

УДК 532.5; 536.24

Т.А.Резакова, канд.техн.наук (Ин-т технической теплофизики НАН Украины, Киев)

Теплообмен и динамика распространения жидкости в подземном пористом пласте

Рассмотрены процессы теплообмена и фильтрации в подземном проницаемом коллекторе при закачивании в него жидкости. Получены временные зависимости продвижения температурного фронта и закачиваемой жидкости для реального газонасыщенного водоносного пласта. Оценены показатели эксплуатации геотермальной когенерационной установки, работающей на газонасыщенной термальной воде.

Розглянуто процеси теплообміну та фільтрації у підземному проникному колекторі при закачуванні в нього рідини. Отримано часові залежності просування температурного фронту і закачуваної рідини для реального газонасиченого водоносного пласта. Оцінено показники експлуатації геотермальної когенераційної установки, що працює на газонасиченій термальній воді.

Введение. Теплофизическое моделирование является эффективным средством решения сложных задач оценки геологических запасов геотермальной теплоты, выбора рациональных схем георазведки, проектирования и оптимизации систем эксплуатации геотермальных месторождений. Однако задачи моделирования процессов теплопереноса в подземных слоях являются малоизученными [1–5]. Задачей теплового расчета геотермальных систем является определение необходимой длины пути фильтрации и скоростного режима фильтрации теплоносителя для обеспечения заданной теплопроизводительности системы в течение всего срока ее эксплуатации. Продолжительность периода эксплуатации выбирается из условий обеспечения нормальной работы наземных энергопотребляющих установок в течение всего срока их службы (40-50 лет).

При расчетах и проектировании геотермальных циркуляционных систем с использованием газонасыщенных вод приходится сталкиваться с тем, что при закачивании в пласт использованной, и поэтому дегазированной и охлажденной воды, содержание газа в добываемой воде начинает снижаться. Возникает необходимость оценить скорость распределения закачиваемой жидкости в водоносном пласте, а также период времени, через который закачиваемая жидкость достигнет подъемной скважины и использование растворенного газа постепенно начнет прекращаться. Этот факт определяет срок эксплуатации электрогенерирую-

щей части когенерационной установки наземного комплекса. Режимы работы тепловой части установки зависят от динамики температурного поля в подземном пласте при закачивании в него охлажденной жидкости. Время эксплуатации геотермальной системы состоит из двух периодов. В первый период происходит вытеснение из пористого слоя теплоносителя, первоначально заполнявшего пласт. В этот период теплоноситель имеет постоянную температуру на выходе из коллектора. Первый период продолжается до момента достижения фронта волны температурных возмущений линии подъемных скважин. После этого зона охлаждения горного массива распространяется на всю площадь подземного коллектора. С этого момента может происходить снижение температуры теплоносителя. Однако время вытеснения может быть меньше периода постоянной температуры, т.к. закачиваемый теплоноситель может нагреваться до температуры естественного теплоносителя и какое-то время поддерживать режим постоянной температуры. Протяженность охлаждаемой зоны горного массива в первый и второй периоды эксплуатации различны, что требует различных подходов для расчетов коэффициентов нестационарного теплообмена. Решение задач фильтрации и теплообмена в подземном пористом пласте возможно с помощью моделирования этих процессов в CFD пакетах. В данной работе предложена теплофизическая модель исследуемых процессов и показана ее реализация с помощью программного пакета *Phoenix*.

Постановка задачи. Принимаем, что подземный коллектор геотермальной циркуляционной системы представляет собой пористый слой, снизу и сверху окруженный двумя бесконечными параллельными, горизонтально расположенными непроницаемыми горными массивами [1, 2]. Пористая среда представляет собой систему твердых частиц с пустотами (порами) между ними. В пласт заделаны две скважины с трубными системами для транспорта геотермальной воды: одна скважина – для забора и подъема нагретой воды, вторая – для возврата и нагнетания под давлением отработанной охлажденной воды обратно в пласт. До начала эксплуатации термоводоносный пласт полностью заполнен нагретой водой с растворенным газом (в основном, метаном). С момента подачи отработанной охлажденной дегазированной воды в пласт через нагнетательную скважину в нем начинает формироваться "холодная" зона.

При фильтрации жидкости через проницаемый слой между потоком и частицами твердого скелета, а также между жидкостью и окружающим пласт горным массивом, происходит конвективный теплообмен, а также теплообмен самодиффузией [3–7]. Кроме того, в фильтрующейся жидкости осуществляется перенос теплоты теплопроводностью в продольном и поперечном направлениях. Охлаждаются частицы твердого скелета пласта и окружающий горный массив за счет теплопроводности. Этот же механизм теплопереноса имеет место и на границе "пласт – массив", и при контакте частичек скелета пласта друг с другом. В случае наличия значительного поперечного градиента температур в пласте может развиваться естественная конвекция. При малых скоростях фильтрации её роль может быть существенной.

