

УДК 550.362

Ю. М. ПАРИЯСКИИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ И МИРОВОЙ ОПЫТ
ОСВОЕНИЯ ПЕТРОГЕОТЕРМАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ

Анализ состояния научно-технической разработки проблемы освоения петрогеотермальных ресурсов показывает наличие благоприятных предпосылок для ее практического решения. Приведенные зависимости позволяют определить показатели термодинамической и экономической эффективности извлечения и использования тепла горных пород, а также продолжительность эффективной эксплуатации петротермальных систем.

Использование геотермальной энергии для практических целей известно с древнейших времен. Однако в современной энергетике она занимает весьма скромное место—суммарная мощность геотермальных электростанций во всем мире составляет всего немногим более 1 млн. кВт. Одной из причин такого положения является использование лишь наиболее доступных, но весьма ограниченных по распространению источников геотермальной энергии—природного пара, паро-водяных смесей и термальных вод.

Опыт эксплуатации паро- и гидротермальных систем, а также научные исследования в области геотермальной технологии, широко развернувшиеся в последние годы в связи с поисками альтернативных источников энергии, показывают, что перспективы использования геотермальной энергии существенно расширяются с вовлечением в эксплуатацию не только природных теплоносителей, но и запасов тепла вмещающих их горных пород. Помимо значительного увеличения энергетического потенциала эксплуатируемых геотермальных систем, это открывает путь к освоению энергетических ресурсов таких районов, в которых термальные воды вообще отсутствуют или их эксплуатация нецелесообразна. К таким районам относятся, в частности, значительная часть территории Армянской ССР и, особенно, центральная зона нагорья, где имеются интенсивные проявления четвертичного вулканизма, свидетельствующие о напряженном геотермальном режиме недр, но не обнаружены промышленные запасы термальных вод. Конечно, освоение энергетического потенциала твердой фазы горных пород (петрогеотермальных ресурсов) требует применения специальной технологии извлечения глубинного тепла Земли. Главной отличительной особенностью этой технологии является осуществление пезотермического процесса взаимодействия твердой фазы горных пород в пределах некоторого участка недр с окружающей средой на земной поверхности. В

качестве инструмента внешнего воздействия, осуществляющего перераспределение и перенос энергии, при этом используются рабочие агенты в виде техногенного теплоносителя (вода поверхностных водоемов или верхних водоносных горизонтов) или отработанного пластового флюида, имеющие более низкую температуру, чем начальная температура пород на рабочем горизонте эксплуатируемой геотермальной системы. В результате теплообмена с горными породами температура рабочего агента при его фильтрации в порах или трещинах пород повышается, а температура последних в пределах некоторого участка недр понижается, что может служить показателем для определения границ эксплуатируемой геотермальной системы. Понижение температуры пород, строго говоря, обратимо, поскольку под действием естественного теплового потока температура пород со временем вернется к своему первоначальному уровню. Однако, как показывают расчеты, время восстановления естественного геотермического режима недр составляет несколько десятков и даже сотен тысяч лет, поэтому петротермальные ресурсы следует рассматривать как практически невозобновляемые.

В технологическом смысле геотермальный теплоэнергетический комплекс включает в себя три основных узла: 1) систему извлечения геотермальной энергии, то есть совокупность природных и технических средств, обеспечивающих извлечение и перенос энергии из недр на земную поверхность; 2) систему доставки рабочего агента и транспортирования извлекаемого теплоносителя к потребителю; 3) энергопотребляющий комплекс. Структура этих узлов зависит от конкретных физико-геологических, технологических и экономических условий эксплуатации той или иной геотермальной системы. Так, в зависимости от гидрогеологических особенностей района освоение его петротермальных ресурсов возможно в двух основных направлениях:

- а) на основе эксплуатации систем с естественными коллекторами в виде пористых пластов или трещинных зон;
- б) на основе эксплуатации систем с искусственно созданными коллекторами в первоначально слабопроницаемом или непроницаемом породном массиве.

При этом основными критериями, определяющими возможность эксплуатации геотермальных ресурсов в данном районе, становятся не количественные и качественные характеристики пластовых флюидов в недрах, а показатели термодинамической и экономической эффективности той или иной технологии извлечения глубинного тепла. Показателем термодинамической эффективности геотермального комплекса может служить отношение

$$\psi = \frac{E_{\text{пол}}}{E_{\text{п}}}, \quad (1)$$

где $E_{\text{пол}}$ — полезная превратимая энергия (эксергия), полученная в энергопотребляющем комплексе (производимая эксергия);

$E_{\text{н}}$ — затраты эксергии в процессах эксплуатации геотермального комплекса (потребляемая эксергия).

