Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
т. XCI, 1982 г.

УДК 556.38

ПРОБЛЕМЫ ОХРАНЫ И РАЦИОНАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Ю.М.ПАРИЙСКИЙ, Е.Л.АРТЕМЬЕВА,
З.Б.ДЕКУСАР, В.А.БЕРЕЖНОЙ

Существующие методы эксплуатации геотермальных месторождений основаны на применении буровых скважин для вскрытия термоводоносных зон и извлечения природных теплоносителей в условиях естественного фонтанирования. Происходящий при этом в недрах геотермальной системы термодинамический процесс характеризуется понижением давления жидкой фазы, что сопровождается ее расширением и приводит к вытеснению некоторого количества жидкости, выносимого на поверхность за счет работы, совершаемой самой системой. Если учесть, что потенциальные энергетические ресурсы геотермальной системы при ее взаимодействии с внешней средой на земной поверхности включают в себя тепловые ресурсы как жидкой, так и твердой фаз [5], то можно констатировать весьма низкую степень использования энергетического потенциала геотермальных месторождений при существующих методах их эксплуатации. Расчеты показывают, что количество тепла, получаемого на поверхности, составляет при эксплуатации термальных вод менее I %, а природного пара менее 6 % от общей тепловой энергии геотермальной системы с учетом ресурсов тепла твердой фазы горных пород. Другим серьезным недостатком существующих методов эксплуатации геотермальных месторождений является сброс отработанных теплоносителей в поверхностные водотоки после использования их теплоэнергетического потенциала, что в ряде случаев может приводить к тепловому и химическому загрязнению окружающей среды.

В последние годы в СССР и за рубежом предпринимаются усилия для разработки более совершенных методов эксплуатации, обеспечивающих комплексное решение проблем охраны и рационального использования водных и энергетических ресурсов геотермальных месторождений.

Анализ результатов выполненных в этой области научно-исследовательских работ [I, 2] позволяет выделить в качестве главной отличительной особенности новой технологии эксплуатации геотермальных месторождений применение возвратной закачки отработанного теплоносителя в продуктивную

зону геотермальной системы. С учетом минерализации природных теплоносителей, которая в ряде случаев может затруднить применение возвратной закачки, эта технология должна сочетаться с применением систем извлечения полезных компонентов из отработанных геотермальных теплоносителей, что может дать дополнительный экономический эффект. Помимо устранения или уменьшения вредных выбросов в поверхностные водотоки применение возвратной закачки отработанного теплоносителя, начальная температура которого существенно ниже естественной температуры продуктивной зоны геотермальной системы, позволяет значительно полнее использовать ее энергетические ресурсы за счет вовлечения массы водовмещающих пород в процесс теплообмена с фильтрующимся теплоносителем.

Теоретические и экспериментальные исследования процессов тепломассопереноса в геотермальных системах при нестационарном температурном режиме, обеспечивающем отбор тепла от пород, доказали возможность их достаточно длительной эксплуатации при ограниченном отклонении температуры теплоносителя на выходе из системы от начальной температуры продуктивной зоны и значительной интенсификации темпов отбора жидкости [3, 4], что обеспечивает возможность увеличения эксплуатационных запасов месторождения.

Технологические схемы систем эксплуатации с применением возвратной закачки отработанного теплоносителя могут быть весьма разнообразны [2]. Их выбор должен обоснованно вытекать из анализа физико-геологических и технико-экономических условий эксплуатации месторождения, что требует проведения комплекса специальных исследований, методика и содержание которых в общем аналогичны геологоразведочным работам на подземные и в частности термальные воды. Специфика этого комплекса заключается в более детальном изучении роли технологических факторов в формировании эксплуатационных запасов месторождения, что требует проведения специальных опытно-технологических исследований на стадии предварительной и детальной разведки. Особенно интересные перспективы открывает применение возвратной закачки отработанного теплоносителя при эксплуатации месторождений, приуроченных к гидротермальным системам в районах современного вулканизма, например на Камчатке. Помимо решения проблемы охраны поверхностных водотоков от загрязнения, которая на Камчатке отличается особой остротой, это позволяет реализовать цикличные режимы эксплуатации, обеспечивающие воспроизводимость геотермальных ресурсов в условиях неизотермического процесса.

