

8. Ким А. Н., Грун Н. А., Мурашев С. В. Дообработка водопроводной воды на фильтрах с сорбционной загрузкой, модифицированной фуллеренами // *Материалы конференции, посвященной памяти академика РАН и РААСН Сергея Васильевича Яковлева*. СПб., 2010. 80 с.
9. Никонова В. Ю. Получение, свойства и применение модифицированных фуллеренами адсорбентов : дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2008. 119 с.
10. Самонин В. В., Маракулина Е. А. Адсорбционные свойства фуллеренсодержащих материалов // *ЖФХ*. 2002. Т. 76, № 5. С. 888–892.
11. Самонин В. В., Никонова В. Ю., Ким А. Н., Грун Н. А. Модифицирование активных углей фуллеренами и их исследование в процессах кондиционирования водопроводной воды в режиме сорбция-регенерация // *Известия СПбГТУ*. 2010. № 8 (34).
12. Самонин В. В., Никонова В. Ю., Спиридонова Е. А. Влияние модифицирующих фуллереновых добавок на бактерицидные свойства активированных углей // *Альтернативная энергетика и экология*. 2006. № 2. С. 59–62.
13. Самонин В. В., Подвизников М. Л., Никонова В. Ю., Спиридонова Е. А., Шевкина А. Ю. Сорбирующие материалы, изделия, устройства и процессы управляемой адсорбции. СПб. : Наука, 2009. 271 с.
14. СанПиН 2.1.4.1074-01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Гигиенические требования к обеспечению безопасности систем горячего водоснабжения. М., 2002. 76 с.

УДК 621.58

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В УСЛОВИЯХ МНОГОЛЕТНЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ

Н. Ю. Сапрыкина, П. В. Яковлев

Астраханский инженерно-строительный институт (Россия)

В статье представлена математическая модель температурного поля грунтового массива в период многолетней эксплуатации геотермальных тепловых насосов. Представлены графические модели температурного фона грунта, выполненные в программе Matlab.

Ключевые слова: *математическая модель, геотермальная скважина, температурное поле, грунтовой массив, температурный фон грунта, тепловой насос, многолетняя эксплуатация, ресурсосбережение, энергосбережение.*

The article presents a mathematical model of the temperature field in the soil mass during long-term use of geothermal heat pumps. Is a graphical model of soil temperature background made in the program Matlab.

Keywords: *mathematical model, geothermal wells, the temperature field, ground array background soil temperature, heat pump, long-term operation, resource conservation, energy saving.*

На рынке теплонасосной продукции, представлена довольно широкая линейка товаров по типу, нагрузке, режиму эксплуатации. Приведены статистика и конкретные примеры, на территории нашей страны, показавшие положительные результаты при использовании ТНУ. К тому же теплонасосное оборудование входит в перечень основных характеристик по обеспечению ресурсо- и энергосберегающего потенциала Российской Федерации. Но, несмотря на плюсы интенсивного применения геотермального теплонасосного оборудования, ощущается дефицит экспериментальных данных, полученных при длительных сроках эксплуатации подобных систем. Возникает ряд вопросов об устойчивости этих систем, об их надежности при многолетнем использовании. Отследить эксплуатационные характеристики довольно сложно, в большинстве случаев они носят лишь поверхностный и наблюдательский характер. К таким наблюдениям, в частности, относятся исследования температурных полей грунтового массива.

С момента широкого внедрения геотермального теплонасосного оборудования в России прошло достаточное количество времени. Выпущены справочная, нормативная техническая литература, предложены варианты методических рекомендаций по подбору, расчету технологических и эксплуатационных характеристик ТНУ. За это время были попытки исследовательских, экспериментальных работ по изучению многолетней эксплуатации грунтового массива [1].

Сложно отследить и динамику изменений эксплуатационных качеств ТНУ по климатическим характеристикам регионов, ввиду отсутствия информации о точном количестве единиц использования на территории России, т.к. установка такого оборудования не регистрируется в службах коммунального хозяйства. Кроме того, отсутствует единая информационная база изменений параметров и физических свойств поверхностных слоев земли при эксплуатации геотермальной скважины, по климатическим особенностям регионов.

