

## ТЕПЛОПЕРЕНОС В ГОРНОМ МАССИВЕ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЦИРКУЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ



В. В. ТАСКИН,  
аспирант



Р. И. ПАШКЕВИЧ,  
зам. директора  
по инновационной  
работе,  
канд. техн. наук

Магмагеотермальные системы рассматриваются как потенциальные объекты для разработки. В недрах таких систем существует надкритический флюид с температурой более 400 °С и давлением выше 22 МПа. Освоение их тепловых ресурсов возможно с использованием технологии геотермальных циркуляционных систем (ГЦС) [1, 2]. В технической литературе встречаются единичные расчеты режимов ГЦС в надкритических условиях, выполненные для частных случаев в узких диапазонах параметров, без обоснования таких важных геометрических параметров, как расстояние  $L$  между добычной и нагнетательной скважинами и высота расположения забоя нагнетательной скважины  $H_n$  над забоем добычной скважины.

В НИГТЦ ДВО РАН выполнено численное моделирование ГЦС типа триплет — одна нагнетательная и две добычные скважины (рис. 1). В качестве начальных

надкритических условий на забое добычных скважин приняты: температура 380 °С, давление 22,5 МПа. Дебит нагнетательной скважины варьировали в пределах 5, 10 и 15 кг/с; глубина добычных скважин — 2,7 км; величину  $H_n$  задавали 0, 250, 450, 550 м, величину  $L$  — 200, 250, 450, 500 м; температуру теплоносителя на забое нагнетательной скважины принимали равной 100 °С. Открытый интервал в скважинах — 50 м. Расчетная область размером 1,95×1×3 км включает продуктивную зону горных пород с проницаемостью  $10^{-15}$  м<sup>2</sup> и две зоны малопроницаемых пород —  $10^{-20}$  м<sup>2</sup> — верхнюю мощностью 1 км, нижнюю — 0,2 км. Начальное распределение давления — гидростатическое; на верхней границе области задава-

ли атмосферное давление 0,1 МПа и температуру 10 °С. Градиент температуры 137 °С/км, начальная температура на нижней границе области — 420 °С.

Расчеты выполнены на базе программного комплекса HYDROTHERM [3], предназначенного для моделирования многофазного потока воды и тепла в проницаемых средах в диапазоне температур 0–1200 °С и давления 0,05–1000 МПа. Математическая модель основана на уравнениях сохранения массы и энергии в проницаемых средах в предположении локального термодинамического равновесия теплоносителя и породы и реализована с помощью метода конечных разностей.

Изменение параметров теплоносителя в зависимости от  $L$  при  $H_n = 0$ . Для установления рациио-

