

УДК 532.5; 536.24

Резакова Т.А.

Институт технической теплофизики НАН Украины

ДИНАМИКА ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ПОДЗЕМНОМ ПОРИСТОМ ПЛАСТЕ ПРИ ЗАКАЧКЕ И ОТКАЧКЕ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ

Змодельовано процеси теплообміну в підземному проникному колекторі при закачуванні в нього охолодженої рідини за допомогою пакету Phoenics. Отримано часові залежності просування температурного фронту для реального пласта.

Смоделированы процессы теплообмена в подземном пористом коллекторе при закачивании в него охлажденной жидкости с помощью пакета Phoenics. Получены временные зависимости продвижения температурного фронта для реального пласта.

Heat exchange processes in an underground nontight collector are simulated at injection in it of the cooled liquid by means of package Phoenics. Time dependences of advancement of temperature front for a real layer are received.

Введение

Теплофизическое моделирование является эффективным средством решения сложных задач оценки запасов теплоты, выбора рациональных схем разведки, проектирования и оптимизации систем эксплуатации геотермальных месторождений. Однако, задачи моделирования процессов тепломассопереноса 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 эксплуатации. Продолжительность периода эксплуатации выбирается из условий обеспечения нормальной работы наземных энергопотребляющих установок в течение всего срока их службы – 40...50 лет.

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 проис-

ходить 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. Принцип расчета геотермальной системы сводится к расчету теплового баланса системы за весь период эксплуатации.

Постановка задачи

Отбор теплоты от горного массива происходит путем охлаждения прилегающих к пористому коллектору слоев. В начальный момент перед закачкой в пласт охлажденного теплоносителя горный массив и пористый слой имеют одинаковую температуру, свойственную данным геологическим условиям. С началом закачки охлажденного теплоносителя начинают интенсивно охлаждаться непосредственно прилегающие к коллектору слои горного массива. Охлаждение последующих и более отдаленных слоев происходит менее интенсивно и на определенном удалении от поверхности раздела коллектор – горный массив оно сводится к бесконечно малым величинам. По-

мере охлаждения прилегающих слоев горного массива, увеличивается степень охлаждения последующих слоев. Это приводит к непрерывному уменьшению тепловыделений из-за возрастания термического сопротивления, переходу теплоты от охлаждаемых глубинных массивов через слои, имеющих разную степень охлаждения. Величина тепловыделения в каждый данный момент изменения тепловыделения во времени определяется распределением температур в горном массиве и изменением этого распределения.

В [6] предложена теплофизическая модель исследуемого процесса, показана ее реализация с помощью программного пакета "Phoenics", а также подтверждена ее полнота и адекватность данными эксперимента. 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 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 $c_p = 905,0$ Дж/кг·К, теплопроводность $\lambda = 2,5$ Вт/м·К, плотность $\rho = 2500,0$ кг/м³, пористость пласта

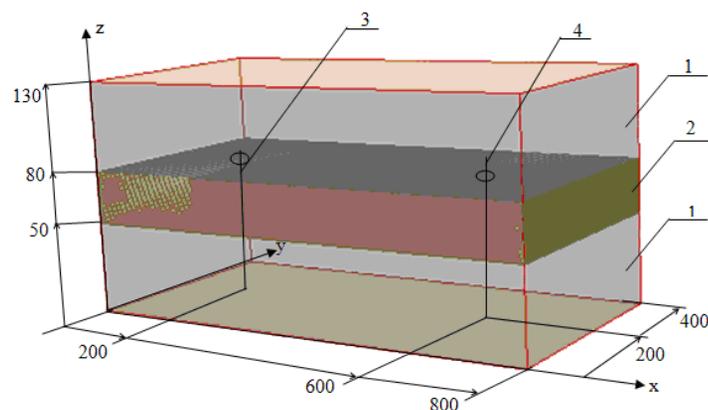


Рис. 1. Схема расчетного массива:
1 – горный массив, 2 – водоносный слой,
3 – ось нагнетательной скважины,
4 – ось подъемной скважины.

$\phi = 0,32$.

Первоначально распределение температуры по высоте пласта было стационарным, начальная температура твердой породы и жидкости была $t_{пл} = t_{ж} = 74,0$ °С. Температура окружающего массива была постоянной и равнялась 74,0 °С. В пласт закачивалась вода расходом $G = 7,0$ кг/с, начальная температура закачиваемой воды была $t_3 = 16,8$ °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 xyz 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.

