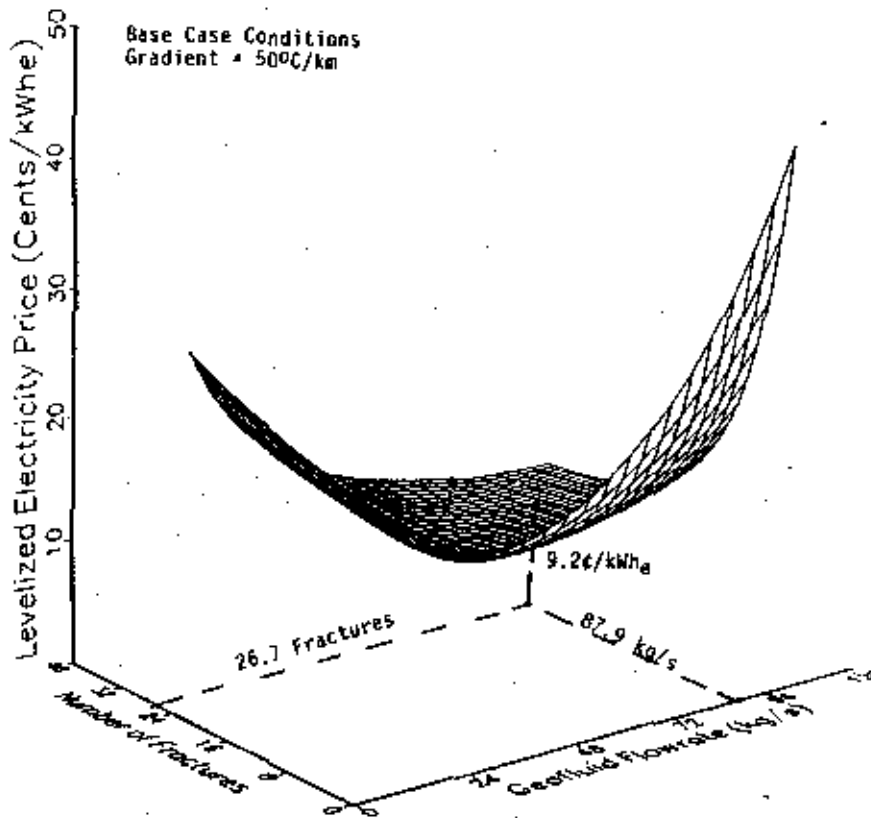


Рисунок 5

Результаты расчетов оптимизационной модели СГС в основном варианте и геотермальном градиенте 50 °C/км. Показана зависимость себестоимости электроэнергии от количества трещин и подземного потока; указана оптимальная точка.

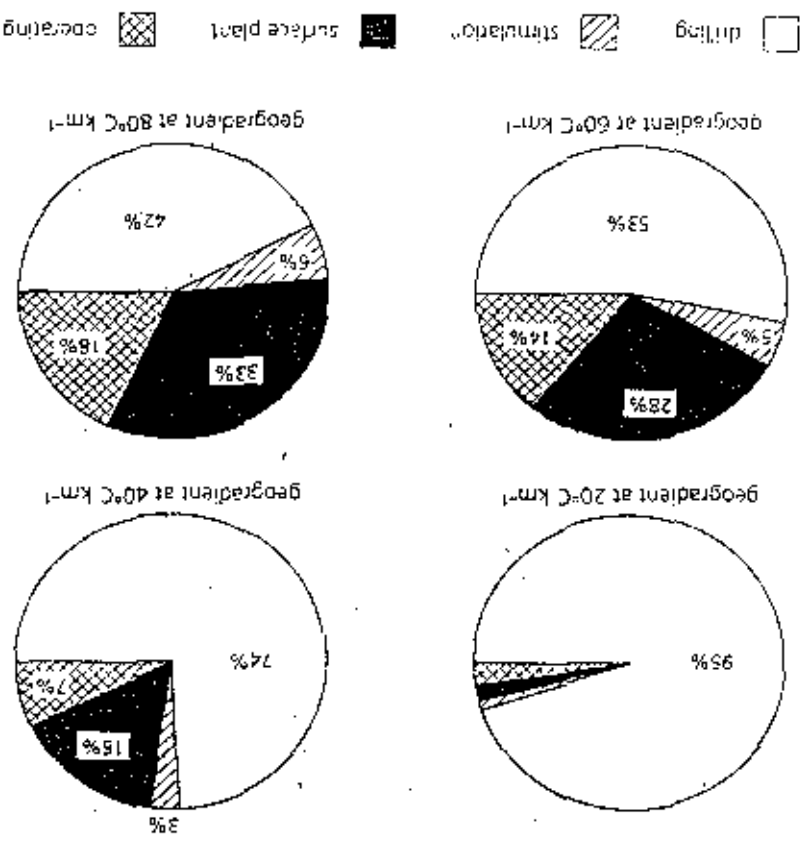


Рисунок 6. Разделение на компоненты стоимости (бурение, стимуляция, электростанция и эксплуатация) для каждого варианта оптимизационной модели CFC в интервале геотермальных градиентов при современной технологии и стоимости бурения.