Соотношение (1) определяет способность геотермальной системы служить источником энергии и может быть использовано для характеристики ее энергетических ресурсов. Экономическая эффективность геотермальных ресурсов характеризуется отношением

$$\varphi = \frac{C_{\text{э}}}{C_{\text{гг}}}, \quad (2)$$

где $C_{\text{гг}}$ — удельные приведенные затраты на единицу полученной в энергопотребляющем комплексе эксергии в случае эксплуатации геотермальной системы;

$C_{\text{э}}$ — то же при использовании иного источника энергии, принятого за базовый для условий данного района.

Соотношение (2) определяет экономическую целесообразность эксплуатации геотермальной системы и может быть использовано для подсчета промышленных запасов энергии. Вместе с тем, оно может служить основой оптимизации технологических и конструктивных параметров геотермального комплекса в целом и отдельных его элементов. Безусловно, реализация этого нового подхода к освоению геотермальных ресурсов требует серьезных научных разработок и создания надежной технической базы. Анализируя результаты научных исследований, проведенных в этом направлении в СССР и за рубежом, и учитывая достижения нефте- и газодобывающей промышленности, технологически наиболее близкой к извлечению геотермальной энергии, можно утверждать, что необходимые научно-технические предпосылки для перехода к новой технологии извлечения глубинного тепла, в основном, уже созданы. В первую очередь это относится к разработке достаточно надежных методов расчета процессов теплопереноса в петротермальных системах как с естественными, так и с искусственными коллекторами. Для наиболее простых случаев теплопереноса в пористых пластах в условиях одномерной вынужденной фильтрации теплоносителя теоретически и экспериментально доказана [1, 3, 5] применимость решения Ловерье [6], которое для безразмерной температуры воды на выходе из коллектора имеет вид:

$$\theta = \operatorname{erfc} \frac{\bar{x}}{2 \sqrt{\tau^* - \bar{x}}}, \quad (3)$$

где

$$\theta = \frac{T_0 - t}{T_0 - t_{\min}}; \quad \bar{x} = \frac{\bar{i}^2 x^2}{4\bar{a} \Omega_p}$$

для радиальной фильтрации;

$$\bar{x} = \frac{\bar{i}^2 x}{4\bar{a} \Omega_1}$$

для плоско-параллельной фильтрации;

$$\tau^* = \frac{4\bar{a}^2 a_0 \tau}{ab^2}; \quad x = \frac{2L}{b}; \quad \Omega_1 = \frac{W\rho_2 C_2}{4\pi b l_0};$$

$$\Omega_n = \frac{W\rho_2 C_2}{8l_0 B}; \quad \bar{l} = \frac{l_1}{l_0}; \quad \bar{a} = \frac{a_1}{a_0}.$$

Здесь T_0 — начальная температура пласта;
 l — температура воды на выходе из коллектора;
 l_{\min} — минимальная температура воды на входе в коллектор;
 L — расстояние между контурами питания и отбора;
 b — мощность пласта;
 τ — действительное время от начала нагнетания;
 W — объемный расход жидкости;
 B — ширина линейного потока (длина нагнетательной галереи);
 $\rho_2 C_2$ — объемная теплоемкость воды;
 l_1, a_1 — теплопроводность и температуропроводность вмещающих пород;
 l_0, a_0 — теплопроводность и температуропроводность пласта;
 $\gamma(\tau^* - \bar{x})$ — единичная функция Хевисайда.

$$\gamma(\tau^* - \bar{x}) = \begin{cases} 1, & \tau^* > \bar{x} \\ 0, & \tau^* < \bar{x} \end{cases} \quad (4)$$

Зависимость (3) позволяет определить продолжительность периода эксплуатации петротермальной системы, в течение которого температура извлекаемого теплоносителя будет соответствовать кондиционным требованиям потребителя, находясь в пределах $0 \leq \theta \leq 0.2$. Как видно из выражения (4)

$$\theta = 0 \quad \text{при} \quad \tau^* < \bar{x}, \quad (5)$$

Значению $\theta = 0.2$ соответствует значение аргумента в функции (3), равное 0,91. С учетом этого, решая (3) относительно τ^* , получим

$$\tau^* = \bar{x} + 0,3\bar{x}^2, \quad (6)$$

Следовательно,

$$0 \leq \theta \leq 0,2 \quad \text{при} \quad \bar{x} \leq \tau^* \leq \bar{x}(1 + 0,3\bar{x}). \quad (7)$$