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 (и нижняя подошва, и верхняя кровля) направлении, как показано на рис. 1 и рис. 2. Принималось, что на границе горного массива температура постоянна и равна 74,0 °С. Расчетное время эксплуатации изменялось от 1 года до 50 лет. Результаты представлены на рис. 2.

Было установлено, что температурный режим в водоносном слое перестает влиять на

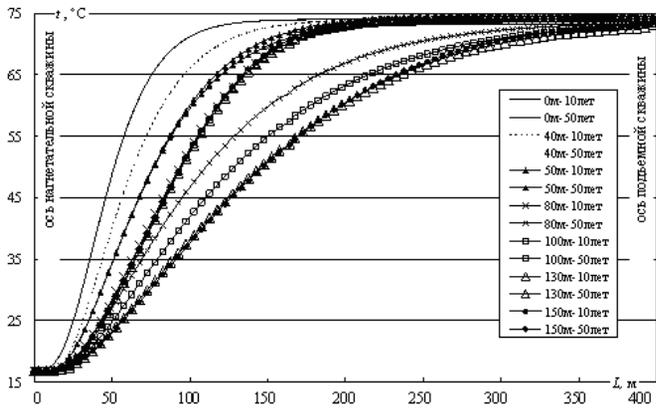


Рис. 2. Зависимость охлаждения горного массива при различной суммарной (подошва, слой, кровля) высоте в течение 50 лет.

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 лет и 50 лет, полностью совпадают (кривые Δ , \bullet). 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. В первый год эксплуатации изменение температуры в слое от начальной температуры закачиваемой воды 16,8 °С до невозмущенной температуры слоя 74,0 °С происходит на длине 100,0 м. Через 10 лет эта длина составляет 250,0 м. На рис. 4 приведены результаты расчета изменения температуры в слое ($z = 15,0$ м) по оси x в двух направлениях от нагнетательной скважины. Наблюдается значительная асимметричность кривых в сторону подъемной скважины, что свидетельствует о более высокой скорости продвижения потока закачиваемой холодной воды в направлении подъемной скважины.

На рис. 5 показано распределение температуры по оси y , т. е. в поперечном направлении

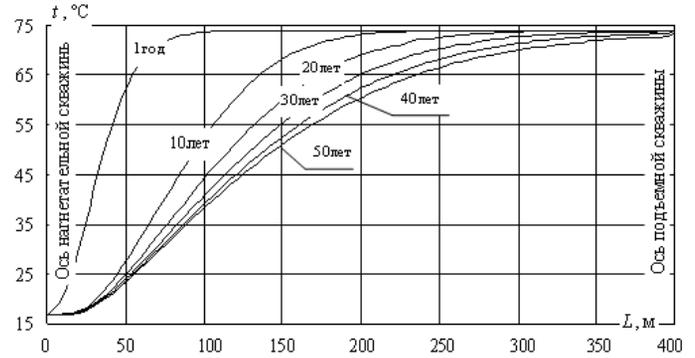


Рис. 3. Изменение температуры водоносного пласта за 50 лет (по длине расстояния между скважинами).

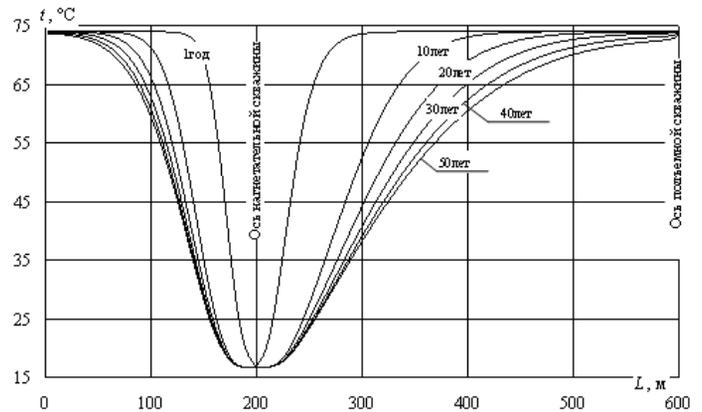


Рис. 4. Изменение температуры водоносного пласта за 50 лет (в обе стороны от нагнетательной скважины).