Моделирование исследуемых процессов.

В работе приняты следующие обозначения: C – концентрация (распространение закачиваемой жидкости); c_p – теплоемкость, кДж/(кг·град); c_F – коэффициент Форхгеймера; D – диаметр пласта, м; D – коэффициент диффузии; d – диаметр частиц, м; G – расход, кг/с; h – высота пласта, м; K – коэффициент проницаемости, м²; k – коэффициент фильтрации, м/сут; P – давление, Па; R, r – радиус, м; Re – число Рейнольдса; r – координаты цилиндрической системы, м; t – температура, °C; v (v, w) – скорость, м/с; V – объем, м³; x, y, z – оси координат, м; φ – пористость, %; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·град); μ – динамический коэффициент вязкости, н·с/м²; ν – кинематический коэффициент вязкости, м²/с; ρ – плотность, кг/м³; τ – время, с. Индексы нижние: e – эквивалентный; k – критический; m – массив; F – Форхгеймер; f – жидкий флюид; s – твердое тело; gr – грунт (засыпка); $ж$ – жидкость; $з$ – закачка; $п$ – пустоты; $пл$ – пласт; $с$ – самодиффузия; T – термодиффузия; 0 – начальное значение.

Теплофизическая модель включает следующие уравнения:

1. Уравнение движения жидкости. В связи со сложностью и многообразием линий тока в пористом подземном коллекторе, принимается предположение об аналогии между потоком в трубах и потоком в пористой среде, т. е. пористая среда представляется эквивалентной набору пор типа капилляров. В качестве характеристики движения принимается число Рейнольдса, которое для условий фильтрации в грунте можно представить в виде [3]:

$$Re = \frac{vK^{1/2}}{\nu}, \quad (1)$$

где K – коэффициент проницаемости.

Критические значения числа Re находятся в пределах $0,1 < Re_k < 10$ [3–6]. В этом случае движение жидкости подчиняется закону Дарси:

$$v = -\frac{K}{\mu} \nabla P, \quad (2)$$

где v – скорость свободной жидкости, движущейся сплошной массой, заполняя весь объем водоносного слоя, включая пространство, занятое скелетом породы. Таким образом, система "пористая среда и движущаяся в ней жидкость" заменяется некой свободной жидкой средой (индекс m , "medium"), которая уже движется в свободной (непористой) среде. Теплофизические свойства этой жидкости $(\rho c)_m$ и λ_m определяются по аддитивному закону с учетом пористости. Величина $K/\mu = k$ – коэффициент пропорциональности (или коэффициент фильтрации). Он характеризует пористую среду и жидкость одновременно. Величина k зависит от формы частиц, степени шероховатости их поверхности, пористости среды, вязкости жидкости.

Коэффициент проницаемости K является параметром, характеризующим фильтрационные

свойства подземных коллекторов. Связь его с пористостью выражается формулой Козени [4, 7]:

$$K = \frac{d^2 \varphi^3}{180(1-\varphi)^2}, \quad (3)$$

где d – диаметр частиц; φ – пористость среды, т. е. отношение объема пустот пористой среды V_n ко всему объему данной пористой среды V ($\varphi = V_n/V$).

Закон Дарси показывает, что между потерей напора и расходом существует линейная зависимость. С повышением скорости движения жидкости, которое может наблюдаться, например, в прискважинной зоне, возрастает роль инерционных сил, и закон Дарси нарушается. При $Re > 10$ происходит постепенный переход от закона Дарси к нелинейному закону фильтрации, которая описывается двучленным уравнением Дюпюи – Форхгеймера [1, 3, 4, 8]:

$$\nabla P = -\frac{\mu}{K} v - c_F K^{-1/2} \rho_f |v| v, \quad (4)$$

где c_F – универсальный параметр, определяемый равенством [7, 9]:

$$c_F = 0,55 \left(1 - 5,5 \frac{d}{D_e} \right),$$

где D_e – эквивалентный диаметр пласта с высотой h и шириной s , равный: $D_e = \frac{2sh}{s+h}$; d – диаметр

сферических частиц скелета. Учитывая малую величину второго сомножителя, принимаем $c_F = 0,55$.

В тех случаях, когда необходимо учитывать условия прилипания в пограничном слое на двух границах "пласт – окружающий горный массив", в уравнении Дарси учитывается дополнительный член Бринкмана [3, 10]:

$$\nabla P = -\frac{\mu}{K} v + \tilde{\mu} \nabla^2 v, \quad (5)$$

где $\tilde{\mu}$ – эффективная вязкость, $\frac{\tilde{\mu}}{\mu} = \frac{1}{\varphi}$.