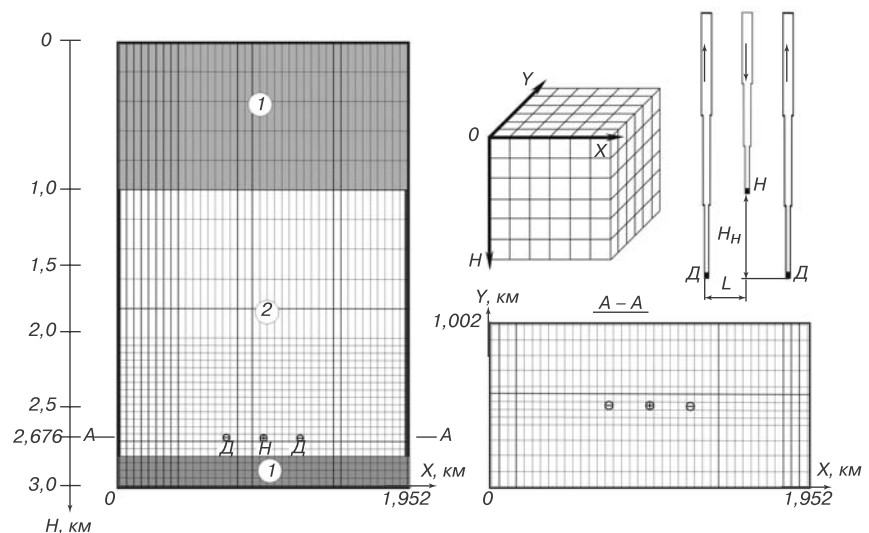
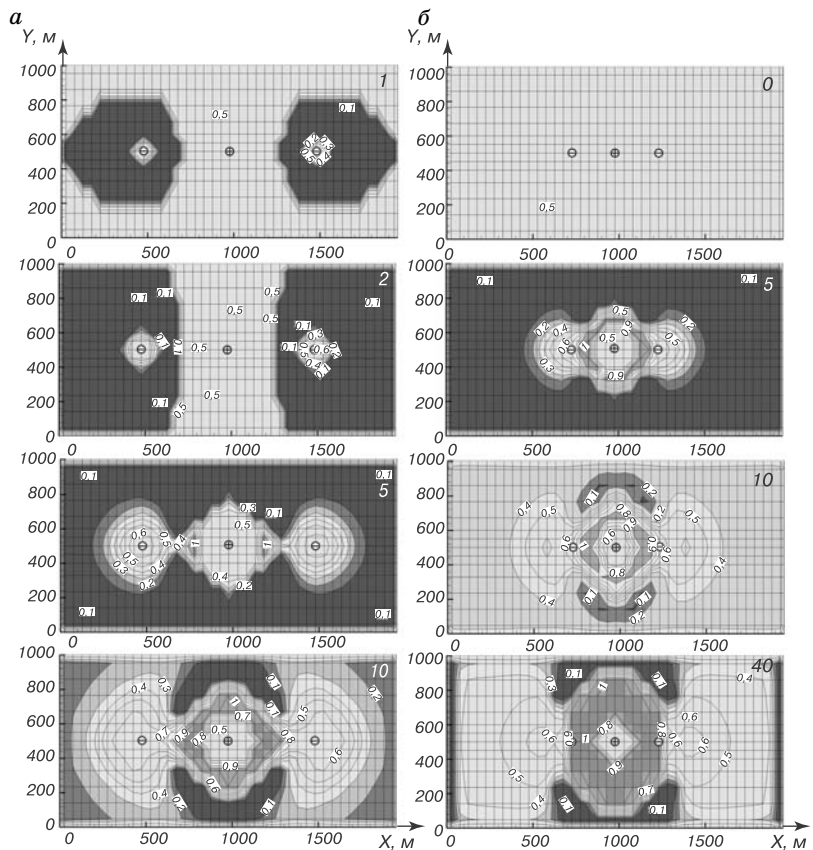


Рис. 1. Схема численного моделирования геотермальной циркуляционной системы:

1 — верхняя и нижняя зоны малопроницаемых горных пород; 2 — продуктивная зона; Д — две добычные скважины; Н — нагнетательная скважина

нальных параметров надкритической ГЦС важным является анализ изменения фазового состояния теплоносителя в ходе эксплуатации, а также исследование закономерностей этого изменения в зависимости от расположения добычных и нагнетательной скважин. При расположении скважин «в ряд» ( $H_n = 0$ ) с  $L = 500$  м через 1 год с начала эксплуатации в результате отбора теплоносителя и вызванного этим снижения давления в продуктивной зоне вблизи забоев добычных скважин формируется зона влажного пара с водонасыщенностью, увеличивающейся в направлении от границ области влажного пара к забою (рис. 2, а). В остальной части продуктивной зоны состояние теплоносителя остается надкритическим. Через 2 года с начала эксплуатации фронт конденсации распространяется на большую часть сечения продуктивной зоны. Через 5 лет практически вся площадь в горизонтальном сечении, проходящем через забои скважин, становится заполненной влажным паром, при этом водонасыщенность растет в направлении к забоям добычных скважин, а между добычными и нагнетательной скважинами формируется зона с теплоносителем в жидкой фазе. Через 10 лет влажность пара еще более возрастает, вокруг забоя нагнетательной скважины образуется кольцеобразная зона теплоносителя в жидком состоянии. При этом на забое нагнетательной скважины и вблизи нее давление теплоносителя выше критического. Зона перегретого пара формируется в области ниже и на периферии забоя добычных скважин, расширяясь в ходе эксплуатации к границам продуктивной зоны.