Теория изучения температурного поля [2, 4, 5] показывает, что начиная с пятого года эксплуатации, многолетнее потребление тепловой энергии из грунтового массива сопровождается периодическими изменениями его температуры. Таким образом, при проектировании теплонасосных систем теплоснабжения необходимо учитывать падение температур грунтового массива, вызванного многолетней эксплуатацией системы теплосбора, и использование в качестве расчетных параметров температур грунтового массива, ожидаемых на 5-й год эксплуатации.

Одним из ключевых факторов, работы ТНУ в оптимальном режиме, отсутствие отслеживания режима работы отдачи ТНУ и нагрузки на геотермальную скважину в эксплуатационный период, а также о времени и периоде эксплуатации. Ощущается дефицит экспериментальных данных, полученных при длительных сроках эксплуатации подобных систем.

Разработка расчетных моделей «поведения» температуры грунтового массива при многолетней эксплуатации геотермального теплового насоса, приобретает все большее научно-прикладное значение в инженерной практике. Как правило, используется большое количество методик оценки эффективности процессов при использовании ТНУ. В частности, к ним относятся математическое моделирование, которое позволяет исследовать получить результаты намного быстрее и с меньшими затратами, чем экспериментальным путем.

Как правило, в формировании температурного фона участвует большое количество факторов: во-первых, тепловой поток земляных недр; во-вторых, солнечное излучение, в-третьих, температура наружного воздуха; в-четвертых, теплофизические свойства грунта.

Структурную модель принимаем как цилиндрическое тело, состоящее из нескольких контуров. На рис. 1 приведены границы обсадной колонны, которая представляет собой границы эксплуатируемой скважины. Внешняя граница контура – влияние скважины.

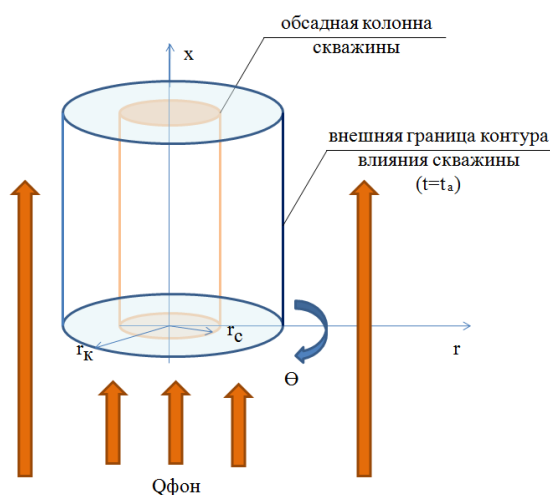


Рис. 1. Модель эксплуатируемого грунтового массива (r_k – радиус обсадной колонны, r_c – радиус скважины, $Q_{фон}$ – фоновый поток земли)

В цилиндрической системе координат, характерной для вертикальной скважины решение задачи сводится к решению уравнению нестационарной теплопроводности [3]. Расчетная модель требует обязательного учета естественного фонового потока Земли в виде компенсирующей поправки – источника и стока тепла (в условиях решаемой задачи остальными факторами можно пренебречь):

$$\frac{dt}{d\tau} = a \left(\frac{d^2 t}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dt}{dr} \right) + q, \quad (1)$$

где q – источники и стоки тепла, обусловленные тепловыми потоками земли и тепловыделения через поверхность, Вт/м².

Нами приняты следующие граничные условия:

- на удаленном контуре (контуре питания), в области отсутствия влияния скважин и постоянной температурой приняты граничные условия первого рода $t_k = t_0$;
- на поверхности обсадной колонны скважины, из условия первичности обеспечения потребителей тепловой энергией приняты граничные условия второго рода

$$\left. \frac{\partial t}{\partial r} \right|_{r=r_c} = q \quad (2)$$

Начальное условие принято на момент первичного распределения температур в пласте до начала эксплуатации установки, т.е. это равномерное распределение:

$$t(x, \tau) = t_0 \quad (3)$$

Условиями расчета определено чередование периодов включения ТНУ с периодами ее остановки с цикличностью, определяемой временем года без изменения направления теплового потока. Время достижения квазистационарного режима определялось расчетом и находится в пределах 5 лет, что также подтверждается эксплуатационными параметрами действующих скважин. Предельные состояния температуры пласта достигаются к моменту завершения цикла, т.е., например, к окончанию отопительного сезона, в связи, с чем расчетные значения, используемые для определения эксплуатационных характеристик, фиксировались на этот момент времени. Диапазон плотностей тепловых потоков также определялся условиями эксплуатации действующих скважин и ограничивался от 100 до 500 Вт/м².