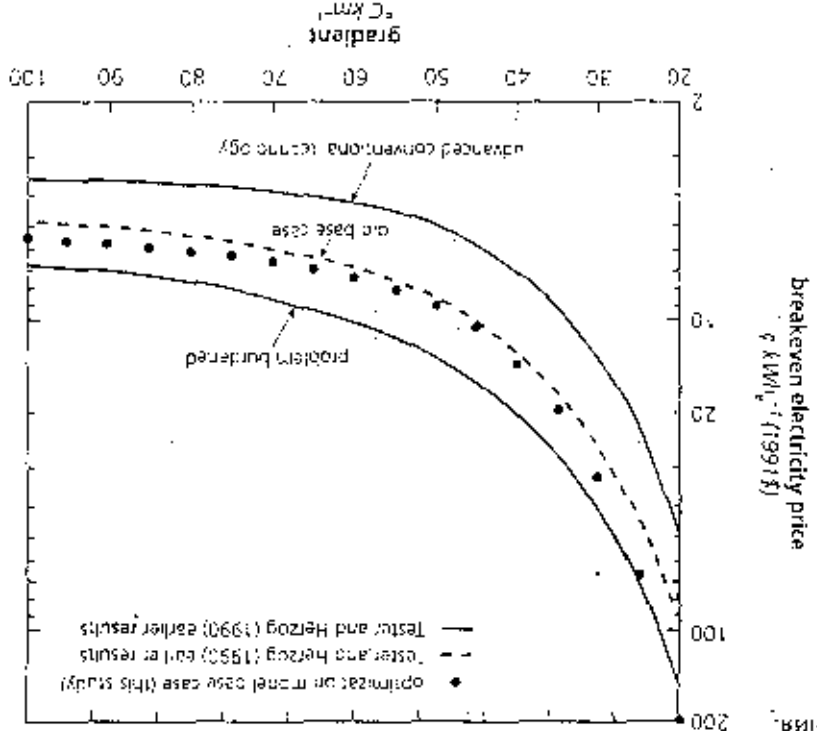


Рисунок 7. Сравнение результатов оптимизационной модели CFC с предыдущими результатами.

долл., в основном за счет скважин и резервуара. При улучшении качества необходимые инвестиции резко уменьшатся, например, при градиенте в 80 °C затраты уменьшатся до 125 млн. долл. Это показывает, почему в настоящее время коммерческие возможности СГС ограничены областями среднего и высокого качества (более 50 °C/км). Кроме того, это подчеркивает важность понижения стоимости бурения для того, чтобы СГС стало важной энергетической технологией в областях с низким градиентом, занимающих большую часть земной поверхности.

На рис. 7 показано сравнение результатов основного варианта оптимизационной модели СГС с базовым коммерческим вариантом⁹. Себестоимость электричества, предсказываемая оптимизационной моделью СГС, несколько выше, что частично объясняется отсутствием в этой модели повторного бурения и стимуляции. Хотя стоимость электричества в обеих моделях сравнима, схемы систем сильно отличаются (см. табл. 2) из-за введения концептуальной модели Грингардена²³, что привело к весьма консервативной схеме.

На рис. 8 показана зависимость трех манипулируемых переменных и трех рассчитываемых переменных от геотермального градиента. При среднем градиенте менее 40 °C/км глубина скважины определяется балансом между стоимостью бурения и строительства при различных температурах. Однако при градиенте более 40 °C/км глубина скважины всегда определяется верхним пределом, связанным с максимально допустимой температурой подземной жидкости. Кроме того, если геотермальный градиент превышает 40 °C/км, то с его увеличением растет и скачок температуры в резервуаре. Поэтому есть ясная причина для создания малых резервуаров в областях с большим геотермальным градиентом и больших резервуаров в областях с малым градиентом.