При уменьшении расстояния между добычными и нагнетательной скважинами до  $L = 250$  (200) м процесс фазовых переходов в продуктивной зоне развивается аналогично, однако его интенсивность и средняя водонасыщенность зоны увеличиваются (рис. 2, б). При фиксированных  $H_n$  расстояние между скважинами определяет линейный размер области возмущенного состояния продуктивной зоны, темп охлаждения горных пород и величин



**Рис. 2. Фрагменты модели в сечении А – А, характеризующие изменение объемной водонасыщенности продуктивной зоны в процессе эксплуатации ГЦС при  $H_n = 0$  и расстояниях между добычными и нагнетательной скважинами 500 м (а) и 250 м (б) (в правом верхнем углу фрагментов указано время с начала эксплуатации ГЦС, лет)**

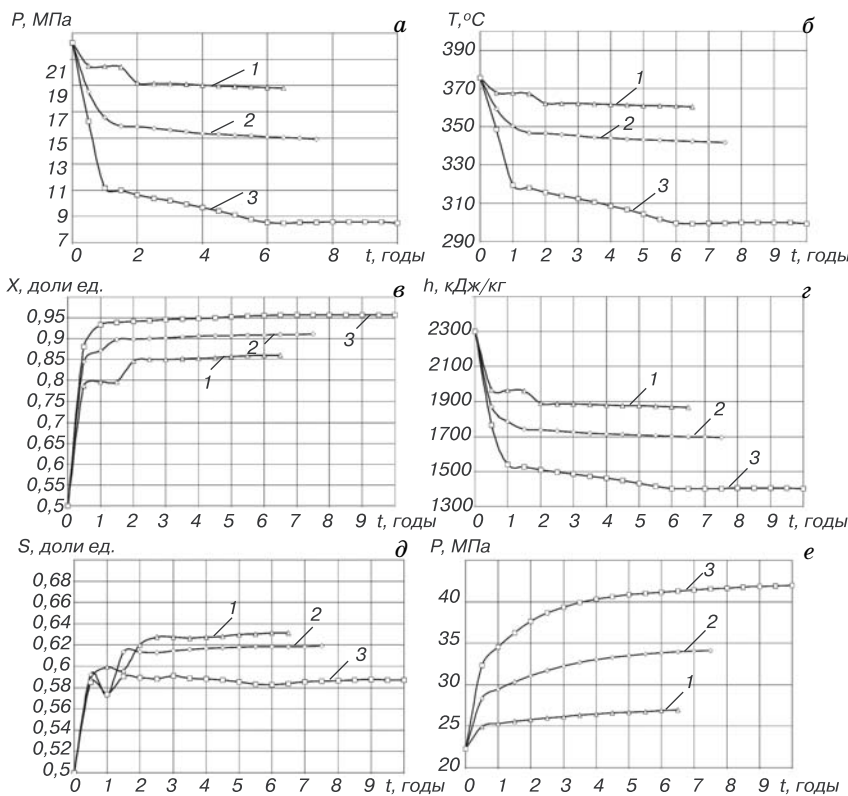
ны градиентов давления, температуры и водонасыщенности в окрестности забоя скважин. Чем меньше  $L$ , тем интенсивнее охлаждаются породы и тем выше величина депрессии давления в призабойной части добычных скважин. Линейный размер области существенных градиентов водонасыщенности и ее средняя величина, наоборот, уменьшаются при сокращении  $L$ .

