

Э.И. Богуславский, Н.Н. Смирнова, С.В. Егоров

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА ТЕПЛА
В ТЕПЛООБМЕННОЙ СИСТЕМЕ, РАЗМЕЩЕННОЙ
В НЕПРОНИЦАЕМОМ ПОРОДНОМ МАССИВЕ**

Семинар № 15

Поиск технологий позволяющих использовать энергию источников, альтернативных общепринятым ресурсам: природного топлива, ядерной энергии, гидроресурсам является в последнее время приоритетным направлением развития отечественной фундаментальной и прикладной наук. В этой связи, интерес к технологиям, позволяющим извлекать и утилизировать теплоту геотермальных источников, остается стабильно высоким.

Широкое распространение в настоящее время получили приповерхностные геотермальные системы. Такие технологии позволяют создавать автономные установки теплоснабжения помещений индивидуального и коммунального характера.

Физическая модель задачи о кондуктивном теплообмене. Данная работа приводит результаты математического моделирования процесса кондуктивного теплообмена в приповерхностных геотермальных установках.

Принципиальное устройство скважинного теплообменника приповерхностной геотермальной установки представляет собой U – образную трубку, помещенную в скважину, находящуюся в неограниченном непроницаемом массиве горных пород (рис. 1 и 2). Между стенкой обсадной колонны скважины и трубой находится

слой засыпки. Теплофизические свойства засыпки практически не отличаются от свойств породного массива. Теплоноситель движется по трубе со скоростью u . Теплообмен происходит во время движения теплоносителя вниз по трубе. На рис. 2 этот участок отмечен незаштрихованной областью. Заштрихованная часть трубы соответствует теплоизолированному участку, на котором теплообмен с окружающей средой отсутствует. Теплоноситель поступает в трубу с температурой ниже температуры окружающих пород. На начальном не теплоизолированном участке он нагревается и через теплоизолированный участок возвращается наверх.

Интерес представляет процесс теплообмена носителя с окружающей средой при его движении вниз по нетеплоизолированному участку трубы. Тепловым сопротивлением стенки трубы пренебрегаем. Поскольку скважина окружена практически неограниченным породным массивом, его теплообмен с потоком теплоносителя, движущегося по трубе теплообменника, является нестационарным, с постепенно убывающей интенсивностью теплопереноса в зоне теплоотбора. Амплитуда, температурного возмущения затухает по мере удаления от границ раздела твердой и жидкой фаз.

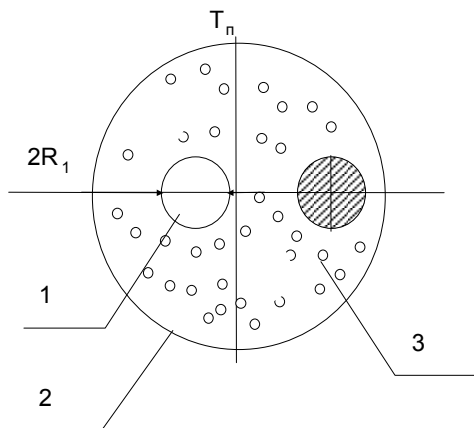


Рис. 1. Поперечное сечение приповерхностной геотермальной установки: 1 - нагнетательная труба, 2 - скважина, 3 - засыпка между трубой и скважиной (песок-вода), R_1 - радиус нагнетательной трубы, $T_{п}$ - температура пород

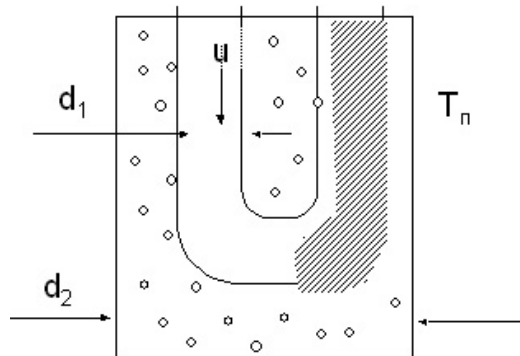


Рис. 2. Продольное сечение приповерхностной геотермальной установки: d_1 - диаметр нагнетательной трубы, d_2 - диаметр скважины, u - скорость течения теплоносителя, $T_{п}$ - температура пород

Постановка задачи о кондуктивном теплообмене. Рассмотрим цилиндрический канал помещенный в среду с постоянной температурой $T_{п} = const$ (рис. 3). На внутренней границе с радиусом R_1 происходит теплообмен. Среда (массив горных пород) непроницаема. Теплообмен на границе цилиндра и среды подчиняется закону Ньютона (граничные условия III рода) [1]. Температура теплоносителя $t(x, \tau)$ зависит от координаты x отсчитываемой вдоль канала и от времени τ . На входе в канал при $x = 0$ температура задается постоянной и равной $t(0, \tau) = t_0 = const$. В начальный момент времени температура теплоносителя в канале равна температуре окружающей среды $t(x, 0) = T_{п}$.

