

Теплообмен и динамика жидкости, закачиваемой в геотермальный водоносный пласт

Басок Б.И., Резакова Т.А.

Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев

Рассмотрены процессы теплообмена и фильтрации в подземном проницаемом коллекторе при закачивании в него жидкости. Получены временные зависимости продвижения температурного фронта и продвижения закачиваемой жидкости для реального газонасыщенного водоносного пласта.

Ключевые слова: пористая среда, фильтрация, подземный коллектор, проницаемость, закон Дарси.

Розглянуто процеси теплообміну та фільтрації у підземному проникненому колекторі при закачуванні у нього рідини. Отримано часові залежності просування температурного фронту та просування закачуваної рідини для реального газонасиченого водоносного пласта.

Ключові слова: пористе середовище, фільтрація, підземний колектор, проникненість, закон Дарсі.

При расчетах и проектировании геотермальных циркуляционных систем (ГЦС) с использованием газонасыщенных термальных вод приходится сталкиваться с тем, что при закачивании в водоносный пласт использованной, то есть дегазированной и охлажденной воды содержание газа в добываемой воде начинает снижаться. Возникает необходимость оценить скорость распределения закачиваемой жидкости в водоносном пласте и период времени, через который закачиваемая жидкость достигнет подъемной скважины и, как следствие, использование растворенного газа начнет постепенно прекращаться. Этот факт определяет срок эксплуатации электрогенерирующей части наземного комплекса. Решение задач фильтрации и теплообмена в подземном пористом коллекторе возможно с помощью теплофизического моделирования этих процессов на основе программных CFD-пакетов.

В [1] предложена теплофизическая модель исследуемых процессов при различных режимах движения теплоносителя, показана ее реализация с помощью программного пакета Phoenix, а также подтверждена ее полнота и адекватность данными эксперимента.

Цель данной работы — исследование особенностей течения и теплообмена в подземном пористом слое с использованием предложенной модели. Возможности модели и алгоритма расчетов продемонстрированы на примере расчета реального термоводоносного пласта, который эксплуатируется в пос. Медведовка (Джанкойский р-н, АР Крым).

Рассматривается течение жидкости в плоском пористом канале. Первоначально решалась задача закачки в единичную скважину в цилиндрических координатах r - z . Расчетная область и принятые обозначения представлены на рис.1.

Предполагается, что стенки канала неподвижны и непроницаемы, а поток жидкости попадает в расчетную область через левую границу $r = 0$ и покидает расчетную область на правой границе $r = L$. Параметры пласта: высота $h = 30,0$ м, длина (соответствует расстоянию между скважинами в пос. Медведовка) $L = 400,0$ м, теплоемкость твердой породы $c_p = 905,0$ Дж/(кг·К), теплопроводность $\lambda = 2,5$ Вт/(м·К), плотность $\rho = 2500,0$ кг/м³, пористость пласта $\phi = 0,32$. Первоначально распределение температуры по глубине пласта было стационарным, начальная температура твердой породы и жидкости $t_{пл} = t_{ж} = 74,0$ °С. Температура окружающего массива, то есть и температура на границе расчетной области (низ и верх водоносного пласта, гранит) была постоянной и равнялась $74,0$ °С. В пласт закачивалась вода с расходом $G = 7,0$ кг/с, начальная температура закачиваемой воды $t_3 =$

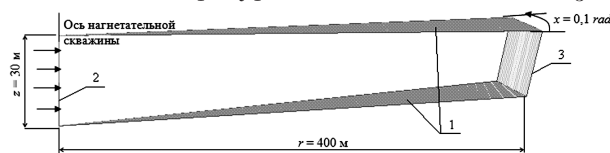


Рис.1. Геометрия расчетной области для цилиндрической системы координат: 1 — непроницаемые границы; 2 — вход; 3 — выход.

16,8 °С. Расчетное время составляло до 10 лет и до 50 лет.

