

УДК 621.58

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ГРУНТА  
В РЕЖИМЕ РАБОТЫ ТНУ*****Н. Ю. Сапрыкина, П. В. Яковлев****Астраханский инженерно-строительный институт*

В работе рассмотрены особенности использования геотермального тепла с применением теплового насоса. Непрерывный отбор или сброс тепла приводят к значительному изменению теплового баланса земли в местах размещения геотермальных скважин. Для сохранения естественного температурного фона предложено использование комбинированного цикла с применением теплового насоса для отопления и кондиционирования. Нестационарный процесс теплообмена при циклическом знакопеременном тепловом потоке в геотермальной скважине является предметом исследования. Для расчета режима работы геотермальной скважины предложена математическая модель. Решение получено численным методом. Полученные температурные поля позволили выявить существенные особенности циклического режима эксплуатации геотермальных скважин и предложить перспективные направления дальнейших исследований.

**Ключевые слова:** температурное поле грунта, тепловой баланс земли, истощение геотермальной скважины.

**MATH MODELLING OF SOIL TEMPERATURE FIELD WITHIN WORK  
OF HEAT PUMP INSTALLATION*****N. Ju. Saprikina, P. V. Jakovlev****Astrakhan Institute of Civil Engineering*

The paper discusses the features of geothermal heat using a heat pump. Continuous selection or rejection of heat lead to a significant change in the heat balance of the earth at the locations of geothermal wells. To preserve the natural temperature background suggests the use of a combined cycle using a heat pump for heating and cooling. Non-stationary heat exchange process during cyclic alternating heat flow in geothermal well is the subject of research. To calculate the mode geothermal wells mathematical model. The solution is obtained numerically. The resulting temperature field revealed the essential features of a cyclic mode of operation of geothermal wells and suggest promising directions for further research.

**Keywords:** soil temperature field, heat balance of the earth, the depletion of geothermal wells.

Применение энергосберегающих технологий на современном этапе развития науки и техники является ключевым фактором роста. Одним из направлений в этой области является использование энергии Земли. Широкое распространение геотермальных энергетических комплексов сдерживается рассеянной плотностью теплового потока и малой его величиной на большинстве (порядка 90 %) поверхности суши. Вместе с тем эксергетический анализ показывает возможность использования другой характеристики земной коры, а именно – ее большой тепловой инерции. Так, на глубинах порядка 50 м сохраняется постоянная температура независимо от времени года. Этот потенциал успешно используется как для получения низких температур в летний период, так и для целей отопления. Интенсификация теплообмена достигается повышением температурного напора за счет установки тепловых насосов.

Использование аккумулирующих свойств земли предполагает поддержание теплового баланса путем чередования отбора тепла и его подвода для поддержания пластовой температуры. В расчетах технологического цикла переменного тепло- и холодоснабжения данное условие приводит к значительным изменениям поля температур, отражаясь на параметрах работы энергетической установки, в том числе на ее экономических показателях. Все это опре-

деляет актуальность работы по уточнению динамики изменения поля температур в условиях знакопеременных тепловых потоков.

Опыт эксплуатации геотермальных установок, данные о грунте поверхностных слоев Земли и стабильности его поведения при многолетней эксплуатации, а также о температурных полях отображены в работах [1–3]. Эти исследования показали, что в эксплуатационный период массив грунта подвергается многократному замораживанию и оттаиванию. Натурные исследования свидетельствуют, что при установке геотермальных тепловых насосов, первые три года происходит приработка скважины и наблюдается ее «истощение». Это может быть вызвано тем, что система теплосбора работает в одном из режимов (теплоснабжение либо холодоснабжение). При работе в режиме теплоснабжения в первый год наблюдается значительное увеличение «нагрузки» на скважину. Отбор тепла из грунта в течение отопительного сезона вызывает значительное падение температуры грунтового массива, которое в большинстве случаев не успевает компенсироваться за лето и межсезонные периоды. Таким образом, анализ литературы подтверждает, что ключевой информацией, необходимой для проектирования и успешной эксплуатации геотермальных установок, является исследование удаленных последствий эксплуатации геотермальных скважин.

