

УДК 532.5; 536.24

Долинский А.А.¹, Басок Б.И.¹,
Авраменко А.А.¹, Резакова Т.А.¹, Морозов Ю.П.²

¹Институт технической теплофизики НАН Украины

²Институт возобновляемых источников энергии НАН Украины

ПРОЦЕССЫ ФИЛЬТРАЦИИ ГЕОТЕРМАЛЬНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ПОРИСТОМ СЛОЕ

Розглянуто теплофізичну модель динаміки теплоносія у геотермальному пористому шарі. Одержано результати, що підтверджують адекватність запропонованої термогідродинамічної моделі.

Рассмотрена теплофизическая модель динамики движения теплоносителя в геотермальном пористом слое. Получены результаты, подтверждающие адекватность предложенной термогидродинамической модели.

The thermal physical model of the heat-carrier dynamics in geothermal porous layer is considered. Calculation results confirming adequacy of present thermohydrodynamics model.

Індекси верхніе:

c_p – теплоемкость;
 D, d – диаметр;
 G – расход;
 K – коэффициент проницаемости;
 k – коэффициент фильтрации;
 P – давление;
 R, r – радиус;
 Re – число Рейнольдса,
 t – температура;
 v, w – скорости по направлениям координат;
 v – скорость;
 z, r – координаты цилиндрической системы;
 φ – пористость;
 λ – коэффициент теплопроводности;

μ – динамический коэффициент вязкости;
 ν – кинематический коэффициент вязкости;
 ρ – плотность;
 τ – время.

Індекси нижніе:

k – критический;
 m – массив;
 f – жидкий флюид;
 s – твердое тело;
 $гр$ – грунт (засыпка);
 $ж$ – жидкость;
 $з$ – закачка;
 $пл$ – пласт;
 $о$ – начальное значение.

Введение

Природные жидкие теплоносители, в частности геотермальные воды, заключены в коллекторах, т.е. в пластах горных пород, а именно в пористых образованиях, имеющих непроницаемые кровлю и подошву. Геотермальная вода, главным образом находящаяся в пустотах (порах и трещинах) коллекторов, может пребывать в состоянии покоя или двигаться. Движение термального флюида через твердые трещиноватые или пористые среды сопровождается его фильтрацией. Фильтрация может быть обусловлена воздействием различных сил: градиентом давления, концентрации, температуры, капиллярными и др. В данной работе рассматривается фильтрационное течение, вызываемое действием градиента давления.

Постановка задачи. Теплофизическая модель гидродинамики и теплообмена в подземном коллекторе

Принимаем, что подземный коллектор геотермальной циркуляционной системы (ГЦС) [1] представляет собой пористый слой, снизу и сверху окруженный двумя бесконечными параллельными, горизонтально расположенными непроницаемыми горными массивами. Пористая среда представляет собой систему твердых частиц (предполагаем, что сферической формы) с пустотами и порами между ними. В пласт заделаны две скважины с трубными системами для транспорта геотермальной воды: одна скважина – для забора и подъема воды, вторая – для возврата и нагнетания под давлением отработанной воды обратно в пласт.

В результате отбора нагретой жидкости через подъемную скважину и закачки холодной жидкости через нагнетательную скважину в коллекторе возникает движение жидкости в направлении от нагнетательной скважины к подъемной. Рассматривается двумерный плоскопараллельный поток между двумя скважинами. В модели используется предположение о сплошности потока, когда жидкость заполняет весь объем пористой среды, включая пространство, заполненное скелетом породы. Природное фильтрационное движение теплоносителя в коллекторе, обусловленное геологическими процессами, происходит с очень малыми скоростями, порядка миллиметров и даже микрометров за секунду.