том. Из-за этой разницы в размерах резервуаров оптимальный поток подземной жидкости в ресурсах с малым геотермальным градиентом будет больше, чем у ресурсов с большим геотермальным градиентом. Более того, среднее производство электроэнергии для отдельной пары скважин при сроке эксплуатации в 20 лет будет заметно уменьшаться при увеличении геотермального градиента из-за меньших размеров резервуаров и меньших потоков подземной жидкости при высоких геотермальных градиентах.

ПРЕПЯТСТВИЯ ШИРОКОМАСШТАБНОЙ ДОБЫЧЕ ТЕПЛА

Очевидно, что в рассматриваемой выше экономической модели содержится заметный элемент спекуляции. Например, мы сделали ряд предположений об ожидаемых уровнях производительности резервуаров, значительно превосходящих достигнутые до сих пор в полевых испытаниях. Фактически мы относимся к экономической реализуемости добычи тепла несколько ретроспективно. В 1976 году Милора и Тестер²⁰ собрали данные по коммерческим гидротермальным системам для определения набора целевых критериев характеристик СГС. Позднее Эдингг¹⁵, разные группы в Лос-Аламосе^{11,12} и Англии³⁻⁵, Армстронг и Гестер⁸, Тестер и Херцог^{8,9} несколько уточнили эти критерии. Мы смогли показать, что опубликованные ранее^{8,9} наши начальные предположения для основного варианта согласуются с развитой в этой работе более строгой моделью, использующей нелинейный многопараметрический метод оптимизации. Более того, это означает, что использованные ранее оригинальные предположения о производительности резервуаров еще превышают те, которые были достигнуты в полевых испытаниях.

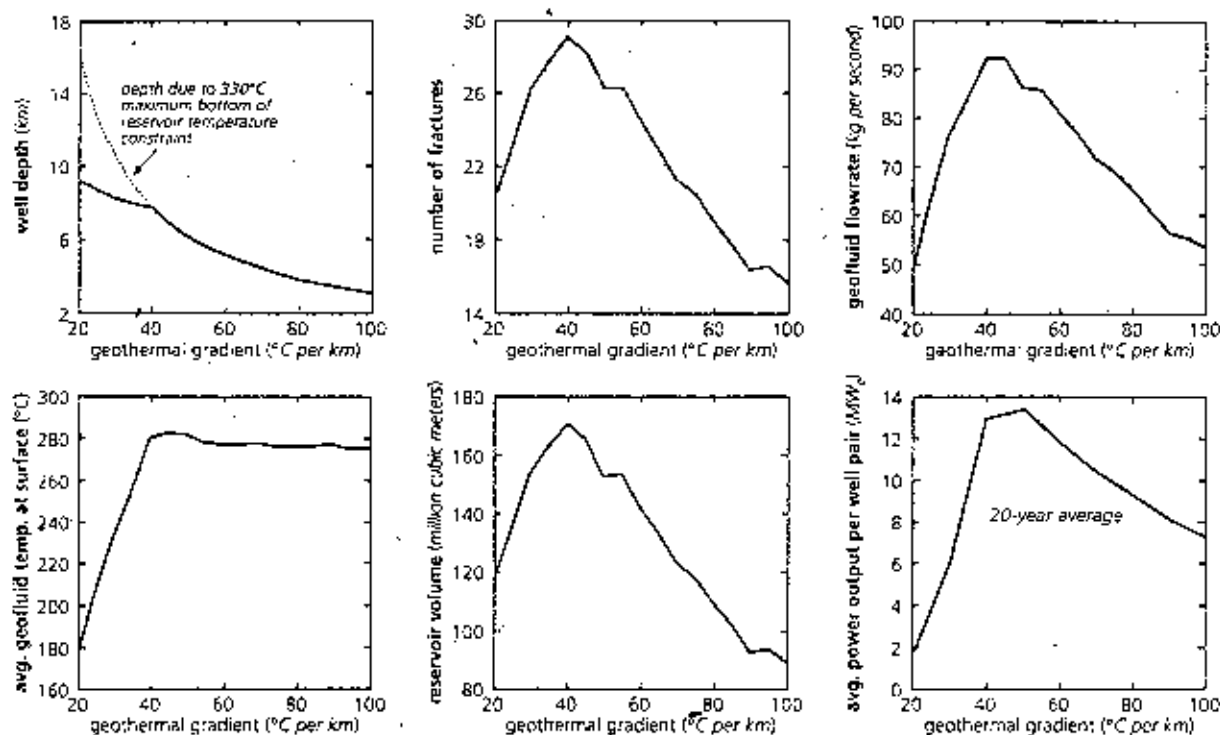


Рисунок 8

Оцениваемые значения ключевых конструктивных параметров от геотермального градиента для основного варианта оптимизационной модели СГС. В верхнем ряду приведены графики (слева направо) зависимости глубины скважины, числа трещин и потока жидкости, в нижнем - средней температуры жидкости на поверхности, объема резервуара и средней мощности на пару скважин.

