

# ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ. ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ И ЖКХ

---

---

УДК 536.491

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НА ТЕМПЕРАТУРУ ГРУНТА ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ В КОМПЛЕКСЕ С ТЕПЛОВОМ НАСОСОМ, ПРИ ДОЛГОВРЕМЕННОМ НЕСТАЦИОНАРНОМ ЦИКЛИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ

*Н. Ю. Сапрыкина*

*Астраханский государственный архитектурно-строительный университет*

В статье рассматривается изменение температуры грунта при длительной эксплуатации геотермальной системы теплоснабжения и кондиционирования, в комплексе с тепловым насосом в нестационарном циклическом режиме работы. В результате выполненного экспериментального и теоретического исследования получены расчётные зависимости в виде критериальных уравнений для совершенствования методик проектирования и модернизации систем теплоснабжения и кондиционирования, работающих на основе теплонасосной установки с низкопотенциальным источником тепла (вертикальной геотермальной скважиной), а также для повышения надёжности расчёта инженерных систем теплоснабжения и кондиционирования зданий при сезонном нестационарном режиме работы в условиях знакопеременных тепловых потоков.

**Ключевые слова:** температурное поле грунта, тепловой насос, геотермальная скважина, коэффициент регенерации.

## INVESTIGATION OF THE EFFECT ON THE TEMPERATURE OF THE SOIL OF THE GEOTHERMAL SYSTEM HEAT SUPPLY AND AIR CONDITIONING IN COMPLEX WITH HEAT PUMP, WITH A LONG-TERM NONSTATIONARY CYCLIC OPERATION MODE

*N. Yu. Saprykina*

*Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering*

The article discusses the change in soil temperature during long-term operation of a geothermal heat supply and air conditioning system, in conjunction with a heat pump in a non-stationary cyclic mode of operation. As a result of the experimental and theoretical research, the calculated dependencies were obtained in the form of criterion equations for improving the design and modernization methods of heating and air-conditioning systems operating on the basis of a heat pump unit with a low-potential heat source (vertical geothermal well), as well as to improve the reliability of heat supply engineering systems and conditioning of buildings with seasonal unsteady operation in alternating conditions of heat flow.

**Keywords:** temperature field of the ground, heat pump, geothermal well, regeneration factor.

Исследование обуславливается открытостью вопроса о научно обоснованной оценке и необходимости долгосрочного прогноза эффективности работы систем теплоснабжения и кондиционирования, использующих низкопотенциальное геотермальное тепло и работающих в комплексе с тепловым насосом, характеристики которого изменяются вследствие изменения естественного распределения температурного поля Земли при длительной эксплуатации скважины.

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, сформировавшегося под действием разнообразных нестационарных механизмов, определяющих процесс теплосбора (теплоотвода), включая внешние климатические условия, изменение характеристик грунта, а также параметры, конструктивные особенности и технологические режимы работы теплового насоса.

Необходимость совершенствования методики расчета и повышение надёжности систем теплоснабжения и кондиционирования, при долговременной работе теплоэнергетической установки с низкопотенциальным источником тепла в нестационарном циклическом режиме обуславливают актуальность исследования в этом направлении.

Основным методом исследования выбран метод численного моделирования. Учитывая прикладной характер исследования, обобщение полученных результатов произведено с использованием теории подобия с выводом критериальных зависимостей, связывающих влияющие параметры и используемых для дальнейшего совершенствования методики проектирования систем теплоснабжения и кондиционирования, работающих в комплексе с тепловым насосом, на основе долгосрочного прогноза, оценки энергетической и экономической эффективности.

В практике известно большое количество методик оценки эффективности рабочих процессов при эксплуатации теплового насоса. В частности, к ним относятся термодинамиче-

ские (коэффициент полезного использования тепла, энергетический КПД); натуральные (удельные расходы и энергии на единицу услуг); экономические (срок окупаемости, чистая современная стоимость, коэффициент чистой приведенной стоимости, доля затрат на энергетические ресурсы в себестоимости) [1–4].

В исследованиях [5–8] рассматривается метод решения одномерной задачи плоского температурного поля. Внимание уделяется учёту теплофизических свойств на границе грунт-воздух. К сожалению, решение принятых условий рассматривает изменение температуры только по глубине.