В рамках принятой модели процесс описывается следующей системой уравнений [2–10].

1. Уравнение движения жидкости:

$$\rho_f \left[\frac{1}{\phi} \frac{\partial v}{\partial \tau} + \frac{1}{\phi} \nabla \left(\frac{v \cdot v}{\phi} \right) \right] = -\nabla P + \frac{\mu}{\phi} \nabla^2 v - \frac{\mu}{K} v - \frac{c_f \rho_f}{K^{1/2}} |v| v.$$

2. Уравнение неразрывности для фильтрационного потока в проницаемой среде:

$$\phi (\partial \rho_f / \partial \tau) + \nabla (\rho_f v) = 0.$$

3. Уравнение энергии:

$$(\rho c)_m (\partial t / \partial \tau) + (\rho c)_f v \nabla t = \nabla (\lambda_m \nabla t),$$

где для системы жидкость – твердое тело эффективная теплоемкость $(\rho c)_m = (1 - \phi) (\rho c)_s + \phi (\rho c)_f$, а коэффициент теплопроводности $\lambda_m = (1 - \phi) \lambda_s + \phi \lambda_f$ [3].

4. Уравнение массопереноса:

$$\phi (\partial C / \partial \tau) + v \nabla C = \nabla (D_c \nabla C + D_T \nabla t),$$

где D_c – коэффициент концентрационной самодиффузии; D_T – коэффициент термодиффузии; D_T / D_c – коэффициент Сорета [3].

Результаты расчетов. Проведено исследование температурного поля в водоносном пласте. Результаты численного моделирования температурных полей в рассматриваемом пласте через 1, 10 и 50 лет эксплуатации в постоянном режиме показаны на рис.2 и 3, а. Через 1 год эксплуатации температурный профиль холодной зоны по высоте слоя имеет форму сегмента круга, окруженного переходной зоной, которая по серединной линии пласта ($h/2 = 15,0$ м) примерно в 2 раза больше холодной зоны и распространяется на 60,0 м от оси нагнетательной скважины. Через 10 лет закачки характер температурного поля по высоте слоя существенно изменится. Изотермы становятся более вытянутыми в направлении движения жидкости. Соотношение между холодной и переходной зонами составляет 1/4. На всех термограммах виден ярко выраженный пограничный слой прогретейшей жидкости, начиная от зоны закачки. За 10 лет холодная зона с температурой закачки продвинулась на 22,0 м по средней линии пласта. Переходная зона заканчивается на расстоянии 120,0 м от оси скважины.

Из расчета видно, что изменение температуры пласта и пластовой жидкости при закачке холодной воды происходит в течение 10 лет. Далее этот процесс замедляется, и температура пласта изменяется очень медленно и незначительно.

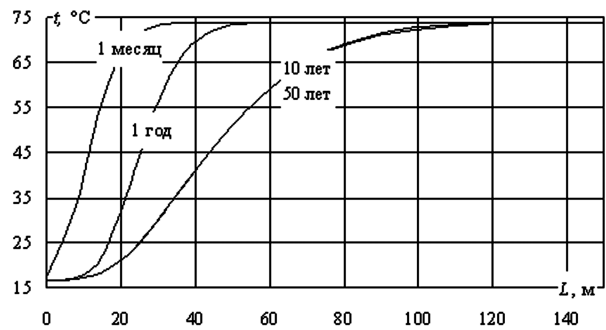


Рис.2. Изменение температуры проницаемого слоя по его длине до 50 лет, в средней точке по высоте ($z = 15,0$ м).