С учетом вышеизложенного полное уравнение движения фильтрационного потока запишется в следующем виде:

$$\begin{aligned} \rho_f \left[\frac{1}{\varphi} \frac{\partial v}{\partial \tau} + \frac{1}{\varphi} \nabla \left(\frac{v \cdot v}{\varphi} \right) \right] = \\ = -\nabla P + \frac{\mu}{\varphi} \nabla^2 v - \frac{\mu}{K} v - \frac{c_F \rho_f}{K^{1/2}} |v| v. \end{aligned} \quad (6)$$

2. Уравнение неразрывности для фильтрационного потока в проницаемой среде:

$$\varphi \frac{\partial \rho_f}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho_f v) = 0. \quad (7)$$

3. Уравнения энергии. Уравнения для теплообмена в процессах фильтрации жидкости в пласте записываются для каждой из фаз [7, 9, 11]:

$$\begin{aligned} \varphi (\rho c_p)_f \frac{\partial t_f}{\partial \tau} + (\rho c_p)_f v \cdot \nabla t_f = \\ = \varphi \nabla \cdot (\lambda_f \nabla t_f) + q; \end{aligned} \quad (8)$$

$$(1-\varphi)(\rho c)_s \frac{\partial t_s}{\partial \tau} = (1-\varphi) \nabla \cdot (\lambda_s \nabla t_s) - q, \quad (9)$$

где q – объемная плотность теплового потока от пористой среды к жидкости, которая движется в этой среде.

Если принять, что $t_s = t_f = t$ и сложить уравнения (8) и (9), то получим уравнение сохранения энергии для всего пласта [9, 11]:

$$(\rho c)_m \frac{\partial t}{\partial \tau} + (\rho c)_f v \cdot \nabla t = \nabla \cdot (\lambda_m \nabla t), \quad (10)$$

где для системы "жидкость – твердое тело" эффективная теплоемкость выражается как $(\rho c)_m = (1-\varphi)(\rho c)_s + \varphi(\rho c)_f$, а коэффициент теплопроводности:

$$\lambda_m = (1-\varphi)\lambda_s + \varphi\lambda_f.$$

Строго говоря, в правую часть уравнения (10) следовало бы также добавить слагаемое, обуславливающее теплопроводность за счет разности концентраций пластовой жидкости и закачиваемой жидкости, т. е. за счет эффекта теплопереноса при протекании процесса концентрационной самодиффузии:

$$\nabla \cdot (\lambda_c (\rho c)_f \nabla C),$$

где λ_c / λ_m – коэффициент Дюфора для пористой среды, а коэффициент $\lambda_c \sim t|v|l$ для процессов самодиффузии воды в пористых средах пренебрежимо мал; l – длина участка, на котором полностью реализуется перепад диапазона концентрации закачиваемой воды. Как показали расчеты, для нашей задачи значения l находятся в диапазоне 100÷150 м. Под процессом концентрационной самодиффузии здесь подразумевается эффект проникновения закачиваемой воды (низкой температуры) в пластовую первоначально покоящуюся

воду (высокой температуры), обусловленный разностью их концентраций.

Оценки показывают, что теплообмен за счет теплопроводности (правая часть уравнения (10)) мал и для инженерных расчетов им можно пренебречь, используя конвективный теплообмен при течении свободной жидкости.

4. Уравнение массопереноса. В общем виде массоперенос в пористой среде обусловлен конвекцией, а также градиентами температур и концентраций:

$$\varphi \frac{\partial C}{\partial \tau} + v \cdot \nabla C = \nabla \cdot (D_c \nabla C + D_T \nabla t), \quad (11)$$

где D_c – коэффициент концентрационной самодиффузии; D_T – коэффициент термодиффузии; D_T/D_c – коэффициент Сорета [3]. Первым слагаемым в правой части уравнения (11) можно пренебречь, учитывая малое значение коэффициента самодиффузии воды в пористых средах.

Результаты расчетов. Возможности предложенной модели и способ ее реализации продемонстрируем на примере расчета реального термоводоносного пласта, который эксплуатируется в поселке Медведовка Джанкойского района АР Крым. Для расчета был выбран массив прямоугольной формы (рис. 1) с размерами: высота – 150,0 м; длина – 600,0 м; ширина – 400,0 м. Параметры водоносного пласта: высота – 30,0 м; длина (расстояние между скважинами) – 400,0 м; теплоемкость твердой породы $c_p = 905$ Дж/кг·К; теплопроводность $\lambda = 2,5$ Вт/м·К; плотность $\rho = 2500$ кг/м³; пористость пласта $\varphi = 0,32$.