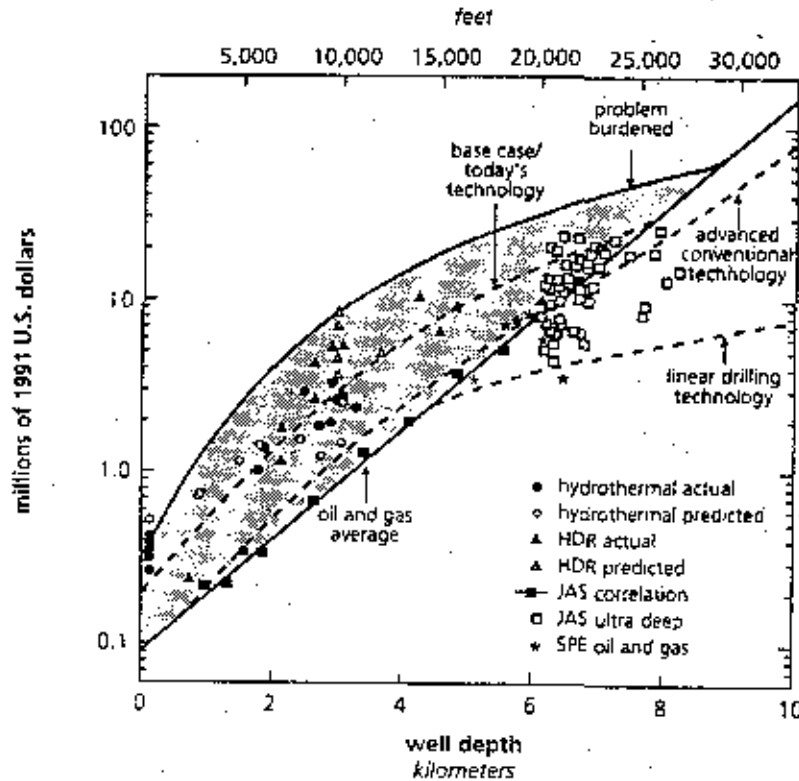


Рисунок 9

Стоимость бурения для различной технологии, используемая в моделировании СГС. Здесь приводятся также исторические данные о стоимости бурения скважин для СГС, гидротермальной энергетики, добычи нефти и газа, а также сверхглубоких скважин. Ссылки на источники показанных данных приведены в работах [8,9,21].

Средний градиент	20 °/км		40 °/км		60 °/км		80 °/км	
	старый	новый	старый	новый	старый	новый	старый	новый
Себестоимость электроэнергии, цент/кВт час	85	205	11,9	14,0	6,6	7,6	5,3	6,2
Стоимость станции на поверхности, доллар/кВт	1900	1900	1000	1100	1000	1000	1000	3,94
Стоимость подземной системы, доллар/кВт	31000	107000	3500	5600	2300	2300	800	66
Глубина скважины, км	9,15	9,15	7,13	7,74	4,75	5,25	3,56	1,94
Поток подземной жидкости, кг/с	75	46	75	92	75	81	75	66
Эффективная площадь, 10 ⁶ м ²	1,2	2,04	1,7	2,93	1,6	2,48	1,6	1,94
Выходная мощность, МВт	3,5	1,4	14,9	13,7	14,7	11,7	14,5	9,2

Таблица 2

Сравнение характеристик систем для одиночной пары скважин (старый - работа⁹, новый - эта работа)

Для ресурсов среднего и высокого качества (более 50 °C/км) при предполагаемой производительности резервуара от 45 до 100 кг/сек, мощности от 30 до 80 МВт на пару скважин и размерах резервуара, достаточных для того, чтобы уменьшение мощности не превышало пяти процентов за пять лет эксплуатации, себестоимость электроэнергии в СГС будет составлять от 6 до 10 центов за кВт час. При этом предполагалось, что стоимость бурения и строительства электростанции определяются текущими ценами, а расходы на разведку и подготовку площадки умеренны.