Распределение закачиваемой охлажденной жидкости в пласте. При проектировании геотермальных систем с использованием газонасыщенных вод необходимо знать скорость распределения закачиваемой жидкости в водоносном пласте, то есть через какой период

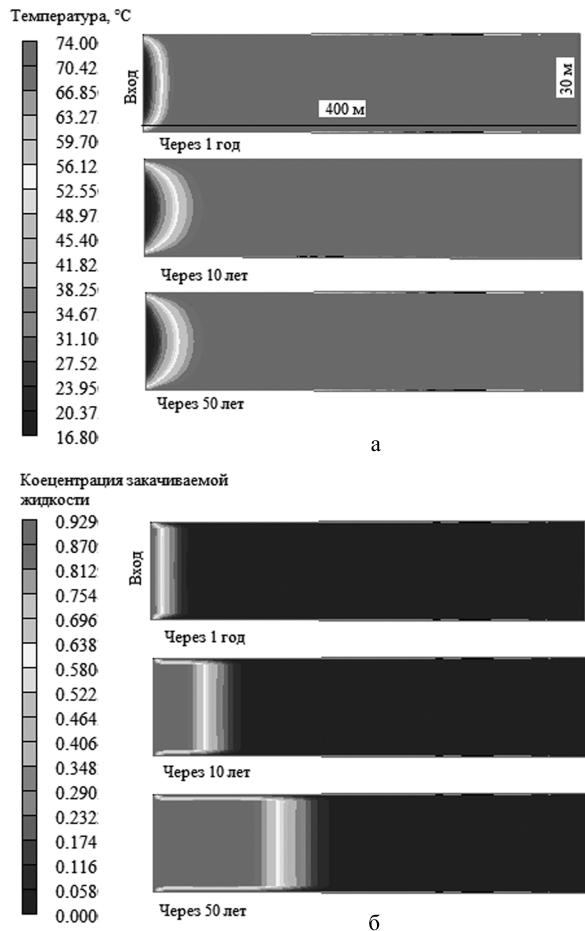


Рис.3. Поля температур (а) и распределение концентрации закачиваемой жидкости (б) в водоносном пласте через различные сроки эксплуатации одиночной нагнетательной скважины.

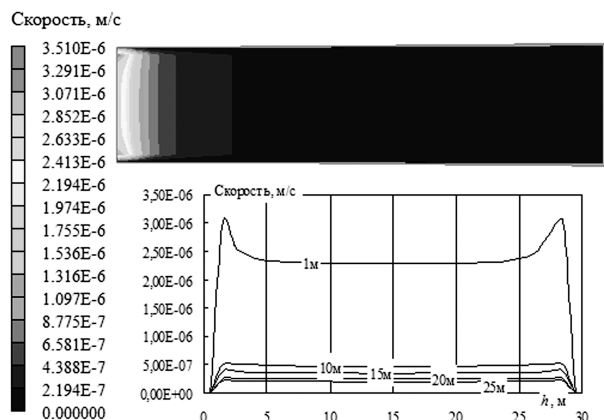


Рис.4. Профиль скорости движения закачиваемой жидкости в пласт через одиночную нагнетательную скважину (через 1 неделю после начала закачки).

времени закачиваемая жидкость достигнет добычной скважины и использование растворенного газа прекращается. Этот факт определяет срок эксплуатации электрогенерирующей части наземного комплекса. До начала эксплуатации термоводоносный пласт полностью заполнен горячей водой. С момента подачи охлажденной воды в пласт через нагнетательную скважину в нем начинает формироваться «холодная» зона.

На рис.3, 6 представлены результаты расчетов распространения закачиваемой жидкости по высоте слоя через 1 год, 10 и 50 лет закачки в постоянном режиме. Как видно, закачиваемая жидкость заполняет пласт по всей высоте h . Весь пласт делится на три зоны: зона горячей природной воды с начальной пластовой температурой; холодная зона с температурой закачиваемой воды; переходная зона, в которой происходит взаимное перемешивание природной и закачиваемой воды. Переходная зона после первого года эксплуатации примерно равна зоне охлажденной воды, через 10 лет – в 2 раза меньше. За первый год эксплуатации фронт закачиваемой жидкости продвинулся в радиальном направлении на 19,3 м, а за 10 лет на 83,0 м.