В качестве иллюстрации в таблице 1 приведены результаты расчетов по формуле (7) продолжительности эксплуатации петротермальной системы при плоско-параллельной фильтрации для различных значений мощности пласта и расходов теплоносителя. Исходные данные для расчетов приняты следующими: $L = 1000$ м; $B = 1000$ м; $\lambda_1 = 1,49$ Вт/м·К; $\rho_1 C_1 = 2,85 \cdot 10^6$ Дж/м³·К; $\rho_2 C_2 = 4,19 \cdot 10^5$ Дж/м³·К; $\lambda_2 = 1,45$ Вт/м·К; $C_0 = 2,7 \cdot 10^6$ Дж/м³·К.

Из таблицы 1 видно, что при соответствующем выборе расхода теплоносителя для той или иной мощности коллектора можно получить продолжительность эксплуатации системы более 10 лет, необходимую для обеспечения экономической эффективности капитальных вложений.

Реальные условия эксплуатации петротермальных систем с пористыми коллекторами могут усложняться фильтрационной неоднородностью коллекторов, неоднородностью фильтрационных потоков, неизометричностью фильтрации, взаимодействием вынужденной и свободной конвекции рабочего агента. Для подобных условий на основе конечно—разностных методов разработаны математические модели процессов тепломассопереноса, реализуемые на ЭЦВМ [2]. Они позволяют получить критериальные зависимости, необходимые для инженерных расчетов петротермальных систем с учетом действия усложняющих процессы тепломассопереноса факторов.

Таблица 1

Продолжительность эксплуатации петротермальной системы площадью 1 кв.км (годы) с коллектором в виде пористого пласта

Мощность пласта, м	Значения η	Расход теплоносителя, м ³ /час			
		100	200	300	400
20	0	14,7	7,4	4,9	3,6
	0,2	26,5	10,4	6,2	4,3
100	0	73,6	36,8	24,4	18,4
	0,2	84,6	39,7	25,7	19,1
200	0	147,0	73,6	49,0	36,8
	0,2	158,7	76,5	50,3	37,5

Большой научный и практический интерес представляет решение задач тепломассопереноса в петротермальных системах с искусственно созданными коллекторами, что открывает путь к освоению геотермальных ресурсов практически непроницаемых пород.

Одним из наиболее эффективных способов создания искусственных коллекторов представляется применение методов гидроразрыва породного массива, то есть разрушение его сплошности путем закачки в горные породы жидкости под высоким давлением с образованием щелеподобных полостей (трещин), имеющих достаточно большую протяженность.

В условиях эксплуатации петротермальных систем на глубинах в 3—5 тыс. метров наиболее вероятна вертикальная ориентация трещин гидроразрыва под влиянием неоднородного напряженного состояния пород. При создании в трещине движения жидкости между забоями вскрывающих ее скважин будет происходить нагревание рабочего агента вследствие теплообмена со стенками образованной в породном массиве полости. В упрощенном виде физическую модель процесса тепломассопереноса в подобного рода системе, показывающую принципиаль-

ную возможность ее эффективного использования для извлечения геотермальной энергии из непроницаемого массива горных пород, можно представить плоской вертикальной трещиной высотой L , шириной B и раскрытием b , в которой имеет место восходящий плоско-параллельный поток жидкости, имеющей у нижнего основания трещины входную температуру t_0 . Начальная температура пород, вмещающих трещину, равна $T_0 > t_0$. Эта модель полностью соответствует схеме Ловьерье, и для определения безразмерной температуры жидкости на выходе из трещины можно воспользоваться решением (3). Путем подстановки в него значений безразмерных комплексов \bar{x} и \bar{z}^* и некоторых преобразований приведем его к виду:

$$\theta = \text{erfc} \left(\frac{1}{\sqrt{\bar{z}}} \right), \quad (8)$$

где

$$\bar{z} = \left(\frac{W_{\rho_2 c_2}}{BL} \right)^2 \frac{BLb \frac{C_0}{\rho_2 c_2}}{\lambda_1 \rho_1 c_1}.$$

Ввиду малой раскрытости трещины ($d \approx 1-10$ мм) можно написать

$$\bar{z} = \left(\frac{W_{\rho_2 c_2}}{BL} \right)^2 \frac{\tau}{\lambda_1 \rho_1 c_1}. \quad (9)$$