Внутри канала осуществляется конвективный перенос тепла в жидкости. В массиве горных пород - кондуктивный перенос тепла. В любой момент времени τ в массиве горных пород имеется нестационарное распределение температуры $T = T(x, r, \tau)$ по радиусу r и по длине x , которое подлежит определению.

В канале - нестационарное распределение температуры теплоноси-

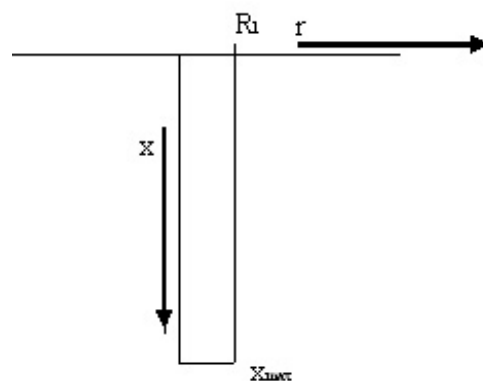


Рис. 3. Схема теплообменника приповерхностной геотермальной установки: x - вертикальная координата, r - радиальная координата

теля $t = t(x, \tau)$ по длине x , которое также подлежит определению. Отметим, что зависимость температуры в канале от расстояния до центра канала не учитывалось.

Математическая модель процесса кондуктивного теплообмена. В этом случае дифференциальное уравнение для температуры теплоносителя в трубе запишется [2,3]:

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} + u \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} = \frac{\sigma}{c_1 \rho_1} \alpha_1 (t(x, \tau) - T(R_1, x, \tau)). \quad (1)$$

Дифференциальное уравнение для температуры в массиве горных пород, определяется уравнением теплопроводности, которое в цилиндрических координатах имеет вид:

$$\frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\lambda_2}{\rho_2 c_2} \left(\frac{\partial^2 T(x, r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r} \right) \quad (2)$$

Начальное условие

$$t(0, \tau) = t_0, \quad T(x, r, 0) = T_{II}$$

Граничное условие

$$-\lambda_2 \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_1} = \alpha_1 (t - T) \Big|_{r=R_1}$$

Здесь u – скорость течения теплоносителя по трубе, $\sigma = 2/R_1$ отношение площади поверхности теплоносителя к его объему, R_1 – радиус трубы, α_1 – коэффициент теплоотдачи границы раздела теплоносителя и породы который определяется геометрическими характеристиками системы и тепловыми свойствами засыпки, ρ_1, c_1 – плотность и теплоемкость теплоносителя, τ – время, t – текущая температура теплоносителя, T – температура в массиве горных пород, x – координата вдоль трубы, r – текущий радиус, λ_2, c_2, ρ_2 – теплопроводность,

удельная теплоемкость и плотность пород в массиве.

Так как теплообмен между теплоносителем и массивом начинается с момента прихода гидродинамической волны в данную точку с координатой x , перейдем в систему отсчета $x, \tau^* = \tau - x/u$.

В новых координатах система дифференциальных уравнений и граничных и начальных условий запишется в следующем виде:

$$u \frac{\partial t(x, \tau^*)}{\partial x} = \frac{\sigma}{c_1 \rho_1} \alpha_1 (t(x, \tau^*) - T(R_1, x, \tau^*)) \quad (3)$$

$$\frac{\partial T(x, r, \tau^*)}{\partial \tau^*} = \frac{\lambda_2}{\rho_2 c_2} \left(\frac{\partial^2 T(x, r, \tau^*)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(x, r, \tau^*)}{\partial r} \right) \quad (4)$$

граничное условие на границе пород

$$-\lambda_2 \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_1} = \alpha_1 (t - T) \Big|_{r=R_1}, \quad (5)$$

начальное

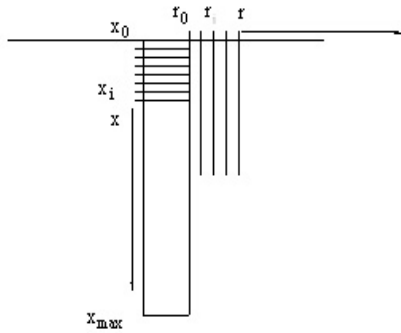
$$t(0, \tau) = t_0, \quad T(x, r, 0) = T_{II}$$

условие

$$(6)$$

Численное моделирование процесса кондуктивного теплообмена. Моделирование процесса кондуктивного теплообмена заключалось в согласованном численном решении системы дифференциальных уравнений (3),(4) с граничным условием (5) и начальным условием (6).