В связи с тем, что из коллектора отбирается нагретая вода, а под действием внешнего давления закачивается холодная, в нем возникают нестационарные поля температур и давлений. В зоне фильтрации образуются несколько фронтов: фронт температурных возмущений, гидродинамический фронт и фронт изменения концентрации вновь поступающей жидкости, которые перемещаются с различной скоростью. В начальный период времени до закачки отработанной жидкости, в пласте реализуется природное установившееся фильтрационное движение нагретой жидкости с температурой $t_{пл}$. Начальное распределение температур в пласте и окружающем горном массиве стационарное. В нагнетательную скважину начинает закачиваться холодная жидкость с температурой $t_3 < t_{пл}$ и постоянным расходом G . Распределение температуры в коллекторе начинает изменяться, у нагнетательной скважины образуется охлажденная цилиндрическая зона, протяженность которой постоянно увеличивается. Вся область коллектора между скважинами разделяется на три зоны с различными законами изменения температуры: у нагнетательной скважины коллектор охлаждается до температуры закачиваемой жидкости t_3 , у подъемной скважины коллектор имеет начальную температуру $t_{пл}$ и в промежуточной зоне температура коллектора изменяется от t_3 до $t_{пл}$. Протяженность охлажденной зоны постоянно возрастает, протяженность зоны с температурой $t_{пл}$ постоянно уменьшается, а зона изменения температуры перемещается по коллектору при незначительном изменении ее протяженности.

При нагнетании в подземный пласт холодной жидкости в процесс теплообмена вовлекается не только жидкость и твердый скелет проницаемого слоя, но и окружающий пласт горный массив. Поскольку нагревание закачиваемой жидкости происходит за счет отбора теплоты, аккумулированной твердым скелетом пласта и окружающим скелетом, то процесс носит нестационарный характер. В общем случае процессы теплопереноса при закачке в подземные пласты холодной жидкости отличаются значительной сложностью, т.к. перенос теплоты осуществляется несколькими механизмами в сложной гетерогенной двухфазной системе. При фильтрации жидкости через проницаемый слой между потоком и частицами твердого скелета, а также между жидкостью и окружающим пласт горным массивом происходит конвективный теплообмен. Кроме того, в фильтрующейся жидкости происходит перенос теплоты теплопроводностью в продольном и поперечном направлениях. Охлаждение частиц твердого скелета пласта и окружающего горного массива происходит 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 роль естественной конвекции может быть существенной.

Таким образом, в подземном коллекторе действуют следующие механизмы теплопереноса: конвекция (вынужденная и естественная) в потоке фильтрующейся жидкости, конвективный теплообмен на границах частица-жидкость и горный массив-жидкость, теплопроводность в объеме частиц, теплопроводность в бесконечном горном массиве, контактный теплообмен между частицами, теплопроводность в потоке жидкости.

Моделирование исследуемых процессов

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 капилляров. В качестве характеристики движения принимается число Рейнольдса $Re = \frac{vd}{\nu}$. Преобразовывая это выражение для условий фильтрации в грунте, его можно представить в виде [2]:

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

Критические значения числа Re находятся в пределах $0,1 < Re_k < 10$ [2-5], в этом случае движение жидкости подчиняется закону Дарси:

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

где v – скорость жидкости, представляющей собой некий гипотетический флюид, движущийся в свободной (непористой) среде. В цилиндрических координатах уравнение для поля давлений в проницаемом слое будет иметь вид

$$\nabla^2 P = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial P}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = 0, \quad (3)$$

Табл. 1. Пористость, проницаемость и коэффициент фильтрации некоторых пород

Порода	Пористость, ϕ , %	Проницаемость, K , м ²	Коэффициент фильтрации, k , м/сутки
Гравий	20...50	$10^{-7} \dots 10^{-9}$	10,0
Песок	37...50	$10^{-9} \dots 10^{-12}$	0,1 ... 5,0
Глинистый грунт	40...55	$10^{-13} \dots 10^{-16}$	< 0,001

Закон Дарси показывает, что между потерей напора и расходом существует линейная зависимость. С повышением скорости движения жидкости, которое может наблюдаться, например, в прискваженной 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 [2, 3, 6, 7]:

$$\nabla P = -\frac{\mu}{K} v - c_F K^{-1/2} \rho_f |v| v, \quad (5)$$

где c_F – универсальный параметр, определяемый равенством [2, 7]: $c_F = 0,55 \left(1 - 5,5 \frac{d}{D_e} \right)$, D_e –

где K – коэффициент проницаемости, μ – коэффициент динамической вязкости. Величина $K/\mu = k$ – коэффициент пропорциональности или коэффициент фильтрации. Он характеризует и пористую среду и жидкость одновременно. Величина k зависит от формы частиц, степени шероховатости их поверхности, пористости среды, вязкости жидкости.