Отличительной особенностью гидротермальных систем районов современного вулканизма является преобладающая роль конвективного переноса тепла восходящими потоками подземных флюидов, которые обеспечивают прогрев массы водовмещающих пород. Это и создает возможность весьма быстрого восстановления температурного поля, нарушенного в период эксплуатации с применением возвратной закачки отработанного теплоносителя.

В качестве иллюстрации одного из возможных путей создания такого рода систем эксплуатации приведем результаты математического моделирования процессов теплопереноса на участке открытого с четырех сторон пористого пласта с эффективной мощностью b = 300 м и проницаемостью k =

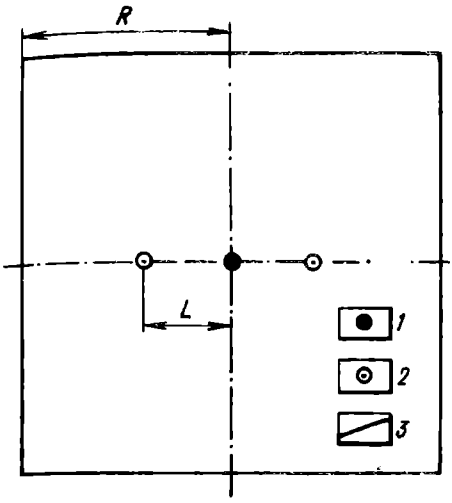


Рис.1. Область фильтрации при математическом моделировании
1 и 2 – нагнетательная и эксплуатационная скважины; 3 – контур области фильтрации

= $0,51 \cdot 10^{-12}$ м^2, эксплуатируемого с помощью скважин, расположенных по так называемой трехточечной схеме (рис.1).

Пласт находится в условиях теплового взаимодействия с вмещающими водонепроницаемыми породами, что учитывается при описании температурного поля пласта по неполной схеме сосредоточенной емкости, начальная температура пласта равна T_0. В центральную скважину может нагнетаться отработанный теплоноситель (вода) с начальной температурой $T_н < T_0$. Эксплуатационные скважины находятся на расстоянии L = 100 м от нагнетательной. Расстояние от центра пласта до его границ R = = 600 м. На внешнем контуре задается постоянное давление P_0 и температура T_0, а на эксплуатационных скважинах – что соответствует установившемуся режиму фильтрации – забойное давление $P_1 < P_0$. Принятая схема может рассматриваться как модель пористого блока, ограниченного тектоническими нарушениями, через которые происходит питание пласта восходящим потоком, что представляет типичную для многих месторождений Камчатки ситуацию.

Краевые задачи фильтрации и теплообмена аппроксимировались конечно-разностными схемами, которые решались с применением метода переменных направлений на ЭВМ БЭСМ-6.

Как показали результаты численного моделирования, дебит эксплуатационных скважин при нагнетании рабочего агента в центральную скважину растет вместе с расходом нагнетания. При этом линейная зависимость между дебитом эксплуатационной скважины и расходом нагнетания (рис.2) для принятых условий моделирования имеет вид

$$Q_{эн} = Q_{эф} + 0,2 Q_н ,$$

где $Q_{эн}$ и $Q_{эф}$ – дебит эксплуатационной скважины соответственно при нагнетании рабочего агента в пласт и при естественном фонтанировании; $Q_н$ – расход нагнетания рабочего агента.