На рис. 4 приводится сетка численной задачи. Труба вертикально расположена в породе. Координата x отсчитывается вдоль трубы в вертикальном направлении, координата r отсчитывается в горизонтальном направлении. Индекс нумерующий узлы сетки по оси x обозначим i , а индекс нумерующий узлы сетки вдоль оси r – j , индекс нумерующий моменты времени обозначим k . Начальная точка оси x соответствует по-



верхности земли и обозначается x_0 , конечная точка соответствует концу трубы и обозначается x_{max} . Длина трубы соответствует не теплоизолированному участку трубы теплообменника. Начальная точка вдоль оси r соответствует стенке трубы и обозначается r_0 . Шаги сетки вдоль оси x и вдоль оси r обозначаются Δx и Δr соответственно и задаются независимо. Процедура перехода к конечным разностям аналогична той, что описана в [4].

Первое уравнение решаемой системы, будучи записано в конечных разностях, имеет вид:

$$u \frac{(t(x_{i+1}, \tau_k^*) - t(x_i, \tau_k^*))}{\Delta x} = \frac{\sigma}{c_1 \rho_1} \alpha_1 (t(x_i, \tau_k^*) - T(x_i, r_0, \tau_k)) \quad (7)$$

второе уравнение:

$$\frac{T(x_i, r_j, \tau_{k+1}^*) - T(x_i, r_j, \tau_k^*)}{\Delta \tau^*} = \frac{\lambda_2}{\rho_2 c_2} \times \left(\frac{T(x_i, r_{j+1}, \tau_k^*) - 2T(x_i, r_j, \tau_k^*) + T(x_i, r_{j-1}, \tau_k^*)}{\Delta r^2} + \frac{1}{r_j} \frac{T(x_i, r_{j+1}, \tau_k^*) - T(x_i, r_j, \tau_k^*)}{\Delta r} \right) \quad (8)$$

Граничное условие принимает вид:

$$-\lambda_2 \frac{(T(x_i, r_1, \tau_k^*) - T(x_i, r_0, \tau_k^*))}{\Delta r} = \alpha_1 (t(x_i, \tau_k^*) - T(x_i, r_0, \tau_k)) \quad (9)$$

Рис. 4. Сетка математической численной модели процесса кондуктивного теплообмена

Начальные условия принимают вид:

$$t(x_0, \tau_k^*) = t_0 \text{ при любых } k, \quad T(x_i, r_j, \tau_0^*) = T_{II} \text{ при любых } i, j.$$

Из первого уравнения данной системы мы можем получить:

$$t(x_{i+1}, \tau_k^*) = \frac{\sigma \Delta x}{c_1 \rho_1 u} \alpha_1 (t(x_i, \tau_k^*) - T(x_i, r_0, \tau_k)) + t(x_i, \tau_k^*) \quad (10)$$

из второго:

$$T(x_i, r_j, \tau_{k+1}^*) = \frac{\lambda_2 \Delta \tau^*}{\rho_2 c_2} \times \left(\frac{T(x_i, r_{j+1}, \tau_k^*) - 2T(x_i, r_j, \tau_k^*) + T(x_i, r_{j-1}, \tau_k^*)}{\Delta r^2} + \frac{1}{r_j} \frac{T(x_i, r_{j+1}, \tau_k^*) - T(x_i, r_j, \tau_k^*)}{\Delta r} \right) + T(x_i, r_j, \tau_k^*) \quad (11)$$

Граничное же условие дает нам:

$$T(x_i, r_0, \tau_k^*) = T(x_i, r_1, \tau_k^*) + \alpha_1 \frac{\Delta r}{\lambda_2} (t(x_i, \tau_k^*) - T(x_i, r_0, \tau_k)) \quad (12)$$

Эти формулы позволяют моделировать временную динамику температурного поля пород сопровождающую движение теплоносителя в трубе а также моделировать изменение температуры самого теплоносителя по мере его движения. Процесс непрерывного перемещения теплоносителя дискретизируется. Считаем, что теплоноситель двигается вдоль оси X дискретно с шагом Δx . При этом температура теплоносителя меняется, и это изменение задается формулой (10). Сопутствующее

изменение температуры стенки трубы дается формулой (12). По формуле (11) рассчитывается изменение во времени температуры в массиве пород. При этом шаг по времени $\Delta\tau^*$ берется равным интервалу продвижения фронта теплоносителя на величину Δx . Скорость теплоносителя равна u . Отсюда имеем $\Delta\tau^* = \Delta x / u$.