Задача распространения тепла в земле вблизи скважины сводится к решению дифференциального уравнения теплопроводности. В общем случае это трехмерная задача, но, учитывая большую протяженность скважины относительно радиуса влияния, а также неоднородность пластов, задача может быть с достаточной степенью точности сведена к двумерной. Дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности без внутренних источников теплоты в предположении о постоянстве физических параметров записывается в следующем виде:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

где  $a$  – коэффициент температуропроводности;  $t$  – температура;  $\tau$  – время;  $x, y$  – координаты.

Для данной постановки задачи, с учетом симметричности поля температур, возможно упрощенное решение в цилиндрической системе координат:

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

где  $r$  – расстояние от оси скважины.

Учитывая перспективу усложнения задачи с включением в расчет поля скважин, а также влияние потенциального течения грунтовых вод, решение выполнялось с использованием уравнения (1).

Нами приняты следующие граничные условия:

- на удаленном контуре (контуре питания) в области отсутствия влияния скважин и постоянной температуры грунта, 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

$$\left. \frac{\partial t}{\partial r} \right|_{r=r_c} = q \quad (3)$$

Начальное условие принято на момент первичного распределения температур в пласте до начала эксплуатации установки, то есть это равномерное распределение:

$$t(x, \tau) = t_0 \quad (4)$$

Моделирование процессов изменения температуры грунтового массива в условиях знакопеременного нестационарного теплового потока представляет собой чрезвычайно сложную задачу, поскольку требует физико-математического описания сложного температурного поля, которое сформировалось под действием разнообразных нестационарных механизмов, определяющих процесс теплосбора (теплоотвода), включая внешние климатические условия, параметры теплового насоса, изменение характеристик грунта. В связи с этим нами выбран численный метод моделирования, позволяющий учитывать отмеченные выше особенности решаемой задачи с перспективой расширения перечня и диапазона влияющих факторов. Решение задачи выполнено с использованием неявной разностной схемы и метода контрольного объема со смещенной сеткой.

На рис. 1 представлен пример расчета понижения температуры грунтового массива, выполненный с помощью математического моделирования в программе MathLab.

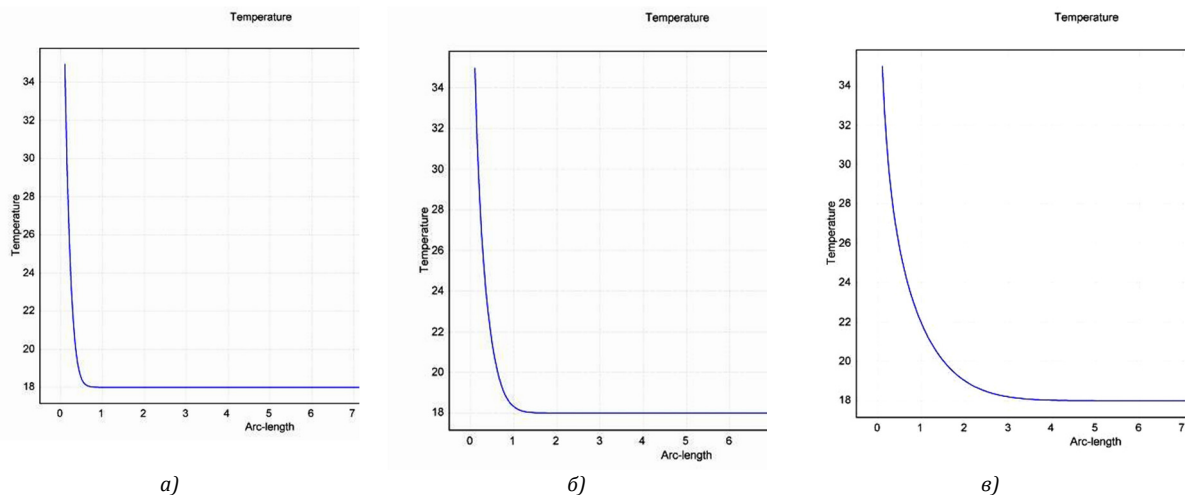


Рис. 1. График понижения температуры грунтового массива:  
а) 2 дня, б) 10 дней в) 100 дней