Для достижения такого базового уровня производительности резервуара в Фентон-Хилле (резервуар высокого качества в Нью-Мексико, эксплуатируемый Лос-Аламосской национальной лабораторией Министерства энергетики США) необходимо в 5 - 10 раз снизить импеданс потока при приемлемых уровнях потери воды. Очевидно, что для оптималь-

ного конструирования необходим более фундаментальный инженерный опыт. Здесь нет непреодолимых технических барьеров, но перед тем, как можно будет свободно разрабатывать системы с низким импедансом и достаточно большой производительностью, надо получить больше знаний о создании больших систем трещин в скалах с малой проницаемостью. Основной вывод таков: надо затратить больше времени, усилий и средств на полевые эксперименты по добыче тепла. Такой подход позволит создать инженерную основу, техническое "ноу-хау" и человеческие ресурсы, необходимые для создания коммерческой добычи тепла. Можно думать о цели демонстрации производительности резервуара СГС в коммерческих масштабах как о первом решающем шаге в эволюции универсальной добычи тепла.

Успешная демонстрация фактически позволит гарантировать коммерческое развитие наших ресурсов СГС среднего и высокого качества как альтернатив-

тивы производству электроэнергии при сжигании ископаемого горючего или на атомных электростанциях. Для достижения действительно универсальной добычи тепла надо будет сделать экономически доступными широко распространенные ресурсы низкого качества (от 20 до 40 °С/км). Это потребует более революционных достижений. Как видно из рис. 6 и 7, для ресурсов с низкими градиентами себестоимость электроэнергии очень высока, что в первую очередь обусловлено высокой стоимостью бурения. В основном варианте условий разработки и эксплуатации, включающем производительность резервуара, сравнимую с системами среднего и высокого качества, стоимость электроэнергии лежит в интервале от 15 до 100 центов за кВт час, что от 3 до 20 раз выше современной рыночной цены. Из рис. 6 можно видеть, что при уменьшении градиента с 80 до 20 °С/км доля стоимости бурения в общих расходах увеличивается с 42 до 95 процентов.

Даже с учетом неотъемлемой спекулятивной природы можно сравнительно надежно утверждать, что добыча тепла не сможет стать универсальной до тех пор, пока не произойдет фундаментального уменьшения стоимости бурения и/или создания резервуаров. Хотя можно предполагать, что открытие новых методов создания систем СГС может привести к огромному уменьшению производительности пары скважин, в ограниченных существующих концепциях добычи тепла кажется более вероятным, что прорыв в технологии бурения скорее приведет к желаемому результату. Такой прорыв должен представлять собой отход от экспоненциальной зависимости стоимости скважины от ее глубины, исторически подтвержденной практикой всем опытом бурения нефтяных и газовых скважин в США, а также опытом бурения геотермальных скважин в США (стоимость которых несколько выше). Некоторые из этих данных показаны на рис. 9. Линия основного варианта современной технологии представляет средние условия для бурения скважин для СГС при использовании современной технологии вращательного бурения. Линия "встреченных проблем" и "продвинутой обычной технологии" практически ограничивают область всех стоимостей и их предсказаний для скважин СГС, опять же для технологии вращательного бурения. На рис. 9 приведены данные 15-летнего обзора ассоциации²⁵ для нефтяных и газовых скважин, а также некоторые данные по отдельным сверхглубоким скважинам. Отметим разброс стоимости сверхглубоких скважин, включенный прежде всего различием типов формаций и программ бурения.

На рис. 9 показана также линия "линейного бурения", при которой зависимость стоимости скважины от глубины после четырех километров принимает линейный характер. Мы полагаем, что такая зависимость представляет собой нижний предел стоимости бурения, когда продвинутые технологии, подобные плазменному тепловому распылению или кавитации водяными струями, будут использоваться в полностью интегрированной системе бурения.

В обычном вращательном бурении наблюдались значительные достижения, связанные с применением конических буровых головок с новыми материалами, такими, как карбид вольфрама или алмазные композиционные материалы. Однако, подобные улучшения ограничены тем фактом, что основным механизмом проникновения основан на раздроблении и обдирании, и подвержен износу и возможным поломкам.

Скальные породы геотермальных резервуаров бурить труднее, поскольку они тверже большинства нефтя- и газонесных формаций. Кроме того, добыча тепла из ресурсов низкого качества потребует сверхглубокого бурения на глубины от четырех до восьми километров, на которых замена буров становится длительной. Эти факторы увеличивают стоимость

средних геотермальных скважин в два-три раза по сравнению с нефтяными или газовыми скважинами той же глубины. Дальнейшие достижения в технологии обычного вращательного бурения позволят сделать стоимость бурения скважин для добычи тепла со средней стоимостью бурения нефтяных и газовых скважин.