Характерное распределение поля температур в пласте вблизи геотермальной скважины на различных этапах эксплуатации начиная с первого включения ТНУ и далее с тепловой активностью в 100 Вт представлено на рис. 2–3, выполненных с помощью математического моделирования в прикладной программе MathLab.

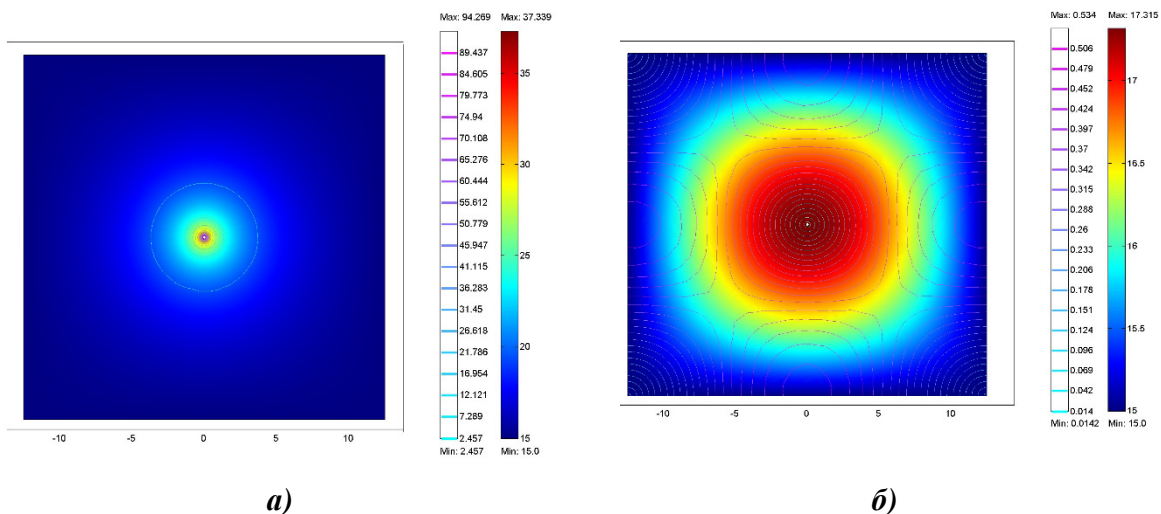


Рис. 2. Распределение температурного поля: а) 1-й год; б) 3-й год эксплуатации

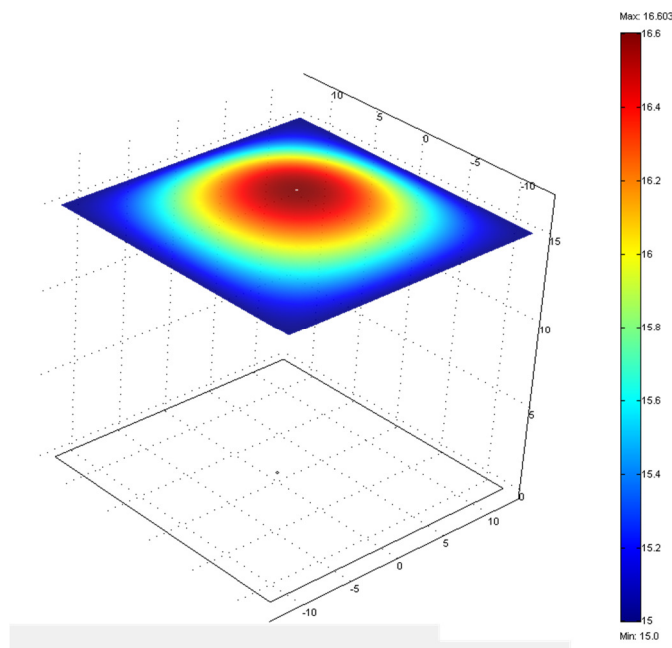


Рис. 3. Температурное поле 5-го года эксплуатации

Исследования показывают, что при установке геотермальных тепловых насосов первые 3 года происходит «приработка» скважины. В первый год эксплуатации происходит падение температуры, но как видно из графика (рис. 4) на третий год и последующие года температура выравнивается.