Анализируя зависимость (8) от величины аргумента, заметим, что значениям $0,01 < \theta < 0,2$ соответствуют значения \bar{z} , находящиеся в пределах

$$0,3 < \bar{z} < 1,20. \quad (10)$$

Таблица 2

Продолжительность эксплуатации петротермальной системы с искусственным коллектором в виде одиночной трещины (годы)

Размеры трещины $BL, \text{ м}^2$	Значения θ	Расход теплоносителя, $\text{м}^3/\text{час}$		
		30	50	100
200 × 200	0,01	0,05	0,018	0,004
	0,2	0,20	0,072	0,016
500 × 500	0,01	2,07	0,75	0,18
	0,2	8,28	3,00	0,72
1000 × 1000	0,01	33,1	11,86	2,97
	0,2	132,4	47,44	11,88

Как видно из таблицы 2, продолжительность эксплуатации петротермальной системы с одиночной трещиной гидроразрыва, рассчитанная по формулам (9) и (10), сильно зависит от ее размеров и расхода теплоносителя. Так же, как и в случае с пористым пластом, путем соот-

ветствующего выбора расхода теплоносителя можно получить достаточно большую продолжительность эксплуатации для трещин заданных размеров. Увеличивая число одновременно эксплуатируемых трещин, можно изменить тепловую мощность системы в нужных пределах.

Реальные условия эксплуатации петротермальной системы с коллектором в виде трещин гидроразрыва будут, безусловно, отличаться от приведенной здесь идеализированной схемы более сложным характером фильтрационного поля, проявлением свободной конвекции рабочего агента, термических деформаций стенок трещины и т. п. Все это требует применения конечно-разностных методов для решения задач теплопереноса, что находит свое отражение в разработке математических моделей подобного рода систем, осуществляемой в СССР и за рубежом.

Важной предпосылкой освоения петротермальных ресурсов является современный уровень развития нефтяной и газовой промышленности, технические средства которой могут обеспечить выполнение основных технологических операций по созданию и эксплуатации систем извлечения тепла горных пород. Отечественная промышленность серийно выпускает буровые установки, способные проходить скважины до 6000 м, специализированные насосные агрегаты для гидроразрыва с давлением до 700 кгс/см^2 , блочные насосные станции с рабочим давлением до 200 кгс/см^2 для закачки воды в подземные пласты и другое оборудование. Большой интерес представляет также практический опыт нефтяной промышленности по применению методов заводнения при разработке нефтяных месторождений, который может быть использован при эксплуатации петротермальных систем с пористыми коллекторами. Обратная закачка (реинжекция) отработанного теплоносителя, как показывает опыт эксплуатации ряда месторождений термальных вод за рубежом, становится все более необходимым мероприятием. Она осуществляется с целью предотвращения оседания земной поверхности и вредных выбросов в окружающую среду, поддержания пластового давления и продуктивности скважин в Н. Зеландии, Мексике, Японии, Италии и других странах. В случаях, когда реинжекция проводится при наличии гидродинамической связи между нагнетательными и эксплуатационными скважинами, она создает в недрах условия, характерные для петротермальных систем.

Наиболее типичным примером эксплуатации естественного коллектора, как петротермальной системы, является Парижский артезианский бассейн термальных вод. Здесь создано 5 циркуляционных систем, состоящих из нагнетательных и эксплуатационных скважин глубиной 1700—2800 м, которые обеспечивают отопление 20 тыс. квартир. Начальная температура извлекаемого теплоносителя составляет $70\text{—}120^\circ\text{C}$. Отработанная вода снова нагнетается в коллектор, обеспечивая поддержание пластового давления и извлечение тепла вмещающих пород. Большой интерес представляет проведенный в США эксперимент по созданию петротермальной системы с искусственным коллектором, осу-