Первоначально распределение температуры по высоте пласта было стационарным, начальная температура твердой породы и жидкости была $t_{пл} = t_{ж} = 74,0^\circ\text{C}$. Температура окружающего массива была постоянной и равнялась $74,0^\circ\text{C}$. Учитывалась непроницаемость окружающего горного массива. Начальная температура закачиваемой воды была $t_3 = 16,8^\circ\text{C}$ и задавалась на наружной поверхности густо перфорированной трубы скважины, где сумма площадей отверстий обеспечивала постоянное значение расхода. Предполагалось, что распределение начальной скорости жидкости, равномерно истекающей через боковую цилиндрическую поверхность скважины в толще пласта, не зависит от его вертикальной координаты и определяется по-

стоянным среднеинтегральным расходом жидкости $G = 7,0$ кг/с, что соответствует скорости $v = 0,448$ м/с. Учитывался теплообмен с горным массивом, рассматривалась система двух скважин (нагнетательной и подъемной), нестационарная задача решалась в трехмерной декартовой системе координат. Границы водоносного слоя в массиве: нижняя – на высоте 50,0 м; верхняя – на высоте 80,0 м. В координатах (x, y, z) ось z вертикальна и параллельна осям скважин. Ось x горизонтальна, параллельна линии, соединяющей забои скважин. Ось y перпендикулярна оси x и линии, соединяющей скважины. Координаты забоя нагнетательной скважины: $x = 200,0$ м, $y = 200,0$ м; подъемной – $x = 600,0$ м, $y = 200,0$ м. Предполагалось, что время эксплуатации пласта составляет 50 лет.

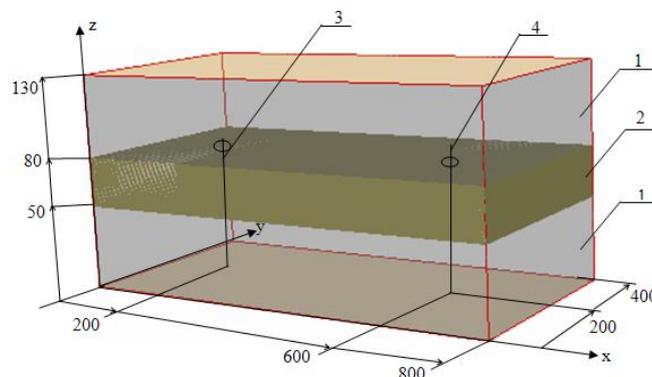


Рис. 1. Расчетная схема задачи: 1 – горный массив; 2 – водоносный слой; 3 – ось нагнетательной скважины; 4 – ось подъемной скважины; все расстояния – в метрах.

Температурный режим в водоносном слое определяется количеством теплоты, которое передается закачиваемой воде скелетом слоя, горячей водой и окружающим горным массивом. Чтобы определить последнюю составляющую, необходимо знать глубину охлаждения горного массива в процессе. С этой целью был проведен расчет зависимости температуры водоносного слоя в средней плоскости ($h/2=15,0$ м) по длине между скважинами в зависимости от высоты окружающего горного массива и времени эксплуатации. Толщина горного массива в расчетах изменялась от 0,0 до 60,0 м в каждом направлении (и нижняя подошва, и верхняя кровля), как показано на рис. 1 и рис. 2. Принималось, что на границе горного массива температура постоянна и равна $74,0^\circ\text{C}$. Расчетное время эксплуатации изменялось от 1 года до 50 лет. Результаты представлены на рис. 3.