В работе [9] проведён ряд исследований на основании нестационарного теплообмена для одной скважины. Анализ представленных общих решений показал существенную разницу между аналитической и численной моделью. Аналитическая модель предполагает постоянный тепловой поток, что не дает возможность охватить различный диапазон изменения температур теплоносителя и теплового потока грунтового теплообменника при работе теплового насоса.

В качестве метода исследования аналогичных исследуемых процессов со сложными условиями однозначности наиболее широко распространён численный метод. Этот метод позволяет получить необходимые результаты и характеристики, позволяя охватить значительный диапазон исследуемых параметров и режимов работы геотермальной скважины [10–20].

Как известно, определение процессов формирования температурного фона основывается на зависимых факторах. При этом ключевым параметром является температура грунта. В исследованиях [18] описывается изменение температуры грунта в течение года. В работе [10] зависимость была интерпретирована с учётом равномерного увеличения температуры ниже зоны сезонной изменчивости. В работах [13, 15, 20] представленное выражение по определению температуры грунта в зависимости от времени с объёмом тепла, направляемого в скважину. Анализ уравнений [10, 18, 13, 15, 20] показал ряд проблем. В уравнении [17] при расчётных операциях получается, что зона промерзания находится в пределах трёх метров и более, что не свойственно большинству климатических регионов. Кроме того, в уравнениях [10, 18] и в [11, 13, 15] вопрос о выборе значений годовой амплитуды колебания температуры  $A$  остается открытым.

Зачастую для получения расчётных зависимостей изменения температурного поля во времени используются видоизменённые, упрощённые уравнения [21, 22] либо обобщение результатов с помощью безразмерных величин [23].

Исследование температурных полей для наклонных скважин с помощью модифициро-

ванного уравнения представлено в [21, 22], которое нашло отражение и в [24] для прямой вертикальной скважины. Авторы [24] представляют в качестве модели поле из 64 скважин. Длина одной скважины составляет 100 м, радиус – 0,05 м, а расстояние между ними – 5 м. Теплопередача рассматривается только в окружающий грунт, внутри скважин при расчётах она не учитывается. Определение температурного поля выглядит в виде функции от времени, в которой характерное время изменения выражается числом Фурье и зависит от коэффициента температуропроводности грунта и характерных габаритов скважины. Исследованиями выявлено, что в течение первых 5 лет среднегодовые максимальная или минимальная температура, в зависимости от направления теплового потока, на стенках обсадной колонны скважины значительно изменяется, когда в течение лета тепло «закачивается» в скважину или отбирается в зимний период [25, 26]. После этого наступает относительная стабилизация и температура продолжает незначительно изменяться примерно до 15 лет и демонстрирует повторяющиеся циклы при каждом подводе и отводе в скважину за период эксплуатации.

Несмотря на широкое применение теплонасосного оборудования в системах теплоснабжения и кондиционирования, вопросы по расчету температурного поля эксплуатируемого грунтового массива до сих пор остаются открытыми. Анализ литературы подтверждает, что ключевой информацией, необходимой для проектирования и успешной эксплуатации систем теплоснабжения и кондиционирования, работающих в комплексе с тепловым насосом при длительных сроках эксплуатации, является исследование удалённых последствий эксплуатации геотермальных скважин. Однако конкретные вопросы реализации и анализ основных показателей изменения массива грунта, диапазонов температур, графики прямого и обратного потоков, специфики требований в период многолетней эксплуатации, динамика и температурные поля в литературе освещены недостаточно полно.

Процесс подвода и отвода тепла в массив грунта является функцией пространства и времени. Температурное поле формируется от геометрического центра – оси скважины. Анализ имеющихся данных по температурным полям [27–32] показывает преобладание потока тепла в радиальном направлении и малую величину теплового потока в осевом направлении. Несмотря на это, учитывая длительность исследуемого периода при многолетней эксплуатации скважин, тепловой поток Земли и отвод тепла с поверхности являются стабилизирующими факторами, обеспечивающими квазистационарное состояние.

Симметричность задачи относительно оси скважины возможна при изотропной среде, т.е. когда отсутствуют возмущающие факторы, такие как фильтрация грунтовых вод или значительная неоднородность грунта. Указанные особенности определяют необходимость решения трёхмерной задачи, а преобладающее радиальное направление целесообразность применения цилиндрической системы координат, в связи с чем для построения модели выбрана цилиндрическая система координат с учётом фонового теплового потока Земли к её поверхности.

Структурную модель принимаем как цилиндрическое тело, состоящее из нескольких контуров [32].