Изначально температура массива пород равна T_{II} . Это дает возможность рассчитать изменение температуры теплоносителя при первоначальном прохождении гидравлического фронта по трубе по формуле (10). Очевидно, что эффективное время τ_k^* будет одинаково для всех точек x_i ($i=0, 1, \dots, i_{\max}$), здесь i_{\max} определяется числом шагов по сетке и задается произвольно. Поскольку это τ_k^* соответствует моменту прихода фронта теплоносителя и началу процесса теплообмена на уровне x_i , логично обозначить его τ_0^* . Тогда температура в трубе получается по формулам:

$$\begin{aligned} t(x_1, \tau_0^*) &= \\ &= \frac{\sigma \Delta x}{c_1 \rho_1 u} \alpha_1 (t(x_0, \tau_0^*) - T(x_0, r_0, \tau_0^*)) + t(x_0, \tau_0^*) \\ t(x_2, \tau_0^*) &= \frac{\sigma \Delta x}{c_1 \rho_1 u} \alpha_1 (t(x_1, \tau_0^*) - \\ &- T(x_1, r_0, \tau_0^*)) + t(x_1, \tau_0^*) \\ t(x_N, \tau_0^*) &= \frac{\sigma \Delta x}{c_1 \rho_1 u} \alpha_1 (t(x_{N-1}, \tau_0^*) - \\ &- T(x_{N-1}, r_0, \tau_0^*)) + t(x_{N-1}, \tau_0^*) \end{aligned} \quad (13)$$

Здесь N – число узлов на оси X . Температура $T(x_i, r_0, \tau_0^*)$ берется равной T_{II} при любом i . Зная распределение по глубине температуры в трубе можно рассчитать распределение по глубине температуры стенки (формула 12).

$$\begin{aligned} T(x_0, r_0, \tau_0^*) &= T(x_0, r_1, \tau_0^*) + \\ &+ \alpha_1 \frac{\Delta r}{\lambda_2} (t(x_0, \tau_0^*) - T(x_0, r_0, \tau_0^*)) \\ T(x_1, r_0, \tau_0^*) &= T(x_1, r_1, \tau_0^*) + \\ &+ \alpha_1 \frac{\Delta r}{\lambda_2} (t(x_1, \tau_0^*) - T(x_1, r_0, \tau_0^*)) \\ T(x_N, r_0, \tau_0^*) &= T(x_N, r_1, \tau_0^*) + \\ &+ \alpha_1 \frac{\Delta r}{\lambda_2} (t(x_N, \tau_0^*) - T(x_N, r_0, \tau_0^*)) \end{aligned} \quad (14)$$

Зная изменение температуры стенки трубы рассчитываем изменение температуры массива (11):

$$\begin{aligned} T(x_0, r_j, \tau_1^*) &= \frac{\lambda_2 \Delta \tau^*}{\rho_2 c_2} \times \\ &\times \left(\frac{T(x_0, r_{j+1}, \tau_0^*) - 2T(x_0, r_j, \tau_0^*) + T(x_0, r_{j-1}, \tau_0^*)}{\Delta r^2} + \right. \\ &+ \left. \frac{1}{r_j} \frac{T(x_0, r_{j+1}, \tau_0^*) - T(x_0, r_j, \tau_0^*)}{\Delta r} \right) + T(x_0, r_j, \tau_0^*) \\ T(x_1, r_j, \tau_1^*) &= \frac{\lambda_2 \Delta \tau^*}{\rho_2 c_2} \times \\ &\times \left(\frac{T(x_1, r_{j+1}, \tau_0^*) - 2T(x_1, r_j, \tau_0^*) + T(x_1, r_{j-1}, \tau_0^*)}{\Delta r^2} + \right. \\ &+ \left. \frac{1}{r_j} \frac{T(x_1, r_{j+1}, \tau_0^*) - T(x_1, r_j, \tau_0^*)}{\Delta r} \right) + T(x_1, r_j, \tau_0^*) \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} T(x_N, r_j, \tau_1^*) &= \frac{\lambda_2 \Delta \tau^*}{\rho_2 c_2} \times \\ &\times \left(\frac{T(x_N, r_{j+1}, \tau_0^*) - 2T(x_N, r_j, \tau_0^*) + T(x_N, r_{j-1}, \tau_0^*)}{\Delta r^2} + \right. \\ &+ \left. \frac{1}{r_j} \frac{T(x_N, r_{j+1}, \tau_0^*) - T(x_N, r_j, \tau_0^*)}{\Delta r} \right) + T(x_N, r_j, \tau_0^*) \end{aligned}$$