Мы полагаем, что фундаментальные изменения механизма бурения, характеризующиеся более высокими скоростями проходки и значительно меньшей износом, могут привести к более близкой к линейной зависимости стоимости от глубины. Например, плазменное тепловое распыление позволяет проходить скважину при помощи больших потоков тепла, создающих дифференциальные тепловые нагрузки и разрушение. Обломки скальных пород отрываются от поверхности и извлекаются из скважины движущимися с высокой скоростью газовыми продуктами сгорания. В предварительных полевых испытаниях бурились скважины глубиной до одного километра в твердых гранитных формациях со скоростью, в 5 - 10 раз большей, чем при обычном бурении, практически без износа бурящегося оборудования. Похожие улучшения характеристик наблюдались при несомненном методе вращательного бурения и кавитации. Несмотря на то, что еще рано предсказывать универсальный выигрыш для приложений в сверхглубоком бурении для добычи тепла, были начаты усилия по исследованиям и разработкам в технологии сверхглубокого бурения. Например, в немецкой программе глубокого континентального бурения (КТВ) вблизи Виттсхоффенбаха (осуществляемой правительством ФРГ) и в российской сверхглубокой скважине на Кольском полуострове (осуществляемой правительством России), были получены полезные данные. Кроме того, национальная программа продвинутой технологии бурения и эквивалент (NADJET) для изучения революционных улучшений технологии бурения, поддерживаемая Министерством энергетики, должна быть начата в конце 1994 года.

На рис. 10 и 11 показаны предсказанные стоимости разработки добычи тепла для указанных в таблице 1 условий основного варианта при замене экспоненциальной зависимости стоимости скважины от глубины на линейную. На рис. 10 показано наименее распределения цен в сравнении с обычной технологией бурения (см. рис. 6). При приложении линейной модели к ресурсу с градиентом 20 °С/км на бурение приходится всего 51 процент стоимости, а не 95.

На рис. 11 общие американские ресурсы добычи тепла разбиты на пять классов или степеней качества, соответствующих средним значениям градиента от 80 до 20 °С/км (карта распределения геотермальных градиентов в США приведена в работе¹). Общая мощность ресурсов добычи тепла составляет 42000 ГВт(эл) при 20-летнем сроке эксплуатации (для сравнения, общая мощность производства электроэнергии в США примерно равна 700 ГВт). На гистограмме рис. 11 показано сравнение себестоимости электроэнергии для каждого класса ресурсов СГС с современной технологией бурения и с тем, что возможно при линейной зависимости стоимости от глубины. Для ресурсов высокого качества (от 60 до 80 °С/км) влияние продвинутой технологии бурения хотя и заметно, но не так впечатляющее, как для ресурсов низкого качества (от 60 до 30 °С/км), где такая технология позволит достичь экономической реализуемости добычи тепла на современных энергетических рынках.

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Была разработана модель многопараметрической оптимизации для определения конструкции резервуара (глубины и расположения скважины, оп-

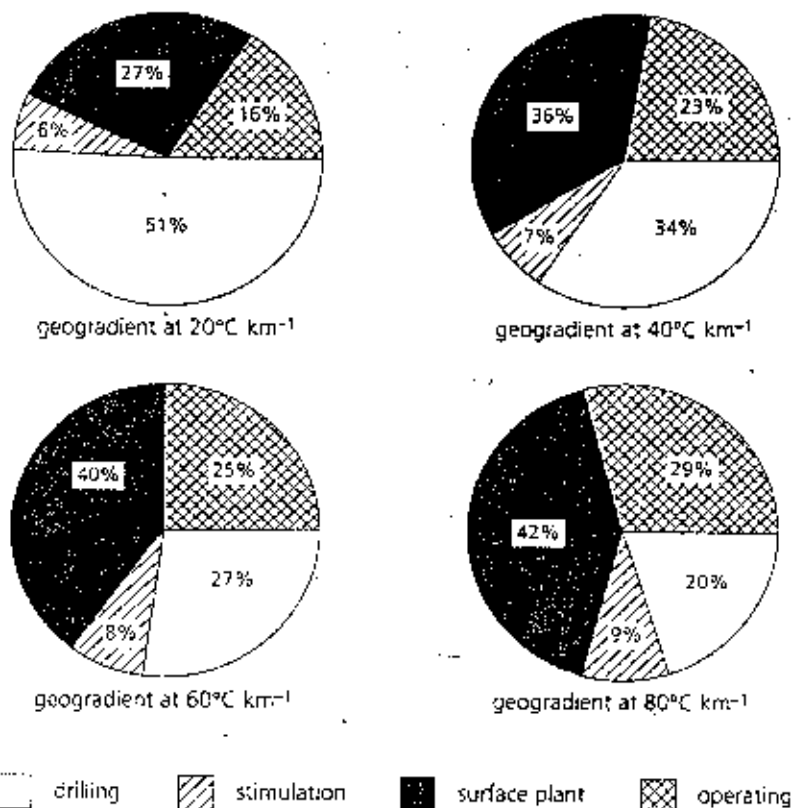


Рисунок 10

Распределение компонент стоимости оптимизационной модели для линейной технологии бурения