Коэффициент проницаемости является параметром, характеризующим фильтрационные свойства подземных коллекторов. Связь коэффициента проницаемости с пористостью выражается формулой Козени [3]:

$$K = \frac{d^2 \phi^3}{180(1-\phi)^2}, \quad (4)$$

где d – диаметр частиц, ϕ – пористость среды. В табл. 1 представлены значения пористости ϕ , проницаемости K и коэффициента фильтрации k некоторых пород [2,4].

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, дополнением уравнения Дарси является уравнение Бринкмана [2]:

$$\nabla P = -\frac{\mu}{K} v + \tilde{\mu} \nabla^2 v, \quad (6)$$

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

С учетом вышеизложенного полное уравнение движения фильтрационного потока запишется в виде

$$\rho_f \left[\frac{1}{\phi} \frac{\partial v}{\partial \tau} + \frac{1}{\phi} \nabla \left(\frac{v\nu}{\phi} \right) \right] = -\nabla P + \frac{\mu}{\phi \rho_f} \nabla^2 v - \frac{\mu}{K} v - \frac{c_F \rho_f}{K^{1/2}} |v|v \quad (7)$$

2. Уравнение неразрывности для фильтрационного потока в проницаемой среде

$$\frac{\partial(v\rho)}{\partial r} + \frac{\partial(w\rho)}{\partial z} + \frac{v}{r} = 0. \quad (8)$$

3. Уравнения энергии.

Уравнения для теплообмена в процессах фильтрации жидкости в пласте записываются для каждой из фаз [8-10]:

$$\phi(\rho c_p)_f \frac{\partial T_f}{\partial \tau} + (\rho c_p)_f v \nabla T_f = \phi \nabla (\lambda_f \nabla T_f) + \phi q_f^m, \quad (9)$$

$$(1-\phi)(\rho c)_s \frac{\partial T_s}{\partial \tau} = (1-\phi) \nabla (\lambda_s \nabla T_s) + (1-\phi) q_s^m. \quad (10)$$

Если принять, что $T_s = T_f = T$, уравнение сохранения энергии для всего пласта будет следующим [9, 11]:

$$(\rho c)_m \frac{\partial T}{\partial \tau} + (\rho c)_f v \nabla T = \nabla (\lambda_m \nabla T), \quad (11)$$

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

Результаты расчетов

Для проверки адекватности теплофизической модели реальному физическому процессу в проницаемом пласте воспользуемся экспериментальными данными, полученными в работе [11]. В ней представлены результаты экспериментальных исследований нестационарного охлаждения грунтового массива (состоящего из калиброванной гранитной крошкой мелких фракций – около 4 мм в диаметре) при прокачке через круглую трубу (аналог скважины) холодного теплоносителя (технической воды). Геометрические параметры установки, теплофизические свойства грунта и теплоносителя, а также

режимы экспериментов подробно описаны в [11] и полностью были сохранены при выполнении расчетов по модели (7) – (11).