Значение индекса j определяется числом шагов по оси r . В итоге мы получаем распределение температуры в массиве пород на 1-м шаге по времени. Шаг по времени берется равным $\Delta\tau^* = \Delta x / u$. Отметим, что формулы 15 могут быть применены к любому узлу

сетки в массиве пород кроме первого и последнего узла. Первый узел сетки соответствует стенке ее температура рассчитывается с помощью формул (14). В последнем узле температура приравнивается к температуре пород. По окончании этих вычислений мы имеем распределение температуры теплоносителя в трубе и температурное поле в породе через время $\Delta\tau^* = \Delta x/u$ после прохождения фронта теплоносителя. Следующий шаг аналогичен описанному выше, но при этом на входе его используется распределение температуры полученное на выходе предыдущего. Этот процесс повторяется произвольное заданное число раз.

Восстановление температурного поля. Нами также рассматривалась задача обратная задаче охлаждения пород при прокачке теплоносителя через нагнетательную трубу, а именно восстановление температурного поля пород после остановки прокачки теплоносителя. В этом случае происходит нагрев пород в зоне прилегающей к нагнетательной трубе теплообменника под действием теплообмена с породами удаленными от нее и не подвергшимися охлаждению.

В этом случае поведение системы описывается следующими уравнениями:

уравнение теплопроводности для теплоносителя в трубе

$$\frac{\partial t(x, r, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\lambda_1}{\rho_1 c_1} \left(\frac{\partial^2 t(x, r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t(x, r, \tau)}{\partial r} \right) \quad (16)$$

уравнение теплопроводности пород:

$$\frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\lambda_2}{\rho_2 c_2} \left(\frac{\partial^2 T(x, r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r} \right) \quad (17)$$

и граничные условия на границе нагнетательной трубы:

$$-\lambda_1 \frac{\partial t(x, r, \tau)}{\partial r} \Big|_{r=R_1} = -\lambda_2 \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r} \Big|_{r=R_1} \quad (18)$$

Результаты математического моделирования. Результаты математического моделирования охлаждения массива горных пород представлены на рис. 5-9. Все расчеты выполнены для теплообменников длиной 200 м. Радиус нагнетательной трубы R_1 составляет 0.05 м. Коэффициент теплоотдачи на границе нагнетательной трубы $\alpha_1 = 21 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \times \text{град})$. В нашем случае в качестве теплоносителя была взята вода. Температура теплоносителя на входе в теплообменник t_0 равняется 1°C , температура пород $T_{\text{П}}$ равняется 10°C . В таблице приводятся численные параметры теплоносителя и пород использованные в расчетах.

Численные значения свойств теплоносителя и пород

	Теплопроводность λ , Вт/(мхград)	Теплоемкость c , Дж/(кгхК)	Плотность ρ , кг/м ³
Вода	0.57	4190	1000
Порода	2.5	1300	2400

Результаты моделирования температурного поля на глубине 200 м для скорости прокачки теплоносителя 0.2 м/с, что соответствует расходу теплоносителя 5.71 м³/час (рис. 5) и скорости прокачки 0.14 м/с, соответственно расхода 4.00 м³/час (рис. 6) показывают, что после прокачки в течение 2 часов отклонение от исходной температуры пород существенно только на расстоянии 5 радиусов нагнетательной трубы от ее центра (25 см). Это расстояние примерно одинаково как для скорости прокачки 0.2 .