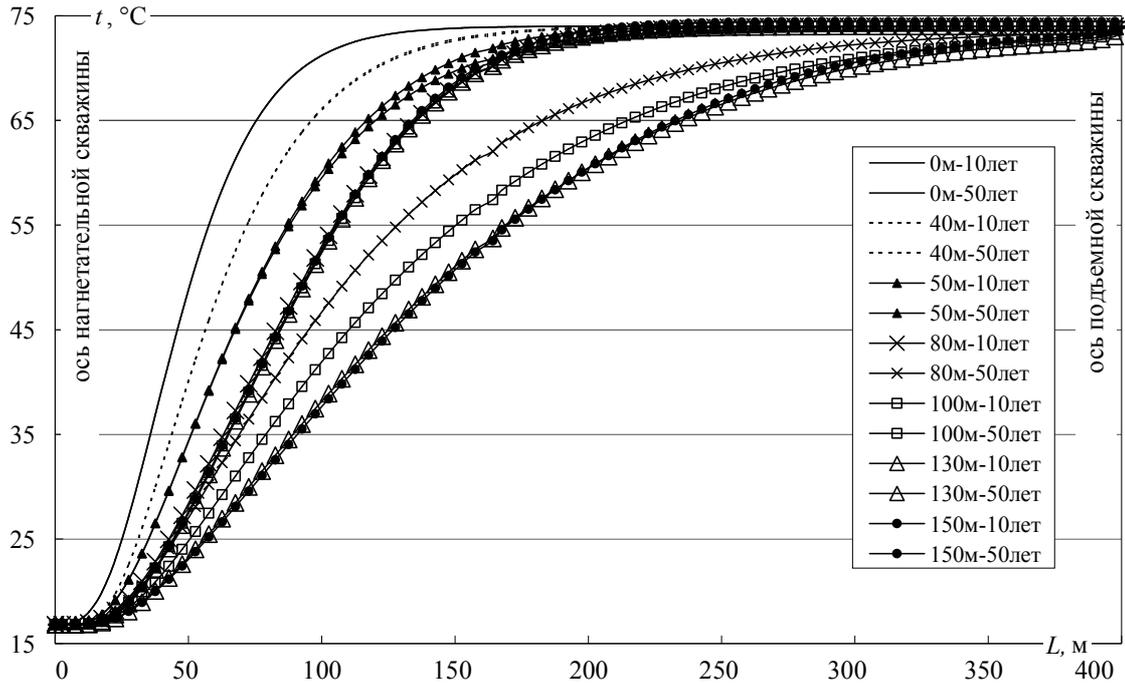


Рис. 2. Зависимость охлаждения горного массива при различной суммарной высоте (подошва, слой, кровля) в течение 50 лет.

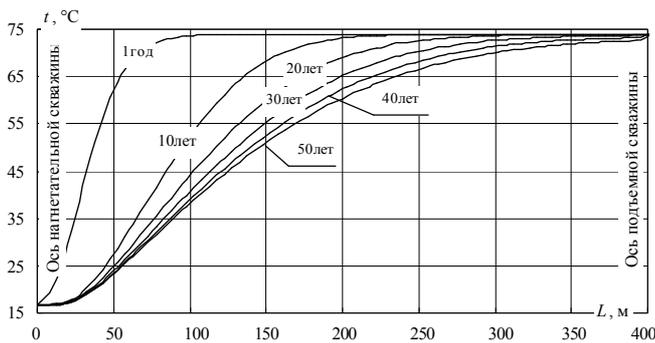


Рис. 3. Изменение температуры водоносного пласта за 50 лет (по длине расстояния между скважинами).

Было установлено, что температурный режим в водоносном слое перестает влиять на температуру горного массива на удалении (расстояние по высоте массива) 50,0 м и более. Этим обстоятельством был определен выбор геометрии расчетной схемы, представленной рис. 1. На рис. 2 кривые, соответствующие высоте слоя 50,0 м и 60,0 м для каждого времени эксплуатации (10 и 50 лет) полностью совпадают (кривые Δ, ●). С учетом этих данных во всех дальнейших расчетах высота слоя (и нижнего, и верхнего) горного массива принималась равной 50,0 м.

Динамика изменения температуры в средней

плоскости водоносного слоя между скважинами в процессе эксплуатации от 1 года до 50 лет показана на рис. 3.

Полученные данные необходимы для оценки времени нормальной эксплуатации (без потери запланированной тепловой мощности) тепловой части геотермальной энергоустановки. По достижении температурного фронта подъемной скважины начинается понижение температуры извлекаемой воды и ухудшение тепловых показателей установки. Если в качестве критерия эффективной эксплуатации тепловой части оборудования возможно допустить 1% падения температуры в забое подъемной скважины, то для конкретных условий геотермального месторождения в п. Медведева такое значение $(74,0^{\circ}\text{C} - 1\%) = 73,26^{\circ}\text{C}$ будет достигнуто по истечении около 50 лет эксплуатации (рис. 4). Такой период достаточно большой для энергогенерирующего оборудования, как с точки зрения его амортизации, проведения капитальных ремонтов так и морального устаревания. Таким сроком в 50 лет было определено максимальное время расчетов данной работы.

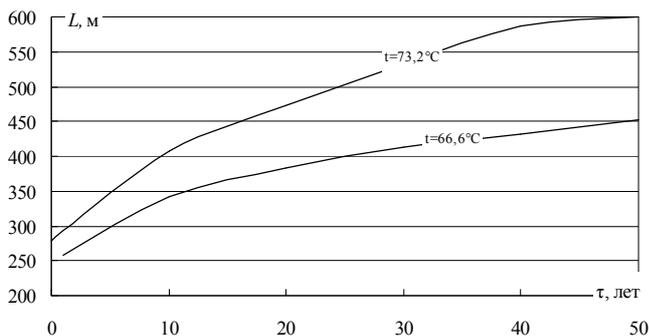


Рис. 4. Временная зависимость достижения фронтом падения температуры на 1% и на 10% для теплопункта в п. Медведевка, АР Крым.