Из рис. 1 видно, что зона падения температуры грунта в условиях отсутствия стока грунтовых вод достаточно ограничена (а, б) и находится в пределах 1 м, то есть тепловая волна вблизи скважины проходит в сутки от 0,05 до 0,1 м. Увеличение площади изотермической поверхности пропорционально радиусу, и, в соответствии с законом Фурье, с течением времени на границе зоны влияния плотность теплового потока и темп распространения тепловой волны падают. Так, при эксплуатации скважины в течение трех месяцев зона влияния (фронт волны) распространяется на расстояние до 3 м с заметным падением градиента температуры на внешней границе фронта. Как видно из полученных первичных результатов расчетов, зона влияния скважин достаточно мала, что позволяет на ограниченном пространстве разместить их число, требуемое по техническому заданию. Вместе с тем, если не компенсировать отвод тепла в теплый период, эффективность работы оборудования будет падать за счет переохлаждения пласта. Это подтверждают известные исследования. Так, согласно [4], первые пять лет падения температуры не наблюдается, но впоследствии происходит резкое понижение в логарифмической зависимости.

Падение температуры и нарушение структуры грунтового массива можно компенсировать, введя в практику технологию «аккумуляции тепла». На сегодняшний день большую популярность получает использование установок в жилых и промышленных комплексах на основе грунтовых тепловых насосов. В нашей стране территории наибольшего использования ТНУ сконцентрированы в Северо-Кавказском и Южном федеральных округах. В Астраханской области существует большое количе-

ство примеров [5], когда тепловые насосы работают в двух режимах: тепло и холод (охлаждение, кондиционирование). В качестве примера рассмотрим эксплуатацию вертикального грунтового теплообменника крестьянско-фермерского хозяйства по производству и хранению молочной продукции (рис. 2). Установка оборудования произведена в 2012 г. Источниками энергии для подогрева и охлаждения являются две вертикальные скважины глубиной по 75 м.

Комбинированная солнечно-теплонасосная установка работает по следующей схеме: в летний период года охлаждение происходит за счет сброса тепла в пласт, имеющий температуру ниже окружающей среды. Снижение температуры конденсации в холодильной машине приводит к экономии энергии на привод компрессора. Пласт при этом нагревается. В зимний период скважина используется для отопления, то есть тепло из нее забирается на нужды отопления и горячего водоснабжения. При этом происходит охлаждение пласта. Циклическое охлаждение и нагревание снижает опасность переохлаждения (перегрева) грунта с последующим падением технико-экономических показателей работы установки. Рассматривая режим работы установки с позиции построения расчетной динамической модели скважины, следует отметить неравномерность тепловых нагрузок, определяемых потребителем, а также моменты полной остановки оборудования в периоды межсезонья.

Исходными данными для проверки адекватности математической модели установки и разработки методики проектирования аналогичных установок могут быть результаты натурных исследований. Исследования проводились на третий год эксплуатации скважины.



Рис. 2. Крестьянско-фермерское хозяйство с. Николо-Комаровка:  
а) общий вид – молочный цех; б) установленное оборудование

Из результатов натуральных замеров выявлено, что рабочие параметры холодильной машины в зимний период находятся в области температур ниже 0 °С, а температура внутри скважины варьировалась от 0 до -7 °С. Такой температурный диапазон обусловлен особенностями эксплуатации объекта. Учитывая, что коэффициент теплопроводности льда выше коэффициента теплопроводности воды примерно в 3 раза, а также присутствие в пласте грунтовых вод, можно предположить улучшение теплотехнических характеристик скважины. Вместе с тем лед препятствует фильтрации грунтовых вод, ухудшая отвод тепла.

Опасность размораживания трубопроводов и возможные изменения структуры пласта не

позволяют рекомендовать работу скважины при отрицательных температурах, однако именно в данном случае низкие температуры диктуются параметрами потребителя. Для целей отопления оборудование и параметры его работы могут быть подобраны так, чтобы температуры в скважине находились в положительной области температур.

В летний период производится отвод тепла в скважину, сопровождающийся повышением параметров грунтового массива. На рис. 3 представлены результаты расчета поля температур после трех месяцев эксплуатации скважины. Как видно из графика, существенное изменение температуры за летний период происходит на расстоянии менее 5 м от скважины.