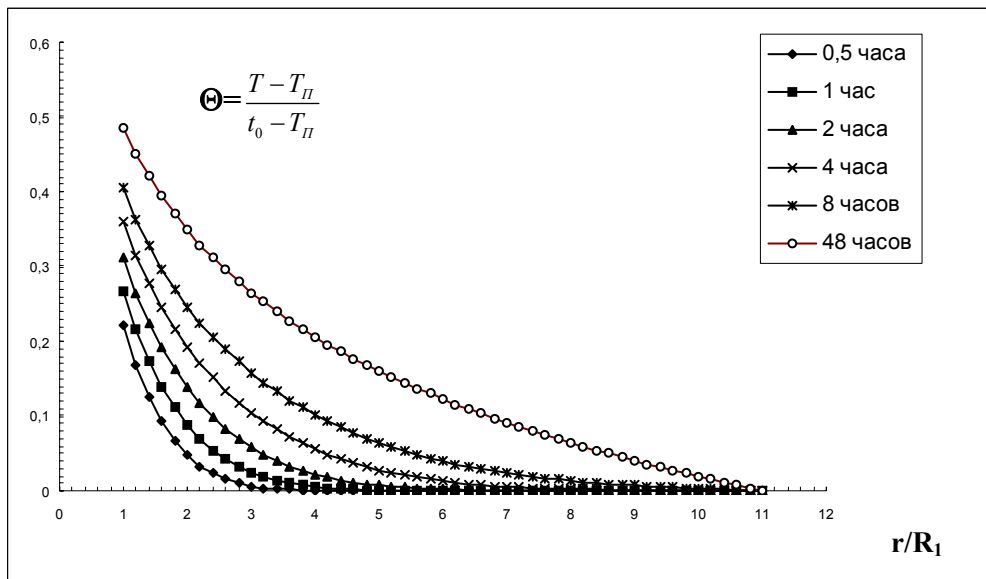


Рис. 5. Распределение температурного поля вокруг теплообменника на глубине 200м в разное время после начала нагнетания теплоносителя. Скорость прокачки теплоносителя $u=0.2$ м/с. $\alpha_1 = 21$ Вт/(м²·град)

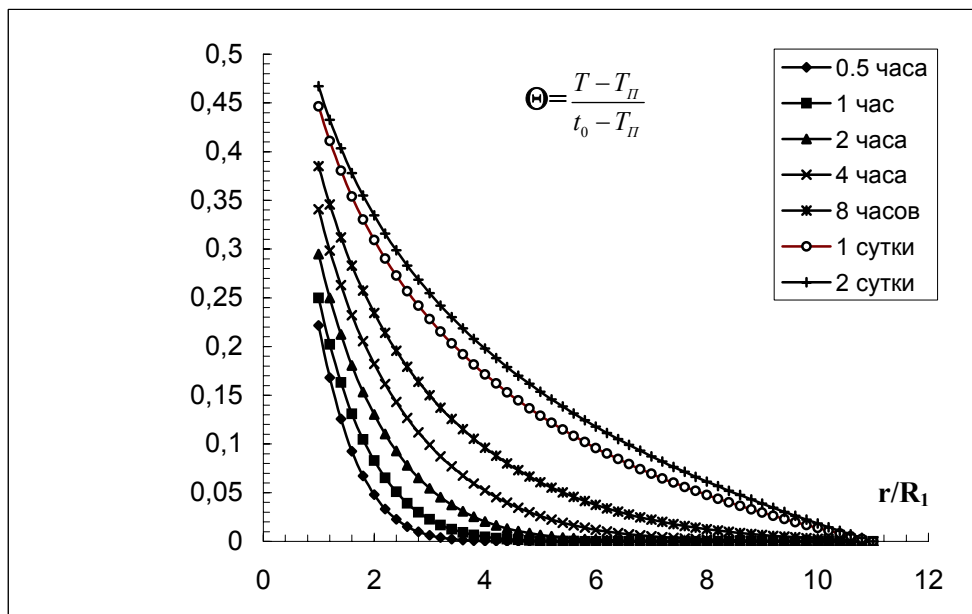


Рис. 6. Распределение температурного поля вокруг теплообменника на глубине 200м в разное время после начала нагнетания теплоносителя. Скорость прокачки теплоносителя $u=0.14$ м/с. $\alpha_1 = 21$ Вт/(м²·град)