В качестве оценки отметим, что снижение температуры добываемой воды в забое подъемной скважины примерно на 1,0°С можно ожидать после 65 лет эксплуатации, а снижение температуры на 2,1°С (такое падение сравнимо с потерей температурного напора, обусловленного теплоотдачей от всей скважины в грунтовой массив) следует ожидать после столетнего периода эксплуатации.

Проведены расчеты распределения закачиваемой воды по всему объему водоносного слоя (между скважинами, в поперечном направлении, по высоте слоя) для 1 года, 10, 15, 20 и 30 лет эксплуатации. Рассчитано распределение концентрации закачиваемой жидкости в средней плоскости водоносного пласта ($h/2 = 15,0$ м) относительно оси y на различных расстояниях от оси нагнетательной скважины при времени эксплуатации от 1 года до 30 лет. Гидродинамические расчеты показали, что средняя скорость продвижения фронта закачиваемой воды в направлении подъемной скважины составляет примерно $4,0 \cdot 10^{-7}$ м/с или 1,5 мм/ч.

Такие зависимости необходимы для того, чтобы оценить время эксплуатации электрогенерирующей части наземного когенерационного энергопотребляющего комплекса. В качестве критерия нормальной эксплуатации выбирается необходимый уровень растворенного газа (в данном случае – метана) в термальной жидкости по отношению к исходному пластовому содержанию газа. В начальном состоянии пластового слоя, т. е. в термальной воде с пластовой температурой, концентрация газа максимальная и определяется газовым фактором. При смешении закачиваемой отработанной холодной жидкости, в которой газ

отсутствует, с пластовой нагретой жидкостью концентрация газа в такой смеси уменьшается, а значит, газопотребляющая часть наземной установки начинает работать менее эффективно.

Концентрация растворенного газа в области подъемной скважины уменьшается с ростом концентрации закачиваемой холодной жидкости, причем уменьшение концентрации газа на оси подъемной скважины практически пропорционально увеличению концентрации холодной воды. За допустимый уровень возможного уменьшения концентрации растворенного газа были выбраны два значения: 99% и 90% (т.е. уменьшение на 1% и на 10% от первоначального состояния в забое подъемной скважины), которые соответственно могут быть обусловлены попаданием части холодной жидкости в область забоя при ее средней концентрации в 1% или (для второго случая) 10%. Для такого подхода проведены расчеты, показанные на рис. 5, 6.

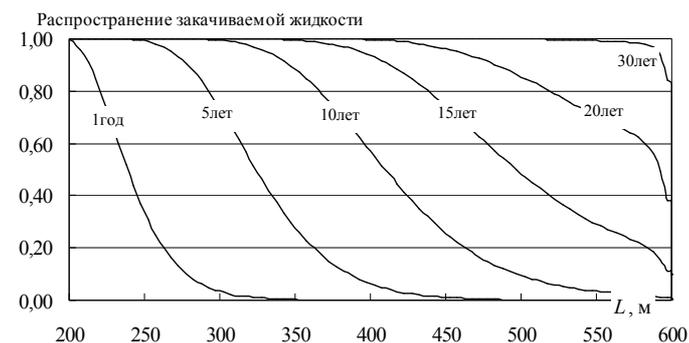


Рис. 5. Распространение фронта концентрации закачиваемой жидкости в водоносном пласте (в направлении между двумя скважинами) за 30 лет.

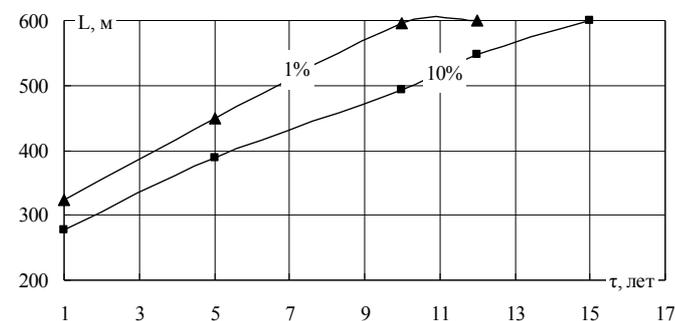


Рис. 6. Распространение фронта концентрации в 1% и 10% закачиваемой жидкости в двухскважинной системе.