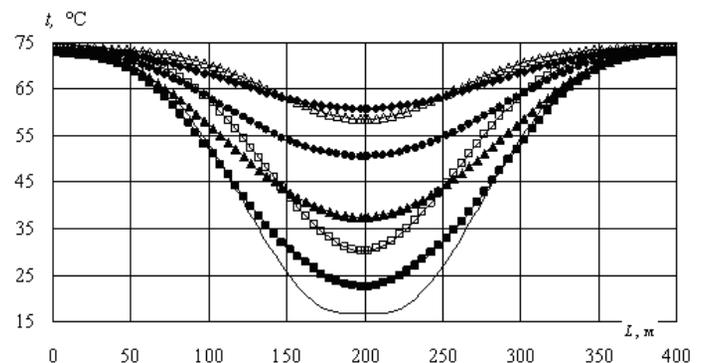


Рис. 5. Распределение температуры в пласте по оси y на разном расстоянии от оси нагнетательной скважины через 50 лет эксплуатации: Δ – $x = 100$ м, \square – $x = 150$ м, $---$ – $x = 200$ м, \blacksquare – $x = 250$ м, \blacktriangle – $x = 300$ м, \bullet – $x = 350$ м, \blacklozenge – $x = 400$ м.

движения воды в подъемной скважине, на различном расстоянии от нагнетательной скважины. Форма кривых симметрична относительно оси нагнетательной скважины.

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 % падение температуры в забое подъемной скважины, то для конкретных условий геотермального месторождения в п. Медведевка такое значение ($74,0\text{ }^{\circ}\text{C} - 1\%$) = $73,26\text{ }^{\circ}\text{C}$ будет достигнуто по истечению около 50 лет эксплуатации (рис. 6). 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.

В качестве оценки отметим, что снижение температуры добываемой воды в забое подъем-

ной скважины примерно на $1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ можно ожидать после 65 лет эксплуатации, а снижение температуры на $2,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (такое падение сравнимо с потерей температурного напора, обусловленного теплоотдачей от всей скважины в грунтовой массив) следует ожидать после столетнего периода эксплуатации.

На рис. 7 показаны термограммы распределения температур в слое и окружающем горном массиве в координатах $x-z$, $y-z$. Синий цвет соответствует холодной зоне, красный – горячей.

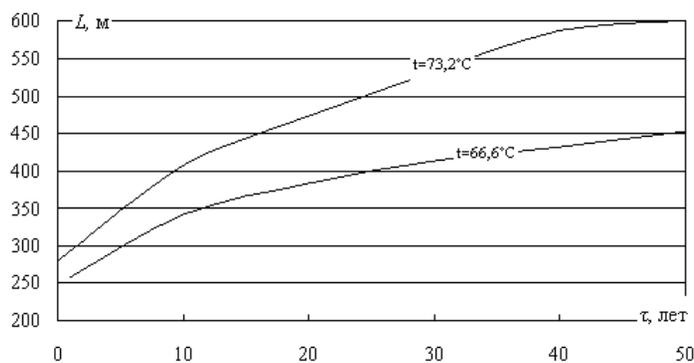


Рис. 6. Временная зависимость достижения фронтом падения температуры на 1 % и на 10 % для теплопункта в пос. Медведевка, АР Крым.

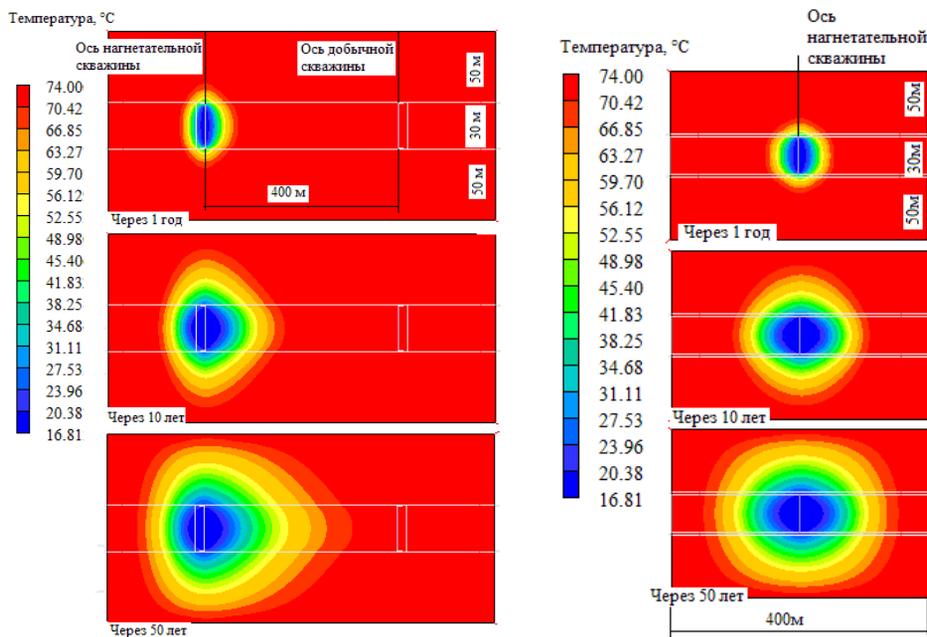


Рис. 7. Охлаждение горного массива и водоносного слоя при закачке охлажденной воды за 50 лет (а – оси xz , б – оси zy).