ществленный по проекту Лос-Аламосской научно-исследовательской лаборатории в штате Нью-Мексико в 1975—1977 г. г. [4]. В скважине глубиной около 3000 м, пробуренной в практически непроницаемом гранодиорите, с помощью гидроразрыва была образована вертикальная трещина радиусом 140 м с первоначальной шириной раскрытия 0,2 м. Давление нагнетания при этом составило 122 кгс/см². Затем была пробурена вторая скважина, которая должна была вскрыть образованную в массиве трещину гидроразрыва. После нескольких неудачных попыток обеспечить гидравлическую сбойку скважины с трещиной, в ней был произведен второй гидроразрыв, и вновь образованная трещина была вскрыта дополнительным стволом, пройденным с помощью направленного бурения из основного ствола первой скважины. В сентябре 1977 года была осуществлена первая циркуляция рабочего агента с расходом 33 м³/час при давлении нагнетания 70—90 кгс/см². Температура паро-водяной смеси на устье эксплуатационной скважины составила 132°С при начальной температуре пород на глубине образованной трещины 185°С. Пробная циркуляция воды осуществлялась в общей сложности в течение 6200 час. Выходная температура при этом поднялась до 160°С, обеспечив тепловую мощность системы в 5 МВт. Получены данные, свидетельствующие об образовании дополнительных трещин вследствие термических деформаций массива в зоне охлаждения, что может значительно увеличить продолжительность эффективной эксплуатации системы. В дальнейшем предполагается углубить скважины до 3800 м, провести новый гидроразрыв с образованием трещины радиусом не менее 450 м, что позволит обеспечить сооружение опытно-промышленной электростанции мощностью 10 МВт.

Приведенные здесь примеры характеризуют лишь начальный этап освоения петротермальных ресурсов. Предстоит решить еще немало сложных проблем, связанных с эксплуатацией как естественных, так и искусственных геотермальных коллекторов. Однако существуют достаточно благоприятные предпосылки к тому, чтобы приступить к их практическому решению и обеспечить эффективное использование петротермальных ресурсов в народном хозяйстве.

Ленинградский горный институт
им. Г. В. Плеханова

Поступила 20.III.1980.

ՅՈՒ. Մ. ՊԱՐԻՅՈՒԻ

ՊԵՏՐՈՒԳԵՆՈՒԹԵՐՄԱԼ ՊԱՇՏԱՐՆԵՐԻ ՅՈՒՐԱՅՄԱՆ ԿԻՏԱՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ
ՆԱԽԱԴՐՅԱԸՆԵՐԸ ԵՎ ՀԱՄԱՇԽԱՐՀԱՅԻՆ ՓՈՐՁԸ

Ս. մ փ ո փ ո լ մ

Պետրոգենոթերմալ պաշարների յուրացման փորձի գիտատեխնիկական մշակման վիճակի վերլուծությունը ցույց է տալիս նրա գործնական լուծման բարենպաստ նախապայմանների առկայությունը:

Հողվածում բերված կախվածությունները թույլ են տալիս որոշելու խոր-
քային լեռնային ապարների կուտակած ջերմության դուրս հանման և օգտա-
գործման թերմոդինամիկական և տնտեսական շահավետությունը, ինչպես
և ալ պետրոթերմալ համակարգերի էֆեկտիվ շահագործման տեխանությունը:

Ju. M. PARIYSKY

THE SCIENTIFIC-TECHNICAL PRECONDITIONS AND THE WORLD EXPERIENCE ASSIMILATION OF PETROGEOOTHERMAL RESOURCES

Abstract

The analysis of petrogeothermal resources assimilation problem's scientific-technical elaboration state shows the availability of favourable preconditions for its practical solution. The adduced relations allow to determine the thermodynamical and economical effectiveness indexes of extracting and utilizing the rocks heat as well as the duration of petrothermal systems effective exploitation.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Андонин Н. А. О различных методах расчета температурного поля пласта при тепловой инъекции. Изд. вузов, «Нефть и газ», № 8, 1964.
2. Парийский Ю. М., Артемьева Е. Л. Математическое моделирование процессов теплопереноса в неоднородном геотермальном коллекторе. Межвузовский сборник. Физические процессы горного производства. ЛГИ, 1979.
3. Пудовкин М. А., Волков Н. К. Краевые задачи математической теории теплопроводности в приложении к расчетам температурных полей в нефтяных пластах при заводнении. Изд. КГУ, Казань, 1978.
4. Смит М. К., Макферланд Р. Д. Энергия из «сухих» геотермальных бассейнов. В сб. «Процессы теплообмена в искусственных циркуляционных системах извлечения тепла Земли». Изд. ЛГИ, 1978.
5. Ширчков А. В., Журавленко В. Я. Моделирование теплообмена между горным массивом и глубинным пронизываемым пластом, через который движется жидкость. В сб. Конвективный теплообмен. «Наукова думка», Киев, 1969.
6. Louwerier H. A. The transport of heat in oil layer caused by the injection of hot fluid. Appl. Scient. Res. Section A, vol. 5, 2, 3, 1955.