По данным этих графиков можно прогнозировать время и режимы работы электрогенерирующей части наземного комплекса. Расчеты показали, что концентрация газа в добываемой воде начнет снижаться после 10 лет эксплуатации. По-

сле 15 лет эксплуатации она снизится на 10%, после 20 – на 37%, после 30 – на 85%. Для случая конкретных характеристик двухскважинной системы п. Медведовка (глубины скважин, расстояния между ними, пластовой температуры, дебита скважин, технологических условий эксплуатации когенерационной установки и др.), согласно проведенным расчетам, в месте расположения добычной скважины концентрация закачиваемой холодной воды достигнет уровня в 1% через 10,5 года, а уровня в 10% – через 14,8 года. Если выбрать за допустимый показатель нормальной эксплуатации электрической части когенерационной установки возможный уровень падения потребления газа на 10%, то время эффективной электрогенерации установки составит примерно 15 лет. Эти данные необходимо учитывать при разработке ТЭО, проектировании и эксплуатации когенерационной установки.

На рис. 7 показаны термограммы распределения концентрации закачиваемой жидкости в пласте и поля температур в слое и окружающем горном массиве в координатах (x, y).

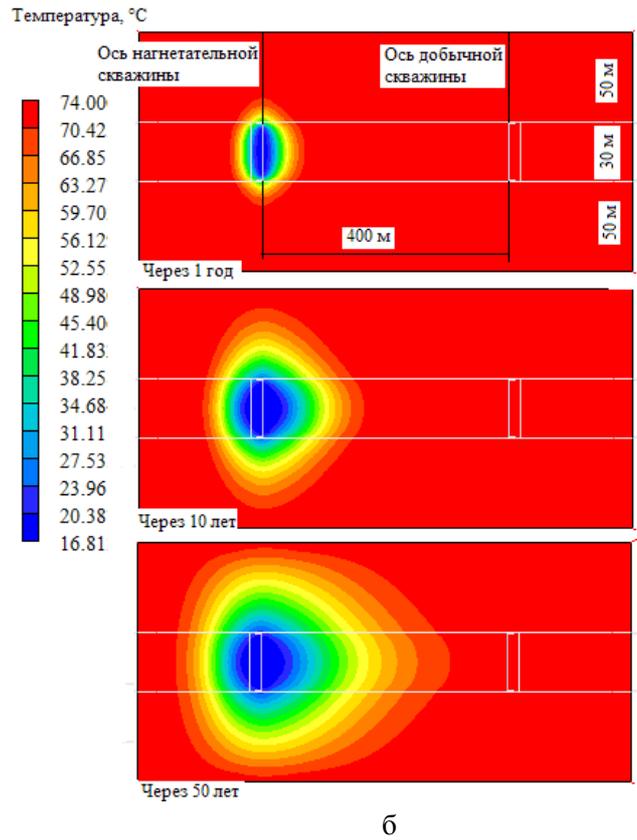
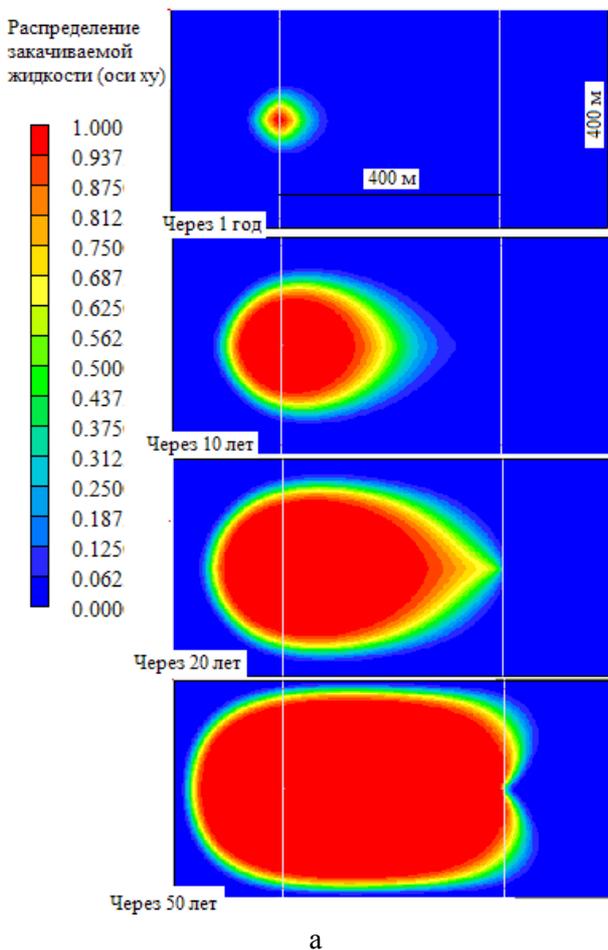


Рис. 7. Распределение концентрации закачиваемой жидкости в пласте (а) и охлаждение водоносного слоя при закачке охлажденной воды за 50 лет (б) по осям x, y.