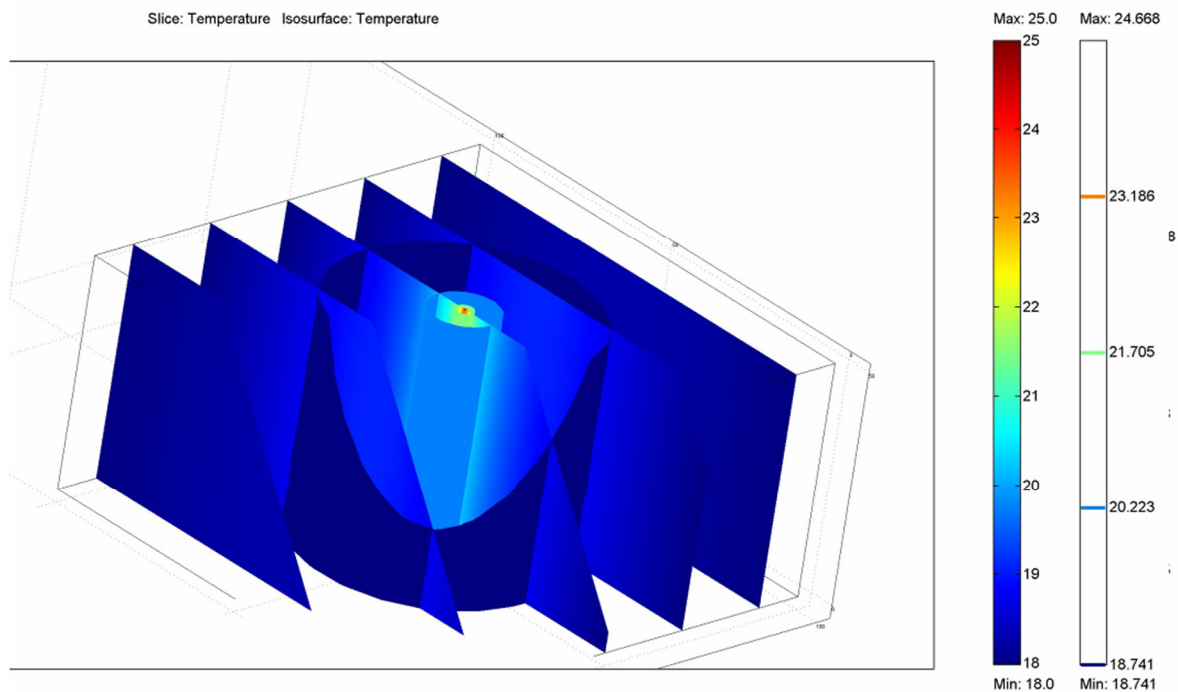


Рис. 3. Математическое моделирование скважины в программе MathLab

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

1. Для Южного Федерального округа и сходных с ним по климатическим характеристикам регионов начиная с глубины 15 м температура земли в течение всего года изменяется незначительно и варьируется от 18 до 25 °С.

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 [4] 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 теплового баланса грунта необходимо комбинировать направление тепловых потоков, то есть оптимальным режимом является чередование отопления/кондиционирование.

4. Долгосрочная экономическая эффективность гелиоустановки 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 : дис. ... д-ра техн. наук. М., 2006. 423 с.
2. Хайнрих Г., Найорн Х., Нестлер В. Теплонасосные установки для отопления и горячего водоснабжения. М. : Стройиздат, 1985. 351 с.
3. Поддубный Г. В. Температурное поле в грунте под изоляцией бесподвального холодильника // Изв. вузов. Математика. 1962. № 6. С. 101–107.
4. Шишкин Н. Д., Просвирина И. С. Оценка эффективности применения теплонасосных установок в системах теплоснабжения Астраханской области // Известия АЖКХ. 2000. № 4. 7 с.
5. Сапрыкина Н. Ю., Шишкин Н. Д. Анализ работы комбинированных солнечно-теплоснасосных установок на территории Астраханской области // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал. Астрахань : ГАОУ АО ВПО «АИСИ», 2014. № 2 (8). С. 59–63.

© Н. Ю. Сапрыкина, П. В. Яковлев

#### Ссылка для цитирования:

Сапрыкина Н. Ю., Яковлев П. В. Математическое моделирование изменения температурного поля грунта в режиме работы ТНУ // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский инженерно-строительный институт. Астрахань : ГАОУ АО ВПО «АИСИ», 2015. № 1 (11). С. 69–73