эффективного размера и расположения трещин) и условий его эксплуатации (потока жидкости, скачка давления), минимизирующих себестоимость электроэнергии. Было учтено влияние ключевого уменьшения мощности резервуара, потерь тепла в скважине, и паразитных потерь из-за рециркуляции жидкости. Было проведено параметрическое исследование зависимости себестоимости электроэнергии от качества ресурса (обычно выражаемого через средний геотермальный градиент) и важных факторов стоимости (таких, как зависимость стоимости бурения отдельной скважины от глубины). Однако, эта статья не предназначена для определения минимальной стоимости электроэнергии в методе СГС.

Условия основного варианта моделирования были выбраны несколько консервативно на основании современной технологии и стоимости разработки коммерческих гидротермальных ресурсов. Ключевое предположение состоит в том, что уровни производительности ресурсов добычи тепла (например, поток жидкости и импеданс) могут на практике соответствовать существующим гидротермальным системам. Современные результаты полевых испытаний прототипов систем добычи тепла далеки от этой цели. На основании имеющегося прогресса и ожидаемых перспектив, мы настоятельно рекомендуем продолжать полевые испытания концепций добычи тепла для достижения уровней производительности резервуаров, требуемых для коммерциализации. Например, результаты последних испытаний системы СГС высокого качества в Фенгтон Хилле позволяют предположить, что была создана система достаточно большого резервуара с допустимыми потерями воды; этой системе не хватает только соответствующих гидравлических связей для полного использования возможности добычи тепла²⁷.

Для областей среднего и высокого качества (более 50 °C/км) коммерчески конкурентоспособная добыча тепла потребует несколько более высоких уровней производительности резервуара и/или более низких стоимостей бурения, чем достигнутые

до сих пор. Добыча тепла в областях низкого качества не будет конкурентоспособна до тех пор, пока стоимость бурения не достигнет линейной зависимости от глубины. Это потребует революционного продвижения в технологии бурения. Мы надеемся, что предлагаемая национальная программа продвинутого бурения и экскавации предоставит такую технологию.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы весьма признательны геотермальному отделению Министерства энергетики, оказавшему частичную поддержку этой работе. Мы получили ценные предположения и поддержку от Дж.Е. Мока, А. Елачича, Дж. Хупера, Дж. Даниа, Э. Дрейка, А. Диаса, У. Петерса, П. Колмена, Д. Дьючена, П. Крюгера, Дж. Сасса, Дж. Олбрайта, Д. Брауна и Б.А. Робинсона. Работа была впервые представлена на 19 совещании по технике геотермальных резервуаров в Стэнфордском университете (Стэнфорд, Калифорния) 17 января 1994 года. Энн Карбоне оказала крайне необходимую помощь в подготовке рукописи к печати.

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. J.W. Tester, D.W. Brown and R.M. Potter, "Hot Dry Rock Geothermal Energy - A New Energy Agenda for the 21st Century", Los Alamos National Laboratory report LA-11514-MS, 1989.
2. M.J. Grubb, "The Cinderella Options - A Study of Modernized Renewable Energy Technologies - Part 1-A Technical Assessment," "Energy Policy", pp. 525-542, July/August, 1990.
3. A.S. Batchelor, "Hot Dry Rock Geothermal Exploitation in the United Kingdom", Modern Geology, v. 9, pp. 1 - 41, 1984.
4. A.S. Batchelor, "Hot Dry Rock Reservoir Stimulation in the UK - An Extended Summary and An Overview of Hot Dry Rock Technology", present-