На рисунке 1 приведена модель эксплуатируемого грунта и границы обсадной колонны, которая представляет собой границы эксплуатируемой скважины. Внешняя граница контура – влияние скважины. Внутренней границей является обсадная колонна скважины, через стенку которой и происходит теплообмен между циркулирующим теплоносителем и грунтом.

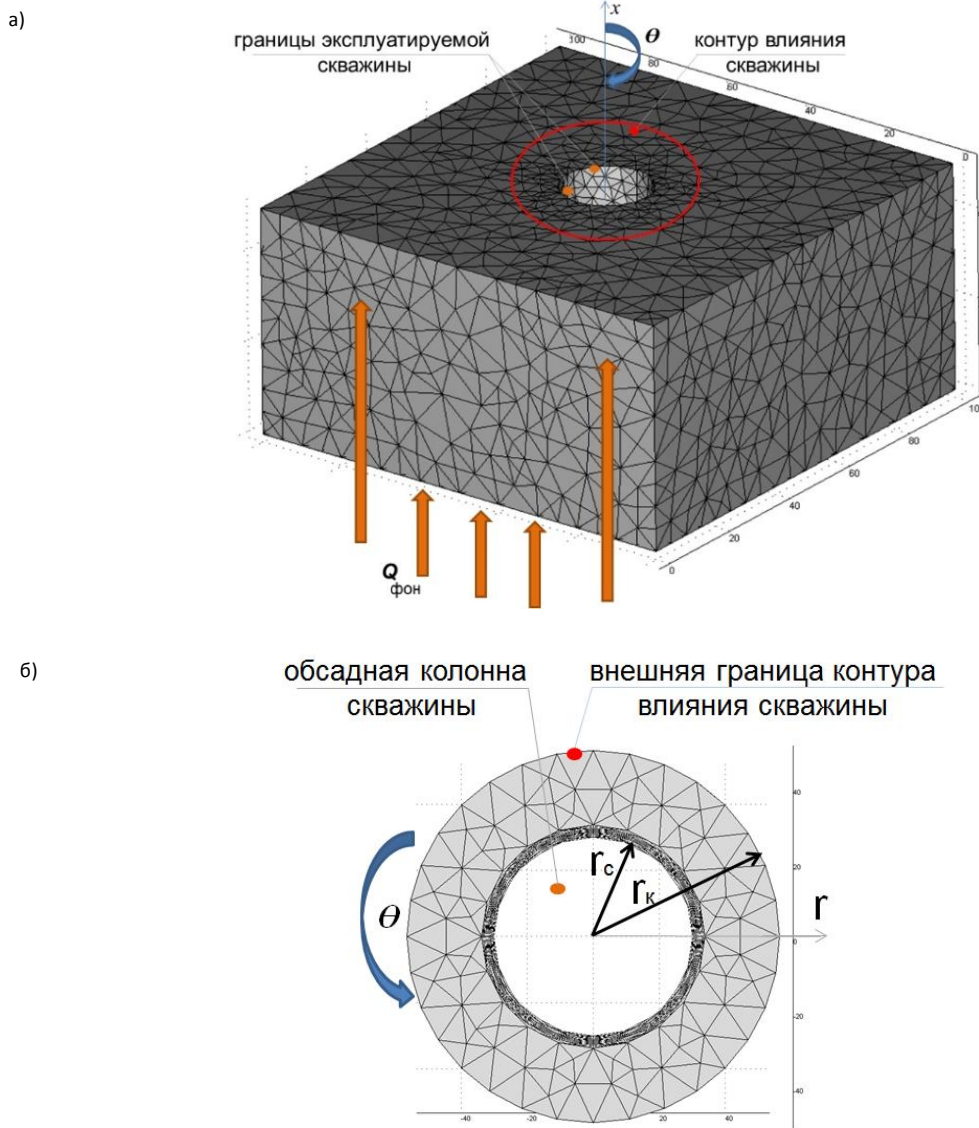


Рис. 1. Модель эксплуатируемого грунтового массива, где  $r_k$  – радиус обсадной колонны, м;  $r_c$  – радиус скважины, м;  $Q_{фон}$  – фоновый поток земли, Вт/м<sup>2</sup>: а) общий вид; б) вид сверху

Целью исследования влияния геотермальных систем теплоснабжения и кондиционирования на температурное поле пласта в зоне влияния скважины является разработка долгосрочного прогноза энергетической эффектив-

ности теплового насоса, характеристики которого изменяются вследствие изменения естественного распределения температурного поля Земли при длительной эксплуатации скважины. Учитывая особенности эксплуатации теп-

лового насоса, выделены и исследованы следующие режимы:

1. Циклические, только подвод или только отвод тепла к пласту без изменения направления теплового потока, чередующиеся с продолжительными остановками теплового насоса, имеющими, как правило, сезонный характер.