На рис.4 показаны высотные зависимости скорости продвижения фронта закачиваемой жидкости в пласте, характеризующиеся существенным заполнением профиля скорости. Скорость движения жидкости в зоне, близкой к наружной поверхности трубы нагнетательной скважины, максимально составляет $2 \cdot 10^{-6}$ м/с, или 63,0 м/год.

Сравнение температурного поля с концентрационным полем распространения закачиваемой жидкости показывает, что фронт концентрации закачиваемой жидкости опережает температурный фронт. Профили фронтов по высоте слоя принципиально различаются, но аналогичны в радиальном направлении.

Исследование температурных и концентрационных полей в пласте при переменном режиме эксплуатации.

На практике режим эксплуатации термоводоносных пластов не всегда бывает постоянным в связи с сезонной потребностью в теплоносителе. Так, в пос. Медведевка геотермальная установка работает 3700 ч/год. Методика позволяет получить все необходимые данные для режима периодической эксплуатации. На рис.5, 6 показаны температурные поля и графики изменения температуры слоя в периодическом режиме работы. Как видно, количественно и качественно температурные поля отличаются от непрерывного режима работы в первые 10 лет. Снижается скорость продвижения холодного фронта, значительно увеличивается размер переходной зоны. При постоянной эксплуатации зона горячей жидкости сократилась на 120 м, а при периодической на 80 м (3700 ч работы).

В качестве примера был проведен расчет гипотетического режима работы того же пласта при увеличении дебита скважины в 3,7 раза (от 27,0 до 100,0 м³/ч). Результаты расчета показали, что через 10 лет работы закачиваемая жидкость практически достигает той области, где в реальной системе ГЦС находится добычная скважина. Температурное поле отстает от

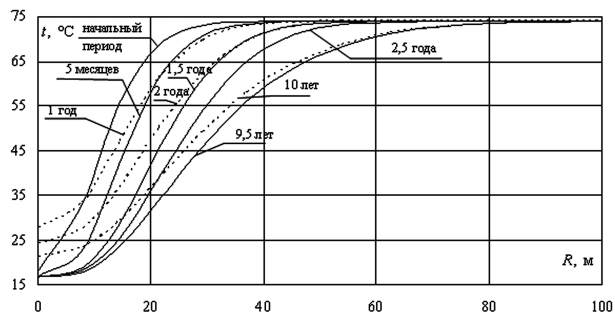


Рис.5. Изменение температуры пласта за 10 лет при периодической эксплуатации одиночной нагнетательной скважины. Сплошные линии – по состоянию на конец рабочего периода; пунктирные – нерабочего периода (на конец остановки эксплуатации, то есть спустя 7 мес после работы).

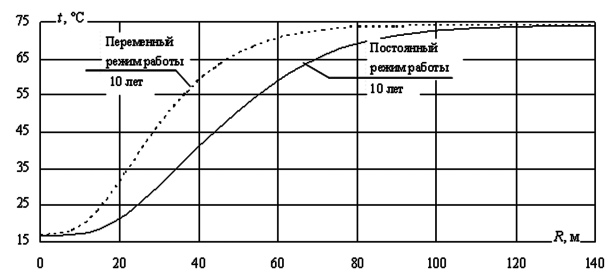


Рис.6. Сравнение изменения температуры водоносного пласта при переменном и постоянном режимах работы за 10 лет эксплуатации одиночной нагнетательной скважины.

концентрационного на 90 м. Это значит, что даже при такой интенсивной эксплуатации слоя прогрев закачиваемой жидкости скелетом пласта и окружающим горным массивом существенно увеличивает сроки эксплуатации ГЦС.