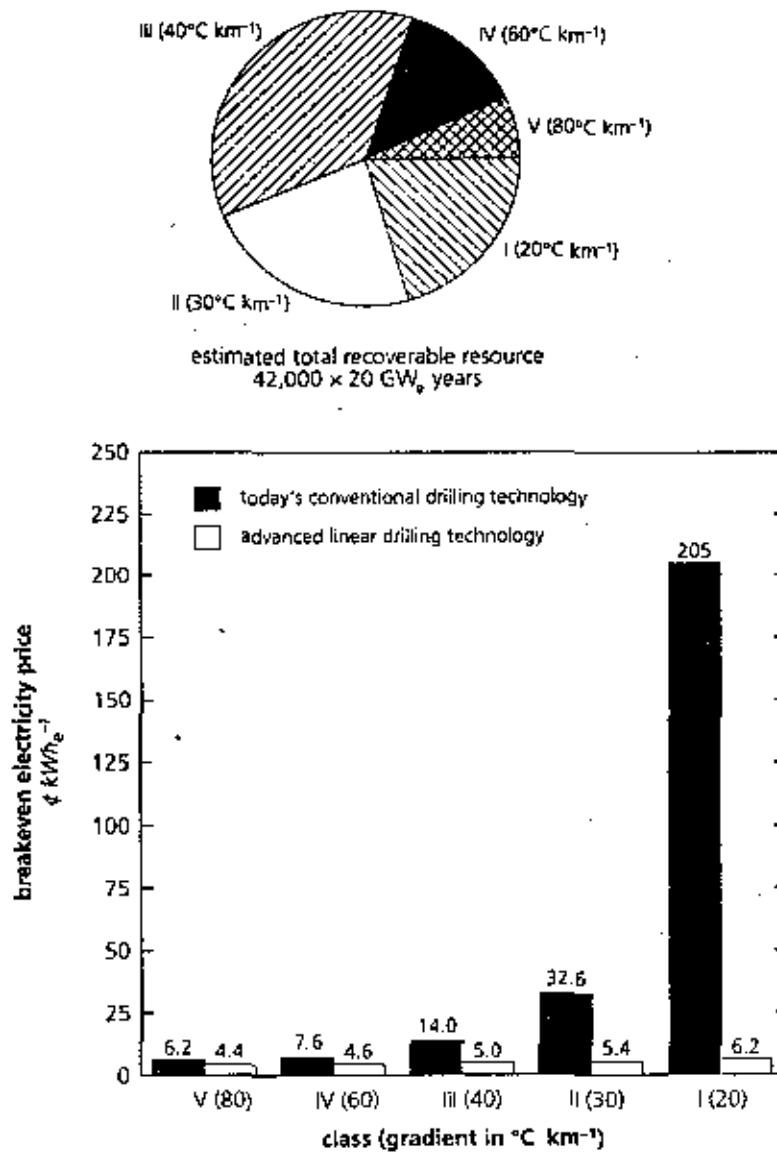


Рисунок 11

Ресурсы добычи тепла в США. Показаны стоимости для текущей и перспективной технологий бурения.

ted at 4th Intern. Conf. on Energy Options, The State of Alternatives in the World Energy Scene, London, IEE Papers, 1984.

5. A.S. Batchelor, "Development of Hot Dry Rock Systems in the UK", IEE Proc. A, v. 134(5), pp. 371 - 380, 1987.
6. D.W. Brown, R.M. Potter, and C.W. Myers, "Hot Dry Rock Geothermal Energy - An Emerging Energy Resource with Large Worldwide Potential," in "Energy and the Environment in the 21st Century, eds. J.W. Tester, D.O. Wood, and N.A. Ferrari, Cambridge, MA:MIT Press, pp. 931 - 942; 1991.
7. H.C.H. Armstead, J.W. Tester, "Heat Mining", London, E.F. Spon, 1987.
8. J.W. Tester and H.J. Herzog, "Economic Predictions for Heat Mining: A Review and Analysis of Hot Dry Rock (HDR) Geothermal Energy Techno-

logy", Massachusetts Institute of Technology Energy Laboratory report MIT-EL-90-001, 1990.

9. J.W. Tester and H.J. Herzog, "The Economics of Heat Mining: An Analysis of Design Options and Performance Requirements of Hot Dry Rock (HDR) Geothermal Power Systems," Energy Systems and Policy, v. 15, pp. 33-63, 1991.
10. Bechtel National Corporation, "Hot Dry Rock Venture Risks Investigation", Final report for the U.S. Department of Energy under contract DE-AC03-86SF16385, San Francisco, CA, 1988.
11. R.G. Cummings and G.E. Morris, "Economic Modeling of Electricity Production from Hot Dry Rock Geothermal Reservoirs: Methodology and Analysis", Electric Power Research Institute report EPRJ EA-630, Palo Alto, CA, 1979.
12. H.D. Murphy, R. Drake, J.W. Tester and G.A. Zyzolowski, "Economics of a 75-MW Hot Dry Rock