2. Циклически чередующиеся подвод и отвод тепла, т.е. со знакопеременным направлением теплового потока с периодами остановки теплонасосного оборудования. Учитывая чередование направления тепловых потоков, этот режим в рамках исследовательской работы предложено назвать режимом с регенерацией.

3. Учитывая наличие в большинстве случаев, грунтовых и их влияние на пластовую температуру, отдельно исследовано влияние фильтрационных потоков на формирующееся температурное поле.

Условиями расчёта определено чередование периодов включения теплового насоса с циклическостью периодов остановки, определяемыми временем года. Время достижения квази-

стационарного режима определялось расчётом и находится в пределах 5 лет, что также подтверждается эксплуатационными параметрами действующих систем. Предельные состояния температуры пласта достигаются к моменту завершения цикла, т.е., например, к окончанию отопительного сезона. В связи, с чем расчётные 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 / м<sup>2</sup>.

Характерное распределение температурного поля в пласте вблизи скважины после каждого этапа эксплуатации, начиная с первого включения и далее, представлено на рисунках 2–4. На рисунках 2–3 приведено температурное поле и график изменения температур по завершении первого этапа эксплуатации, что соответствует шести месяцам.

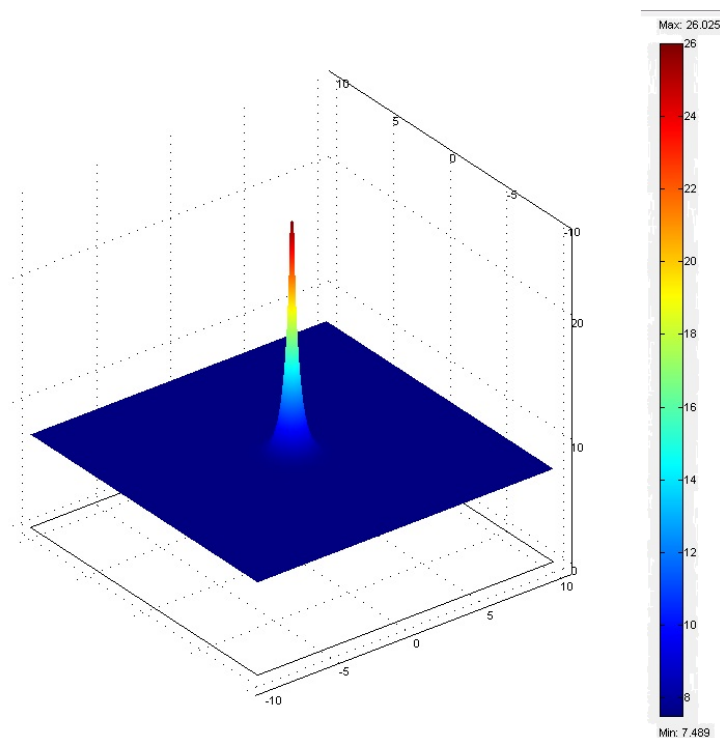


Рис. 2. Изменение температурного поля в процессе активной нагрузки на пласт в течение 6 месяцев

На рисунке 3 представлены результаты расчёта температурного поля после 6 месяцев сезонной нагрузки, т.е. когда тепловой насос не совершает никакой работы. При отключении теплового насоса пласт остывает. Пиковое значение температуры на забое скважины ( $T_{осн}$ ) соответствует отклонению температуры от фоновой в пределах 1 °С. В период остывания

пласта из-за влияния сформировавшегося при нагреве градиента температур, плотности тепловых потоков рассеивания тепла также неравномерны на различных расстояниях от скважины, в связи с чем, температурное поле приобретает волновой характер.

На рисунке 4 изображен график изменения температуры.