Выводы. Проведен анализ кинетики охлаждения проницаемого коллектора и окружающего горного массива на примере реальной действующей геотермальной циркуляционной системы в поселке Медведовка (АР Крым). Исследование температурного поля системы "водоносный пласт – горный массив" показало, что по истечении определенного времени устанавливается квазистационарный режим, и высота охлажденного горного массива перестает влиять на температурный режим в коллекторе. Получены временные зависимости продвижения температурного фронта.

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 части наземного когенерационного комплекса. В связи с тем, что концентрационный фронт опережает тепловой, концентрация газа в добываемой воде начинает снижаться значительно раньше, чем ее температура. В расчетном при-

мере концентрація газу в добиваємій воді починає помітно знизятися після 10 років експлуатації, а після 30 років вона знизиться на 85%. При цьому температура добиваємій води почне знизятися після 50 років експлуатації. При проектуванні геотермальних циркуляційних систем необхідно врахувати, що період експлуатації електрогенеруючої установки буде менше по порівнянню з періодом експлуатації теплового обладнання в декілька разів (в 3-4 рази). Отримані тривимірні зображення температурних полів і динаміки розповсюдження рідини в системі "проникаємий колектор – горний масив".

1. *Басниев К.С.* Підземна гидромеханіка / Басниев К.С., Дмитрієв Н.М., Каневська Р.Д., Максимов В.М. – М.: Іжевськ, Інститут комп'ютерних досліджень, 2006. – 488 с. – (Серія "Сучасні нафтогазові технології").

2. *Шурчков А.В.* Термогидродинамічні процеси в геотермальних системах і енергоустановках: дисертація ... доктора технічних наук: 05.14.06 / Шурчков Анатолій Васильєвич. – К., 1995. – 395 с.

3. *Nield A. Donald* Convection in Porous Media / Donald A. Nield, Adrian Bedjan – 2nd ed. – New York: 1992 Springer-

Verlag New York, Inc., 1999. – 546, [10] p.

4. *Полубаринова-Кочина П.Я.* Теорія руху ґрунтових вод / П. Я. Полубаринова-Кочина. – М.: Гостоптехиздат, 1952. – 676 с.

5. *Шейдеггер А.Э.* Фізика течення рідин через пористі середовища / А.Э. Шейдеггер. – М.: Гостоптехиздат, 1960. – 250 с.

6. *Авраменко А.А.* Ренормалізаційний аналіз турбулентності в пористих середовищах // Промислова теплотехніка. – 2004. – Т. 26. – № 1. – С. 11–21.

7. *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.

8. *Баренблатт Г.И.* Теорія нестационарної фільтрації рідини і газу. / Г.И. Баренблатт, В.М. Ентов, В.М. Рыжик. – М.: Недра, 1972. – 288 с.

9. *Vafai K. and 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.

10. *Бочкарев А.А., Волков В.И.* Модель Брінкмана з урахуванням нерівномірної пористості // Изв. Алтайського гос. ун-та. – 2002. – Т. 23. – № 1. – С. 99–100. <http://izvestia.asu.ru/2002/1/phys/02.ru.html>

11. *Ingham D.B., Mamut E. and Pop I.* Governing equations for laminar flows through porous media // Proc. NATO Advanced Study Institute on Emerging Technologies and Techniques in porous media. 9-20 June, 2003. – P. 1–9.

КРИМ БУДІНДУСТРІЯ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

МІЖРЕГІОНАЛЬНА СПЕЦІАЛІЗОВАНА ВИСТАВКА

- Сучасні будівельні матеріали і технології
- Фарби, лаки
- Будівельні машини і механізми
- Вікна і двері
- Сантехніка
- Екологія, системи очищення води
- Ландшафтна і садово-паркова архітектура
- Системи опалення, вентиляції і кондиціонування
- Енергозбереження та використання нетрадиційних екологічно чистих джерел енергії
- Електротехнічне і освітлювальне обладнання
- Програмне забезпечення підприємств будівельної, енергетичної і електротехнічної галузей промисловості

2012

Осінь

25–27 жовтня

м. Сімферополь
вул. Київська, 115
СК «Дружба»



ФОРУМ
КРИМСЬКІ
ВИСТАВКИ

З питань участі у виставці звертайтеся в оргкомітет:
95011, Україна, м. Сімферополь, вул. Самокіша, 18, оф. 406
(0652) 56-06-67, 56-06-47, 54-60-66, 54-67-46
E-mail: expoforum@expoforum.crimea.ua, expo@expoforum.crimea.ua
www.expoforum.crimea.com