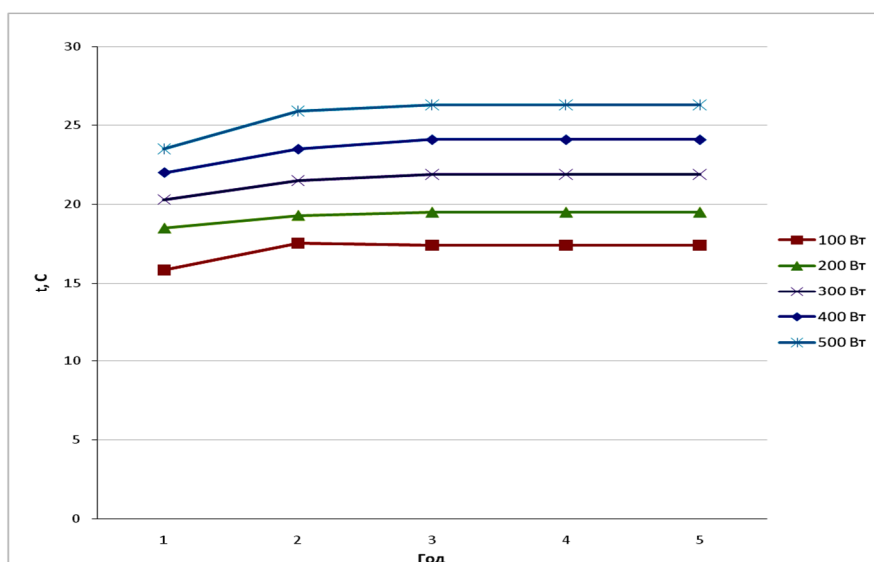


Рис. 4. График изменения температуры в течении пяти лет: 1 – 100 Вт, 2 – 200 Вт, 3 – 300 Вт, 4 – 400 Вт, 5 – 500 Вт

Анализ результатов расчета поля температур в скважине при циклическом режиме работы геотермального теплового насоса позволяет сделать следующие выводы.

1. Изменение температурного поля грунта во времени, а соответственно, и переменный тепловой режим работы системы теплосбора приводит к изменению термодинамических режимов работы ТНУ и технологических режимов теплоснабжения.

2. Работа теплового насоса сопровождается нагревом или охлаждением грунта в зависимости от направления теплового потока и существенное изменение температурного поля за один климатический цикл происходит в радиусе до 5 м от скважины.

3. Из литературных источников известно, что при работе установки только на нагрев, или только на охлаждение, заметные изменения температурного фона грунта, отражающиеся на технико-экономических показателях теплового насоса, наблюдаются на 5-й год эксплуатации. Для сохранения проектных параметров рассматриваемой гелиоэнергетической установки и сохранения теплового баланса грунта необходимо комбинировать направление тепловых потоков, т.е. оптимальным режимом является чередование отопление – кондиционирование.

4. Долгосрочная экономическая эффективность теплонасосной установки с циклическим режимом работы определяется динамикой изменения температурного поля с установлением квазистационарного состояния за период не менее 5 лет, что требует проведения дополнительных исследований для разработки методики проектирования подобных систем.

5. Учитывая длительность периода исследования и разнообразие влияющих параметров, включая климатическую зону, особенности тепло- и холодоснабжения объекта, параметры грунта, параметры скважины, влияние грунтовых вод, основным методом исследования является метод математического моделирования в сочетании с натурными замерами на действующих промышленных объектах.

Список литературы

1. Васильев Г. П. Теплохладоснабжение зданий и сооружений с использованием низкопотенциальной тепловой энергии поверхностных слоев земли. М., 2006.
2. Хайнрих Г., Найорн Х., Нестлер В. Теплонасосные установки для отопления и горячего водоснабжения. М. : Стройиздат, 1985. 351 с.
3. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М. : Высшая школа, 1967. 600 с., ил.
4. Руденко Н. Н., Фурсова И. Н. Моделирование температурного поля в грунте) // Инженерный вестник Дона. URL: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/2137>
5. Маслов Н. Н. Основы механики грунтов и инженерной геологии. М. : Высшая школа, 1982. 511 с.