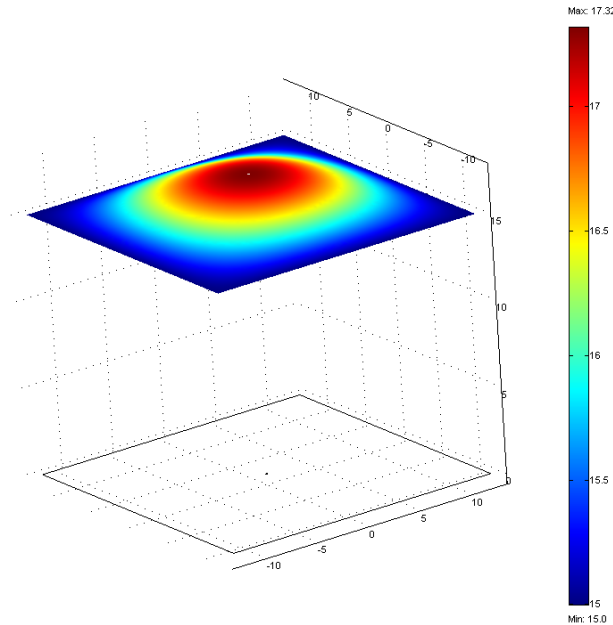


Рис. 3. Температурное поле в период остывания пласта после сезонной тепловой нагрузки

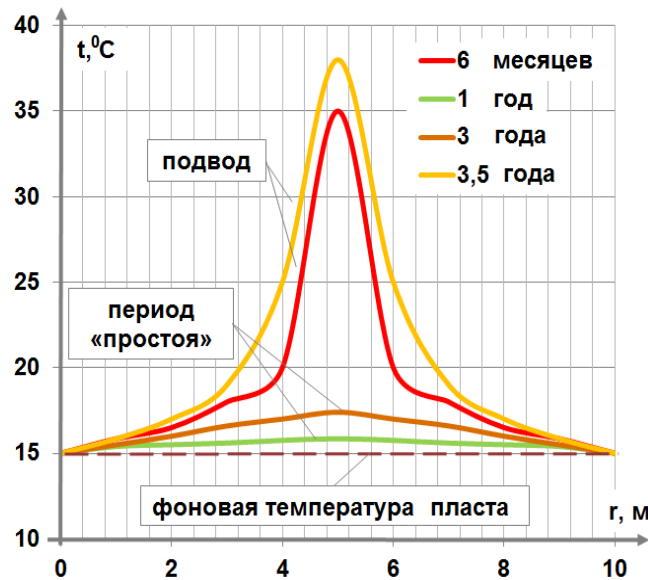


Рис. 4. График изменения пластовой температуры во времени при циклической работе теплового насоса с подводом тепла без реверса

Подвод тепла при работе теплового насоса сопровождается значительным разогревом пласта вблизи забоя скважины ( $T_{осн}$ ) с последующим асимптотическим приближением температуры к фоновому значению на расстоянии 15 м от оси скважины. Эти особенности обусловлены двумя факторами: рассеиванием потока тепла со снижением его плотности обратно пропорционально расстоянию от скважины и тепловой инерцией пласта. Изменение температуры для принятых расчётом условий однозначности и плотности теплового потока  $100 \text{ Вт / м}^2$  (на поверхности обсадной колонны) превышает  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Квазистационарное состояние, соответствующее циклическому режиму без дальнейшего роста

температур, наступает на этапе 3,5 года, в период «простоя» – 3 года.

На рисунках 5–6 представлены графики изменения температурных полей в условиях чередования теплоснабжение / кондиционирование, т.е. при работе теплового насоса круглогодично. Диапазон активных величин составляет  $100 \text{ Вт / м}^2$  и  $-25 \text{ Вт / м}^2$ , а коэффициент регенерации ( $k_p$ ) равен 0,25. Результаты работы первого этапа (6 месяцев) работы аналогичны с рисунком 2. Ввиду того, что на втором этапе (1 год) вводится другая по направлению активная нагрузка и вид тепловой волны сильно отличается от предыдущего этапа (рис. 5), приобретая выраженную форму тепловой волны.

Характер распределения температур радиальный (от оси скважины), но имеет отличие по значениям температур грунта. На удалении 10–15 м от скважины сохранились следы теплового воздействия первого цикла в виде зон повы-

шенной температуры (выше фоновых значений), на расстоянии 7–8 м от оси скважины температура понижается со значительным градиентом (рис. 6).