При расходе нагнетания, превышающем более чем в 3 раза дебит эксплуатационной скважины

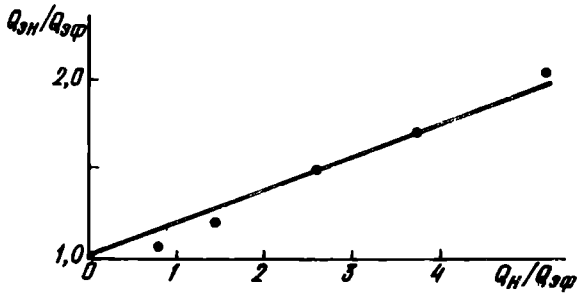


Рис.2. Зависимость $Q_{эн}/Q_{эф}$ от $Q_н/Q_{эф}$

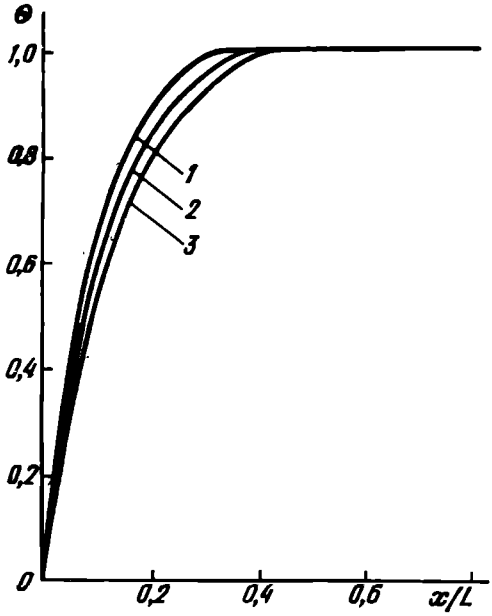


Рис.3. Зависимость Θ от x/L через 10 суток после начала нагнетания при $a_н$, равном $7 \cdot 10^{-5}$ м^2/с (1), $10 \cdot 10^{-5}$ м^2/с (2) и $14 \cdot 10^{-5}$ м^2/с (3)
x– расстояние от нагнетательной скважины

делировании продолжительности закачки (IO ной температуре пласта. Продолжительность

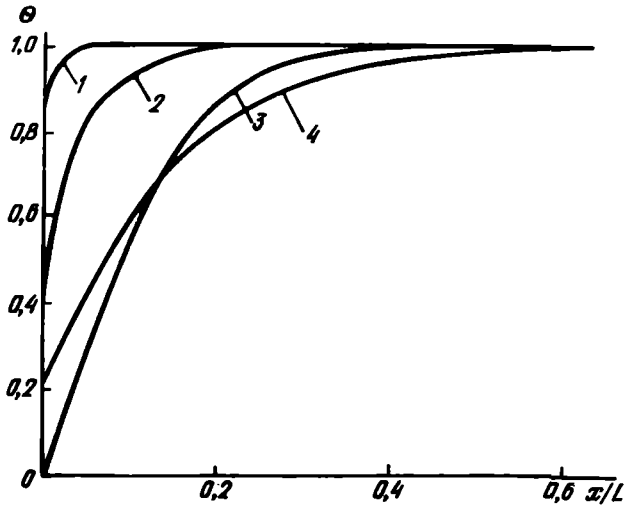


Рис.4. Изменение безразмерной температуры Θ на различные моменты времени в период восстановления
1 и 3 – 10 суток; 2 – 180 суток; 4 – 230 суток

при естественном фонтанировании, рост продуктивности системы эксплуатации превышает увеличение объемов бурения скважин, необходимого для возвратной закачки. При увеличении объема бурения в I,5 раза дебит эксплуатационных скважин увеличивается в I,8 раза, что способствует снижению удельных затрат на единицу извлекаемой энергии даже с учетом дополнительных расходов на нагнетание рабочего агента. Весьма важно отметить, что температура пласта, характеризуемая безразмерным параметром $\Theta = T-T_н / T_0-T_н$ понижается при возвратной закачке лишь на сравнительно небольшом от нагнетательной скважины расстоянии (рис.3) и, следовательно, температура теплоносителя в эксплуатационных скважинах для принятой при мосуток) остается равной начальзакачки может быть увеличена до любых экономически обоснованных пределов при соответствующем увеличении расстояния между контурами нагнетания и отбора.