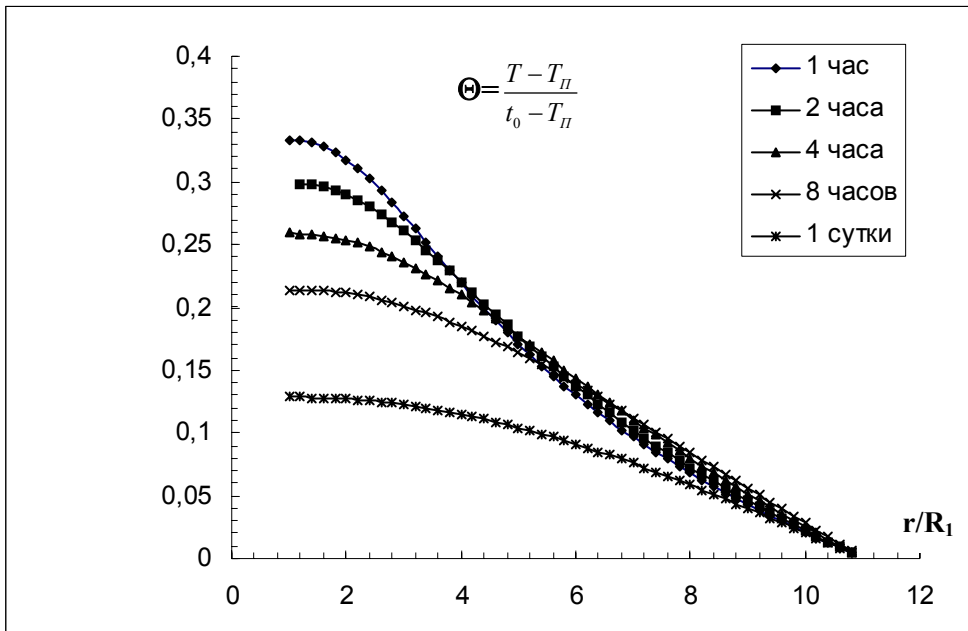


Рис. 7. Восстановление температурного поля пород после прокачки теплоносителя через нагнетательную трубу со скоростью 0.2 м/с в течение 2 суток. Время восстановления указано справа сверху, $\alpha_1 = 21 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$

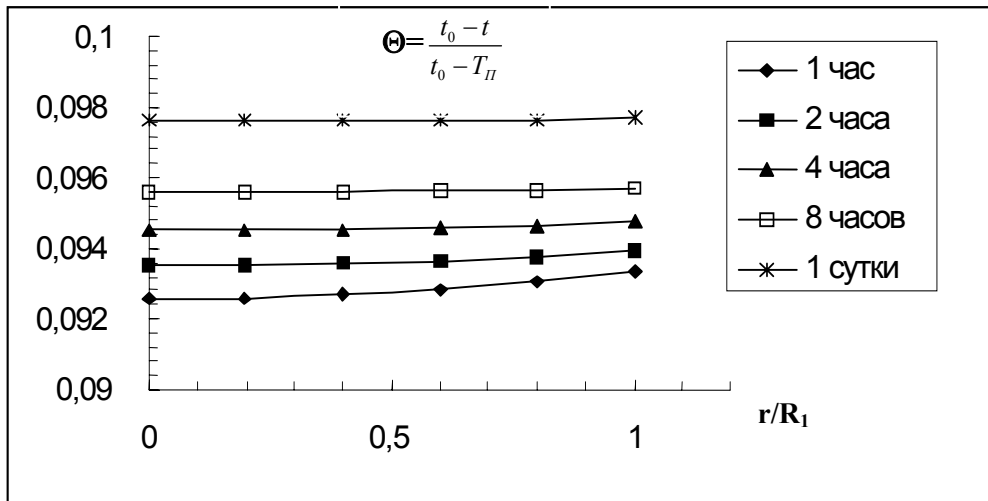


Рис. 8. Температура теплоносителя в трубе на глубине 200 м как функция расстояния от центра нагнетательной трубы после прокачки теплоносителя со скоростью 0.2 м/с в течение 2 суток. Время восстановления указано справа сверху, $\alpha_1 = 21 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$