Модель проницаемого пласта представляла собой теплоизолированный металлический герметичный теплоизолированный короб размером 3000×3000×110 мм, заполненный калиброванной гранитной крошкой. В коробе размещены 25 вертикальных скважин, расположенных по равномерной прямоугольной сетке (600×600 мм). Пласт со всех сторон окружен слоем теплоизоляции. Схема размещения модельных скважин и встроенных в каждую из них трех термопар (с соответствующими номерами) представлена на рис. 1. Согласно схемы экспериментальной установки вода через вентиль поступает в электронагреватель для предварительного нагрева. Нагретый теплоноситель с постоянной температурой с помощью насоса поступает в нагнетательную трубу и далее поступает в проницаемый слой по специально выбранной скважине. Теплофизические свойства пласта: плотность $\rho=2500$ кг/м³, удельная теплоемкость $c_p=0,905$ кДж/кг·К, коэффициент теплопроводности $\lambda=2,50$ Вт/м·К. Эксперименты проводились так, что вначале прогревался проницаемый слой путем длительной прокачки через него горячей воды. Слой прогревался до температуры 35...45 °С. Затем через нагнетательную скважину закачивался холодный теплоноситель. Измерение температуры в пласте проводились по всей протяженности и высоте пласта с помощью 64 термопар. Схема расположения скважин и термопар, а также их номера показаны на рис. 1. Исследование температурного поля в пласте при движении теплоносителя через скважины проводились для нескольких гидродинамических схем, отличающихся расположением нагнетательной и сливных (заборных скважин). При численном моделировании были выбраны две гидродинамические схемы: двухточечная (ввод теплоносителя по одной скважине №3 на рис. 1, а и вывод из одной скважины, №48 на рис. 1, а) и пятиточечная (ввод теплоносителя по одной центральной скважине №6 на рис. и вывод из четырех скважин, №1, 5, 7, 9 на рис. 1, б). Для двухточечной схемы эксперимент проводился при расходе $G = 6,47 \cdot 10^{-2}$ кг/с, а для пятиточечной – при расходе $G = 3,64 \cdot 10^{-2}$ кг/с.

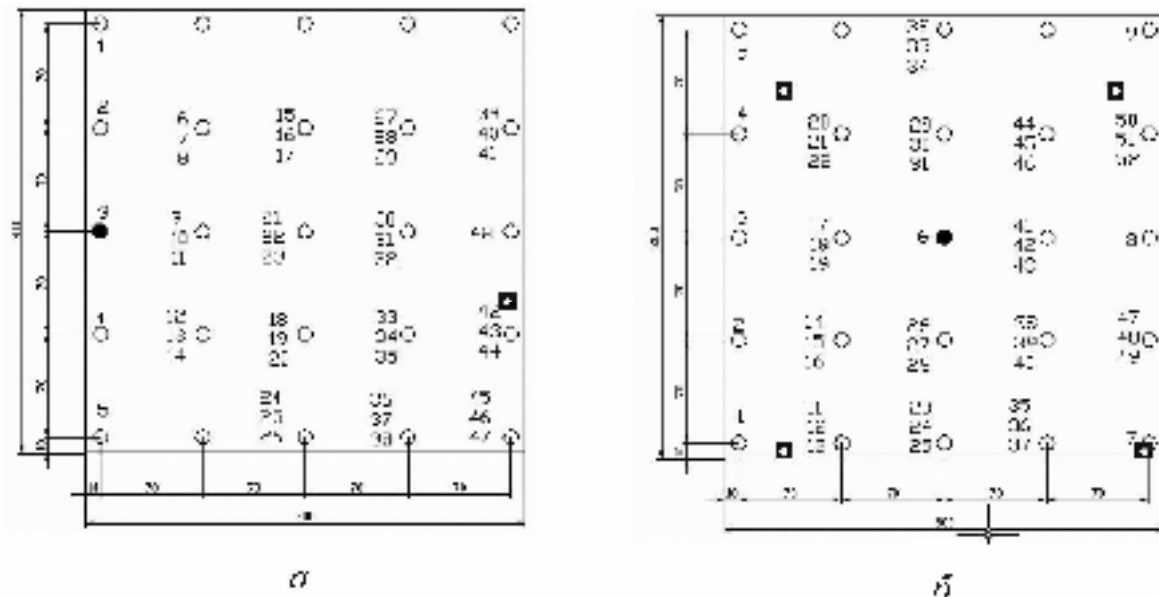


Рис. 1. Схема установки термонар, нагнетательных и выводящих скважин:

а – двухточечная схема; б – пятиточечная схема. ● – нагнетательная труба, ■ – выводящая труба.

При численном моделировании процесса фильтрации по двухточечной схеме соблюдались следующие условия. Засыпка гравием вначале прогрета до температуры 37,0 °С, через нагнетательную скважину № 3 закачивается теплоноситель с температурой 15,3 °С и расходом $G = 6,47 \cdot 10^{-2}$ кг/с. На рис. 2 представлена геометрия расчетной области, где стороны 1 и 2 совпадают с осями, соответственно, нагнетательной и выводящей скважин.