Большой интерес представляют результаты моделирования процессов восстановления температурного поля. В случае прекращения закачки и продолжения выпуска из эксплуатационных скважин (режим естественного восстановления) на значительной части пласта наблюдается дальнейшее, но весьма замедленное понижение температуры,

несмотря на приток горячей жидкости к блоку (рис.4, кривые 3 и 4). Спуст 230 суток после окончания нагнетания фронт понижения температуры продвигается более, чем на половину расстояния между нагнетательной и эксплуатационной скважинами, хотя в зоне нагнетательной скважины начинается уже повышение температуры. Очевидно, что „растекание" охлажденной зоны в период восстановления приводит к весьма незначительному понижению температуры в эксплуатационных скважинах, которое затем сменится ее повышением до первоначального уровня. Дебит скважин соответствует при этом установившемуся режиму естественного фонтанирования.

Совершенно иной характер имеет изменение температуры пласта в случае интенсифицированного режима восстановления, когда после окончания нагнетания выпуск осуществляется из всех трех скважин одновременно (рис.4, кривые I и 2). В этом случае во всем объеме охлажденной зоны происходит повышение температуры, темп которого зависит от дебита центральной скважины. Так, при удельном дебите $1{,}9 \cdot 10^{-5}$ м^2/с почти полное восстановление температурного поля наступает через 180 суток, а при дебите $7 \cdot 10^{-5}$ м^2/с, равном расходу нагнетания в период интенсивной эксплуатации, температурное поле практически полностью восстанавливается через 10 суток, что равно продолжительности периода нагнетания. Однако при этом дебиты эксплуатационных скважин закономерно понижаются в зависимости от дебита центральной скважины. Так, в первом случае дебит эксплуатационной скважины составит $2{,}2 \cdot 10^{-5}$ м^2/с, а во втором – $1{,}4 \cdot 10^{-5}$ м^2/с, что соответственно на 19 и 49 % ниже их уровней на режиме естественного фонтанирования без применения возвратной закачки. Для компенсации этого снижения дебитов жидкость из центральной скважины, имеющую некондиционную температуру, можно использовать в качестве рабочего агента, нагнетаемого в другой эксплуатируемый блок.

Результаты исследований показали, что цикличная эксплуатация геотермальных месторождений с применением возвратной закачки отработанного теплоносителя принципиально возможна и что на основе этой новой технологии можно успешно решать задачи охраны и рационального использования природных ресурсов. Окончательный выбор технологических схем и режимов эксплуатации должен быть обоснован конкретными данными, полученными в результате опытно-технологических исследований и технико-экономических расчетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дядькин Ю.Д., Парийский Ю.М. Извлечение и использование тепла Земли. Л., изд. ЛГИ, 1977.

2. Парийский Ю.М. Геотехнологические аспекты извлечения геотермальной энергии. – В кн.: Физические процессы горного производства. Межвузовский сборник, вып. 5. Л., изд. ЛГИ, 1978.

3. Парийский Ю.М., Артемьева Е.Л. Математическое моделирование процессов тепломассопереноса в неоднородном геотермальном коллекторе. – В кн.: Физические процессы горного производства. Межвузовский сборник, вып. 5. Л., изд. ЛГИ, 1978.

4. Результаты экспериментальных исследований модели подземного теплового котла в условиях полигона / Ю.М.Парийский, И.А.Богданова, А.С.Дальнов, Г.Н.Герасименко, Т.Ю.Пискачева, В.Д.Трофимов. - В кн.: Изучение и использование геотермальных ресурсов в вулканических областях. М., Наука, 1979.

5. Сугробов В.М. Геотермальные ресурсы Камчатки, классификация и прогнозная оценка. - В кн.: Изучение и использование геотермальных ресурсов в вулканических областях. М., Наука, 1979.