*Влияние дебита нагнетательной скважины на технологические параметры.* Дебит нагнетательной скважины является важной характеристикой при установлении технико-экономической целесообразности создания ГЦС.

Как показали расчеты, с ростом дебита увеличивается степень снижения и снижаются установившиеся значения давления, температуры, энтальпии на забое добычных скважин, к концу экс-

плуатации увеличиваются степень повышения и значения объемного и массового водосодержания на забое добычных скважин, а также степень роста и значения требуемого давления на забое нагнетательной скважины (рис. 3). Установившиеся значения на забое добычных скважин при дебите 5, 10, 15 кг/с составляют: давления — 19, 15, 8,5 МПа; температуры — 360, 340, 300 °С; энтальпии — 1900, 1700, 1400 кДж/кг; массовой водонасыщенности — 85, 92, 96 %; требуемое давление нагнетания — 26, 34, 43 МПа.

В целях установления рациональных геометрических параметров ГЦС, соответствующих эффективной работе системы, для разных наборов геометрических параметров взаимного расположения забоев добычных и нагнетательной скважин вычисляли от-



**Рис. 3.** Изменение давления  $P$ , энтальпии  $h$ , температуры  $T$ , объемной  $S$  и массовой  $X$  водонасыщенности в добычных (а–д) и давления в нагнетательной (е) скважинах,  $L = 500$  м,  $H_n = 0$  м и дебитах нагнетательной скважины, кг/с: 1 — 5; 2 — 10; 3 — 15

бор теплоты из продуктивной зоны. В результате анализа полученных данных можно сделать следующие выводы.

1. Дебит скважин, проницаемость продуктивной зоны, относительная высота забоя нагнетательной скважины над линией добычных, расстояние между добычными и нагнетательной скважинами влияют на технологические параметры ГЦС. При  $H_n = 0$  рационально располагать забои добычных и нагнетательной скважин на рас-

стоянии 250 м, при этом параметры добычных скважин на конец срока разработки выше, чем в случае  $L = 500$  м, а требуемое давление нагнетания ниже, чем при  $L = 200$  м.

2. Отбор тепла из продуктивной зоны ГЦС типа триплет зависит от относительной высоты нагнетательной скважины над линией добычных, а также от расстояния между добычными и нагнетательной скважинами. При расстоянии между добычными и нагнета-

тельной скважинами 250 м схема расположения нагнетательной скважины на 250 м выше линии добычных скважин обеспечивает большой отбор тепла при сроках эксплуатации более 37 лет и поэтому является более рациональной.

*Библиографический список*

1. Дядькин Ю. Д. Разработка геотермальных месторождений. — М.: Недра, 1989.
2. Богуславский Э. И., Аренс В. Ж., Дядькин Ю. Д. Добыча и использование тепла Земли. Физико-химическая геотехнология. — М.: Изд. МГГУ, 2001.
3. Kipp K. L., Jr., Hsieh P. A., Charlton S. R. Guide to the revised ground-water flow and heat transport simulator: HYDROTHERM — Version 3: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6–A25, 2008. **Ж**

taskin-v@yandex.ru,  
Таскин Виталий Витальевич;  
teplosnab@rambler.ru,  
Пашкевич Роман Игнатьевич

**ТЕПЛОПЕРЕНОС В ГОРНОМ МАССИВЕ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЦИРКУЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ**  
**Таскин В. В., Пашкевич Р. И.**

Представлены исследования и численное моделирование конструкций и параметров эксплуатации геотермальной циркуляционной системы типа триплет как потенциального объекта использования тепловых ресурсов Земли.

*Ключевые слова:* теплоперенос, фильтрация, надкритический флюид, геотермальная циркуляционная система, добычная скважина, нагнетательная скважина, отбор тепла, численное моделирование.