На рис. 8 показаны термограммы распределения температур в слое в координатах $xу$ ($z = 45$ м). Здесь наглядно видно продвижение фронта охлаждения слоя в направлении подъемной скважины. Видно, что при слабом росте холодной зоны интенсивно увеличивается переходная зона.

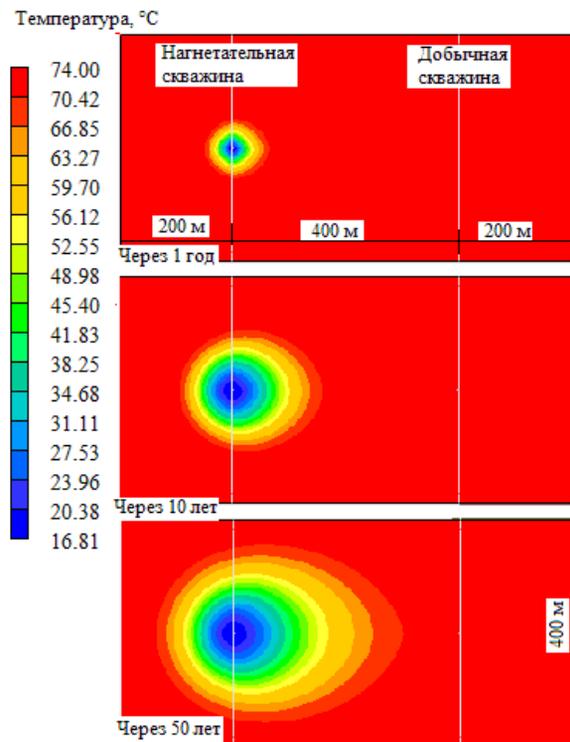


Рис. 8. Охлаждение водоносного слоя при закачке охлажденной жидкости за 50 лет (оси $xу$, $z = 45$ м).

Выводы

Получены трехмерные изображения температурных полей в системе проницаемый коллектор – горный массив. Проведен анализ кинетики охлаждения проницаемого коллектора и окружающего горного массива на примере реальной действующей геотермальной циркуляционной системы в поселке Медведевка (АР Крым). Исследование температурного поля системы водоносный пласт – горный мас-

сив показало, что по истечении определенного времени устанавливается квазистационарный режим, и высота охлажденного горного массива перестает влиять на температурный режим в коллекторе. Исследование нестационарных температурных полей показало значительную асимметричность их в сторону подъемной скважины. Получены временные зависимости продвижения температурного фронта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авдонин Н.А. О различных методах расчета температурного поля пласта при тепловой инъекции // Известия ВУЗов.– 1964. – №8. – С. 38-46. – (Серия «Нефть и газ»).
2. Власова С.П., Сухарев Г.М., Ковальский Е.В. Расчет температурного поля для сложных условий теплообмена в многослойных пластовых системах при нагнетании в пласт "холодной" воды // Геология нефти и газа. – 1981. – № 4. – Режим доступа к статье: <http://www.geolib.ru/OilGasGeo/1981/04/Stat/stat12.html>.
3. Забарный Г.Н. Методы расчета процессов теплопереноса в системах извлечения геотермальной энергии : автореф. дис. на соискание ученой степени доктора техн. наук : спец. 05.14.06 «Техническая теплофизика и пром. теплоэнергетика» / – Киев, 1995. – 36, [1] с.
4. Лялько В.И. Методы расчета тепло- и массопереноса в земной коре. – К.: Наукова думка, 1974. – 100 с.
5. Лялько В.И., Митник М.М. Исследование процессов переноса тепла и вещества в земной коре. – К.: Наукова думка, 1978. – 152 с.
6. Басок Б.И., Авраменко А.А., Резакова Т.А., Морозов Ю.П. Процессы фильтрации геотермального теплоносителя в пористом слое // Пром. теплотехника. – 2009. – Т. 31, № 5. – С. 69-75.

Получено 20.05.2010 г.