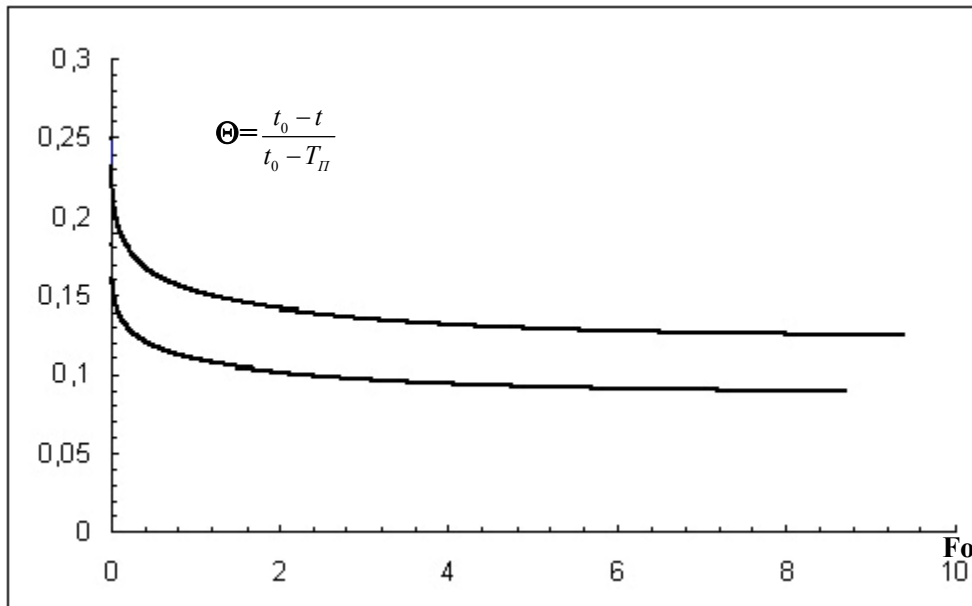


Рис. 9. Зависимость обобщенной температуры теплоносителя на выходе из нагнетательной трубы геотермальной установки глубиной 200 м от числа Фурье. Кривая 1 соответствует скорости прокачки теплоносителя равной 0.14 м/с, кривая 2 – 0.2 м/с. Коэффициент теплообмена $\alpha_1 = 21 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \times \text{град})$

так и для скорости 0.14 м/с. После прокачки теплоносителя в течение 4 часов возмущение температурного поля пород распространяется на расстояния примерно равные 8 радиусам нагнетательной трубы, что в нашем случае составляет 40 см.

На рис. 7, 8 приводятся результаты по моделированию восстановления температурного поля пород и температуры теплоносителя в нагнетательной трубе. Видно, что после двух суток прокачки теплоносителя температурное поле пород почти восстанавливается за сутки. При этом температура теплоносителя в трубе растет

На рис. 9 приводится зависимость температуры теплоносителя на выходе из нагнетательной трубы теплообменника от числа Фурье $Fo = \frac{a \cdot \tau}{R_1^2} [1]$,

где $a = \frac{\lambda}{c\rho}$ - температуропроводности

теплоносителя, а R_1 – радиус нагнетательной трубы. Наиболее существенные изменения температуры теплоносителя происходят на начальном этапе прохождения теплоносителя по трубе. Этот участок соответствует наиболее эффективному теплосъему. В дальнейшем температура меняется мало и режим теплообмена носит почти стационарный характер. Характерные значения чисел Фурье, когда изменения температуры теплоносителя становятся малыми, составляют от 2 до 4.

Выводы


Выполненное математическое моделирование процесса кондуктивного теплообмена в приповерхностных геотермальных установках показало, что за время прокачки теплоносителя

не превышающее 4 часов возмущение температурного поля пород распространяется на расстояния примерно равные 8 радиусам нагнетательной трубы.

Охлаждение теплоносителя наиболее быстро происходит на начальном

этапе прокачки теплоносителя, далее его температура меняется слабо. Характерные значения чисел Фурье, после которых изменения температуры теплоносителя становятся малыми и не превышают 4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лыков А.В.* Теория теплопроводности, Высшая школа, Москва, 1967, с. 181.
2. *Смирнова Н.Н.* Нестационарный теплообмен при фильтрации в гетерогенных средах, СО АН, Институт теплофизики, Новосибирск 1990.
3. *Schuman T.E.W.* Heat transfer. a liquid flowing through a porous prism, J. Franklin Inst., 1929, vol.28, n3, p.405-416.
4. *Ортега Дж., Пул У.* Введение в численные методы решения дифференциальных уравнений, Москва "Наука", 1986, с. 221. 

Коротко об авторах

Богуславский Э.И. – доктор технических наук, профессор,
Смирнова Н.Н., Егоров С.В. – аспиранты,
 Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет).
 Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 15 симпозиума «Неделя горняка-2008».
 Рецензент д-р техн. наук, проф. *Е.В. Кузьмин.*



ДИССЕРТАЦИИ

ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ

Автор	Название работы	Специальность	Ученая степень
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ			
ПУСТОВОЙ-ТОВА Наталия Александровна	Обоснование и разработка резонансно-акустического метода оценки плотностного разреза пород кровли горных выработок	25.00.16 25.00.35	к.т.н.