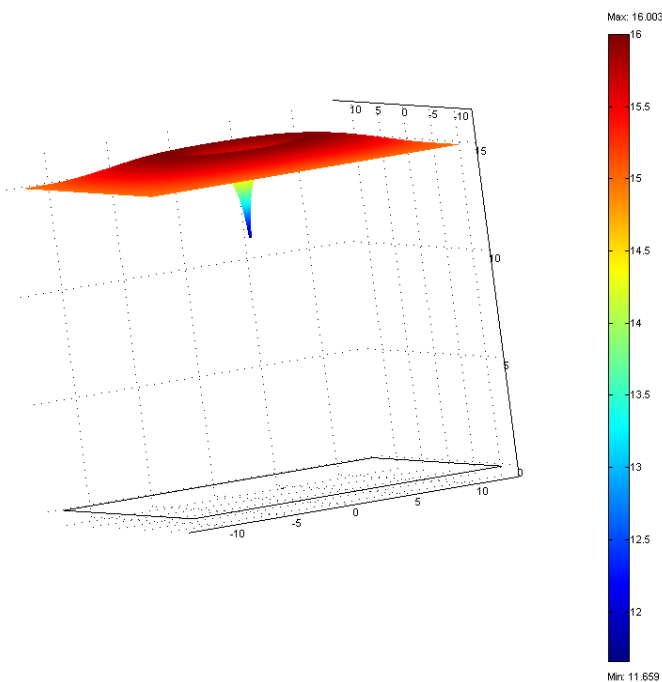


Рис. 5. Изменение температурного поля при знакопеременном режиме в период подвода активной (знакопеременной) нагрузки на пласт

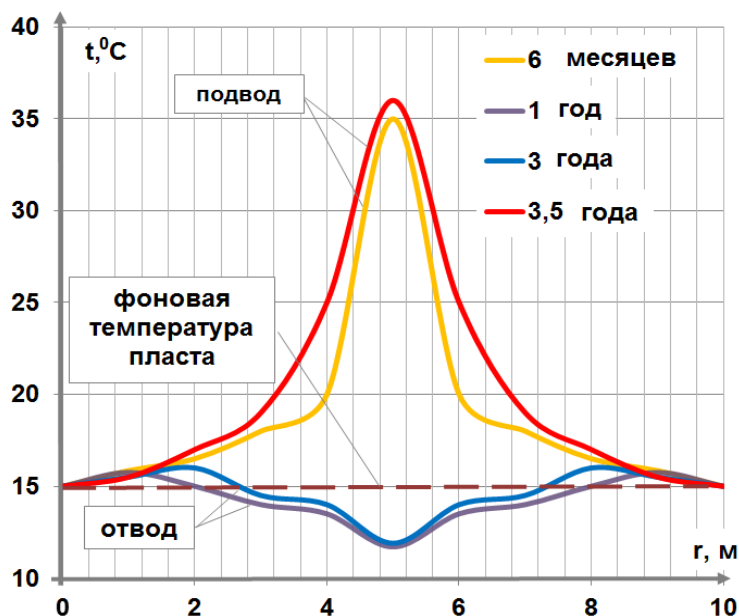


Рис. 6. Изменение температуры пласта с начала первого включения до установления квазистационарного состояния в знакопеременном режиме

Обработка полученных результатов при различных режимах, описанных выше, выполняется с целью получения зависимостей для разработки методики инженерных и технико-экономических расчётов систем теплоснабжения и кондиционирования, работающих в комплексе с тепловым

насосом. Для возможности распространения полученных результатов экспериментальных и теоретических исследований на широкий круг объектов проектирования использовалась теория подобия. В условиях обобщения полученных результатов и возможности их распространения



на расчеты технико-экономических показателей в рамках исследовательской работы введены понятия: безразмерный активный поток и безразмерная температура.

Результаты расчёта зависимости определяемой температуры на забое геотермальной скважины ( $T_{осн}$ ) как функции от определяющих параметров, представлены на рисунке 7 в безразмерном виде.

Как видно из графика, полученные результаты хорошо аппроксимируются полиномами второго порядка. Используя методы статистической обработки, получено следующее критериальное уравнение для однопоточного режима работы инженерных систем теплоснабжения или кондиционирования в комплексе с тепловым насосом:

$$\theta = -5 \cdot 10^{-9} \cdot Q \cdot Fo^2 + 2 \cdot 10^{-8} Fo \cdot Q + 0,0003 \cdot Q + 5,1 \quad (1)$$

Представлены результаты влияния на температурное поле на этапе 1 года эксплуатации коэффициента регенерации ( $k_p$ ) для величин активных нагрузок в диапазоне (+100 ÷ -100 Вт / м<sup>2</sup>) и коэффициента регенерации ( $k_p$ ) от 0,25 до 1. Изменение температуры пласта от значений коэффициента регенерации ( $k_p = 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1$ ) при различных величинах тепловой нагрузки (от 100 до 200 Вт / м<sup>2</sup>) за 2 года эксплуатации теплового насоса в режиме чередования теплоснабжение/кондиционирование приведено на рисунке 8.