Начальные и граничные условия при решении системы уравнений (7) – (11) следующие: $\tau = 0$; $t_{гр,о} = 37,0$ °С; $t_{ж,о} = 15,3$ °С; средняя скорость нагнетания жидкости $v = 0,00187$ м/с; вертикальный градиент $\partial t / \partial z = 0$; все стенки короба адиабатически изолированы; пространственные переменные изменялись в пределах: $0 < r < 2,80$ м; $0 < z < 0,11$ м. Радиус трубы перфорированной входной и выводной скважины составлял 1,00 мм.

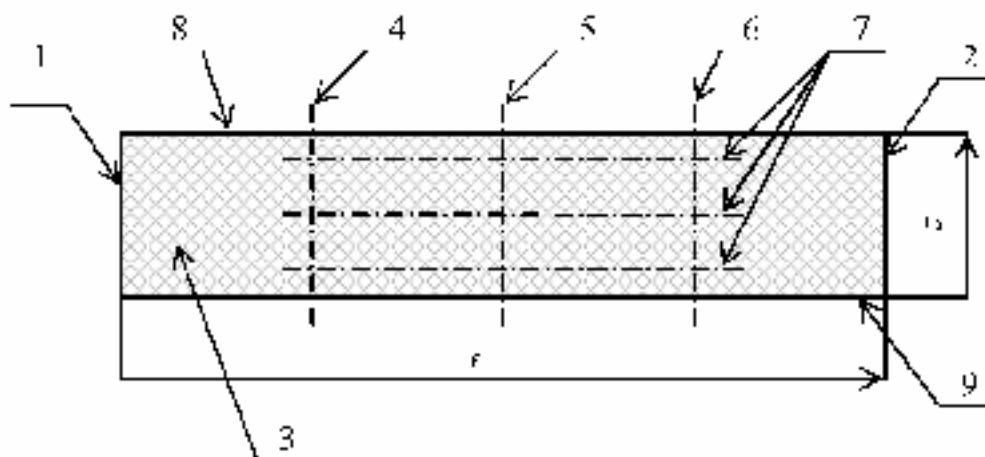


Рис. 2. Геометрия расчетной области: 1 – ось симметрии входной скважины; 2 – ось выходной скважины; 3 – проницаемый слой; 4, 5, 6, 7 – оси, где на их пересечении расположены термонары; 8, 9 – тепло- и гидроизоляционный слой.

Экспериментально в [12] получен массив данных по изменению температуры грунта во времени в 45 точках засыпки при фильтрации холодной жидкости через предварительно нагретую засыпку. При численном решении уравнений (7) – (11) независимо от проведенного эксперимента определены изменения температуры в этих же точках. На рис. 3 представлены расчетные и экспериментальные графики изменения температуры грунта в точках,

соответствующих схеме на рис. 1, а и рис. 2, в радиальном направлении при различных высотах слоя засыпки, а именно: рис 3, а – изменение температуры в верхней части грунта ($z=85,0$ мм), в точках расположения термопар 9, 21, 30 ($r=700$ мм, 1400 мм и 2100 мм соответственно), рис. 3, б – средний ряд термопар ($z=55,0$ мм) – точки 10,22,31, рис. 3, в – нижний ряд термопар ($z=25,0$ мм), точки 11, 23, 32.