Выводы

Проведен расчет и сделан анализ режима эксплуатации коллектора с газонасыщенной жидкостью. Исследование концентрационных полей закачиваемой и природной газонасыщенной жидкости позволяет прогнозировать время и режим работы электрогенерирующей и теплоиспользующей частей наземного когенерационного комплекса. В связи с тем, что концентрационный фронт опережает тепловой, концентрация газа в добываемой воде начинает снижаться значительно раньше, чем ее температура.

Полученные количественные оценки влияния режима работы ГЦС показали, что при переменной сезонной эксплуатации температурный фронт медленнее перемещается в сторону добычной скважины по сравнению с режимом постоянной эксплуатации в первые 10 лет. По истечении этого времени коллектор становится невосприимчив к режиму эксплуатации. Искусственное увеличение дебита скважины приводит к резкому изменению температурного и концентрационного полей в коллекторе.

Условные обозначения

C	— концентрация (распространение закачиваемой жидкости)
c_p	— теплоемкость, кДж/(кг·°C)
c_F	— коэффициент Форхгеймера
D	— диаметр пласта, м
D	— коэффициент диффузии
G	— расход, кг/с
h	— высота пласта, м
K	— коэффициент проницаемости, м ²
P	— давление, Па
r, z	— координаты цилиндрической системы, м
t	— температура, °C

v	— (v, w) скорость, м/с
ϕ	— пористость, %
λ	— коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C)
μ	— динамический коэффициент вязкости, н·с/м ²
ν	— кинематический коэффициент вязкости, м ² /с
ρ	— плотность, кг/м ³
τ	— время, с

Индексы нижние: m — массив; F — Форхгеймер; f — жидкий флюид; s — твердое тело; ж — жидкость; з — закачка; пл — пласт; с — самодиффузия; T — термодиффузия.

Список литературы

1. Басок Б.И., Авраменко А.А., Резакова Т.А., Морозов Ю.П. Процессы фильтрации геотермального теплоносителя в пористом слое // Пром. тепло-техника. — 2009. — Т. 31, № 5. — С. 69–75.
2. Рочч П. Вычислительная гидродинамика. — М. : Мир, 1980.
3. Маскет М. Течение однородных жидкостей в пористой среде. — М. : Гостоптехиздат, 1949.
4. Donald A., Nield A. Bejan Convection in Porous Media. — Springer, 2006.
5. Авраменко А.А. Ренормализационный анализ турбулентности в пористых средах // Пром. тепло-техника. — 2004. — Т. 26, № 1. — С. 11–21.
6. Nield D., Junqueira S., Lage J. Forced convection in a fluid-saturated porous-medium channel with isothermal or isoflux boundaries // J. Fluid Mech. — 1996. — Vol. 322. — P. 201–214.
7. Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. Движение жидкостей и газов в природных пластах. — М. : Недра, 1984.
8. Vafai K., Kim S. J. Forced convection in channel filled with a porous medium: an exact solution // ASME J. Heat Transfer. — 1989. — Vol. 111. — P. 1103–1106.
9. Бочкарев А.А., Волков В.И. Модель Бринкмана с учетом неравномерной пористости // Изв. Алтай. гос. ун-та. — 2002. — Т. 23, № 1. — С. 99–100. — www.izvestia.asu.ru/2002/1/phys/02.ru.html.
10. Ingham D. B., Mamut E., Pop I. Governing equations for laminar flows through porous media // Proc. NATO Advanced Study Institute on Emerging Technologies and Techniques in porous media. — 2003. — 9–20 June. — P. 1–9.

Поступила в редакцию 31.05.11

Heat Exchange and Injected into Underground Aquifer Liquid Dynamics

Basok B.I., Rezakova T.A.

The Institute of Engineering Thermophysics NAS of Ukraine, Kiev

The processes of heat transfer and filtration in underground permeable collector by liquid injection into it are considered. The obtained time dependences of temperature front progression and injected fluid progression for substantial gas-saturated aquifer are obtained.

Key words: porous medium, filtration, underground collector, penetrability, Darcy's law.

Received May 31, 2011