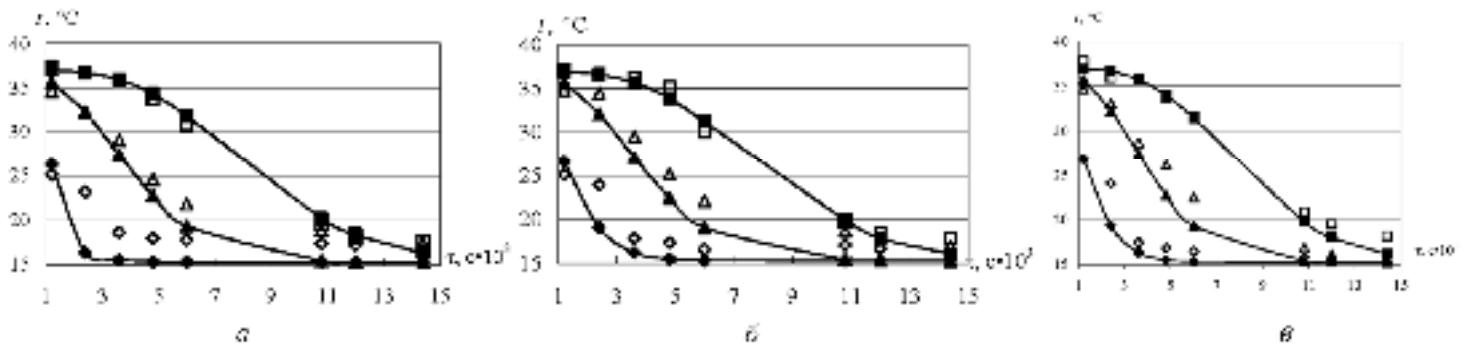


Рис. 3. Сопоставление экспериментальных и расчетных данных изменения температуры грунта в точках:
 9, 10,11: \blacklozenge – расчет, \diamond – эксперимент; 21, 22, 23: \blacktriangle – расчет, \triangle – эксперимент;
 30, 31, 32: \blacksquare – расчет, \square – эксперимент.

На рис. 4 показаны и сопоставлены результаты расчета и эксперимента в точках расположенных в вертикальных сечениях. Рис.4, а – это точки 9, 10, 11, которые находились ближе всего к зака-

чиваемой скважине. Рис. 4, б – точки 21, 22, 23 – среднее расстояние, и рис. 4, в – точки 30, 31, 32 наиболее удаленные от закачиваемой скважины.

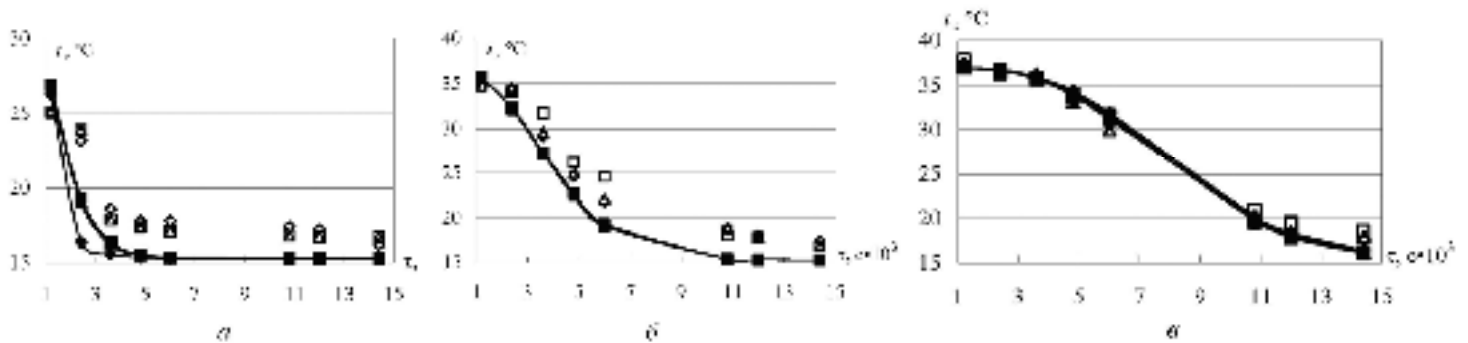


Рис. 4. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных изменения температуры грунта по вертикальной оси.
 9, 21, 30: \blacklozenge – расчет, \diamond – эксперимент; 10, 22, 31: \blacktriangle – расчет, \triangle – эксперимент;
 11, 23, 32: \blacksquare – расчет, \square – эксперимент.

Из приведенных графиков видно удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных результатов, наибольшая расхожимость составила до 5 %. Заметим, что расчетные данные пока-

зывают, что возле закачиваемой скважины грунт охлаждался быстрее.

При расчете пятиточечной схемы (рис. 1, б) соблюдались экспериментальные условия: грунт

прогревался до 41,0 °С ($t_{гр,о}=41,0$ °С), вода закачивалась через скважину № 6 с температурой $t_{ж,о}=15,3$ °С, расход воды составлял $G = 3,64 \cdot 10^{-2}$ кг/с. Измерения проводились в точках расположения термопар 12, 15, 18 (рис. 1, б) при $z=55,0$ мм. На рис. 5 представлены результаты сопоставления расчетных и экспериментальных данных, где максимальная расхожимость составляет до 6 %.

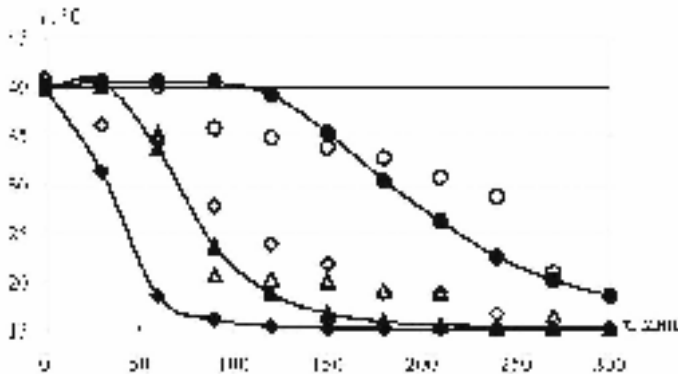


Рис. 5. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных изменения температуры грунта в точках:
 18: \blacklozenge – расчет, \diamond – эксперимент;
 15: \blacktriangle – расчет, \triangle – эксперимент;
 12: \bullet – расчет, \circ – эксперимент.

Выводы

Из проведенного сопоставления расчетных и экспериментальных данных следует, что около 70% экспериментальных точек соответствуют теоретическим значениям в пределах расхождений $\Delta t = \pm 1,5$ °С. Полученные результаты подтверждают адекватность предложенной термогидродинамической модели фильтрации теплоносителя в пористом слое, что может служить основанием для расчета процесса фильтрации в реальном геотермальном коллекторе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шурчков А.В. Термогидродинамические процессы в геотермальных системах и энергоустановках. Автореф. дис. докт. техн. наук – Киев: 1995.– 31 с.
2. Donald A., Nield, A. Bejan Convection in Porous Media.–Springer: 2006.– 60 p.

3. Шейдеггер А.Э. Физика течения жидкостей через пористые среды.– М.: Гостоптехиздат, 1960.– 249 с.
4. Авраменко А.А. Ренормализационный анализ турбулентности в пористых средах //Промышленная теплотехника. – 2004. – 26, № 1.– С. 11–21.
5. Полубаринова – Кочина П.Я. Теория движения грунтовых вод. – М.: Гостоптехиздат, 1952.– 676 с.
6. Басниев К.С., Дмитриев Н.М., Каневская Р.Д., Максимов В.М. Подземная гидромеханика. – ИКИ, 2006.– 488 с.
7. Баренблатт Г. И., Ентов В.М., Рыжик В.М. Движение жидкостей и газов в природных пластах. – М: Недра, 1984. – 211 с.
8. D. Nield, S. Junqueira, J. Lage Forced convection in a fluid-saturated porous-medium channel with isothermal or isoflux boundaries //J. Fluid Mech. –1996. vol.322. – P.P. 201 – 214.
9. K. Vafai, S.J. Kim. Forced convection in channel filled with a porous medium: an exact solution. //Journal of Heat Transfer. – 1989. vol. 111. – P.P. 1103 – 1106.
10. Derek Ingham. Governing equations for laminar flows through porous media. Proc. of the NATO Advanced Study Institute on Emerging Technologies and Techniques in porous media, 9–20 June 2003, P.P. 1 – 9.
11. Чарный И.А. Подземная гидрогазодинамика. – М: Гостоптехиздат, 1963.– 396 с.
12. Морозов Ю. П. Исследование нестационарного теплообмена в геотермических котлах. Диссертация на соискание ученой степени кандидата техн. наук. Киев: 1979.

Получено 15.06.2009 г.