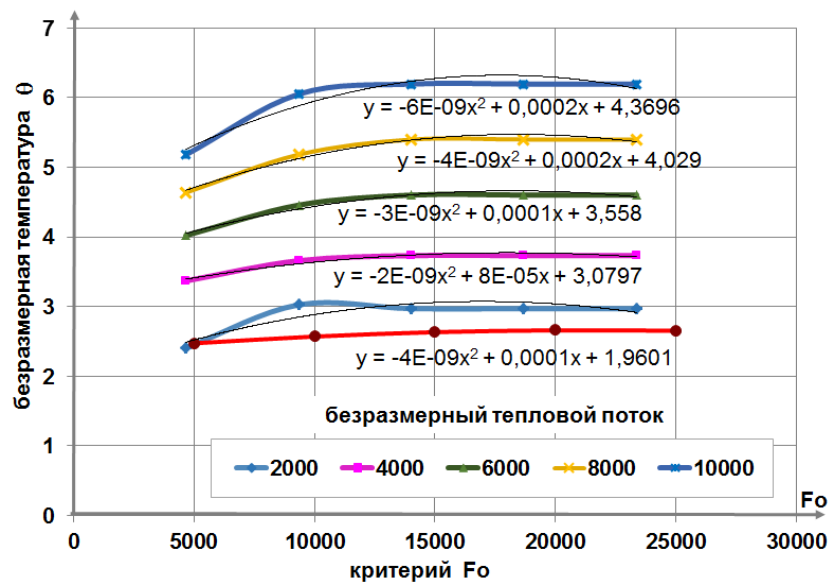


Рис. 7. Зависимость безразмерной температуры ( $\theta$ ) от критерия  $Fo$  при значениях безразмерного активного (теплового) потока ( $Q$ )

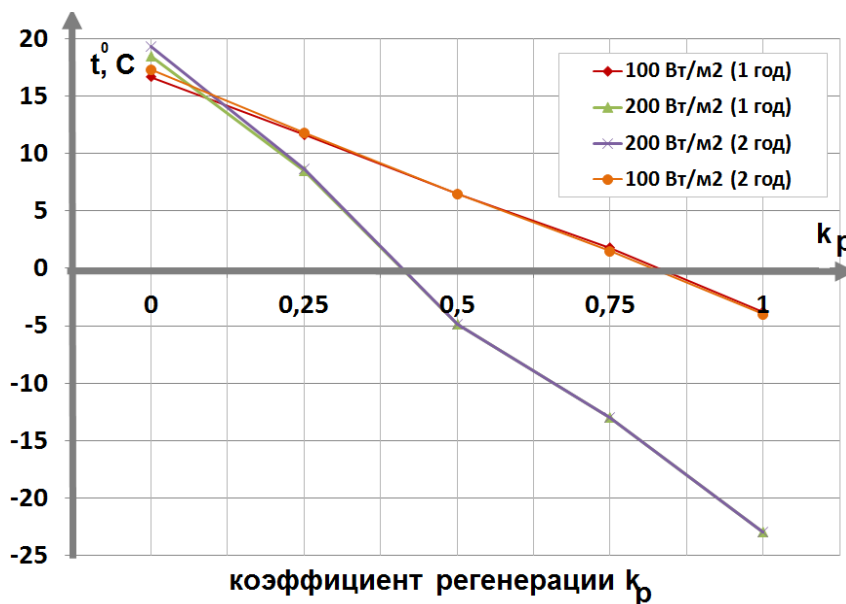


Рис. 8. Зависимость температуры грунта от коэффициента регенерации ( $k_p$ )

Результаты указывают на то, что при отводе тепла пласт охлаждается, а при подводе нагревается. Последовательное реверсирование теплового насоса приводит к появлению системы тепловых волн, которые приводят к изменениям температуры скважины и влияют на технико-экономические параметры инженерных систем. Результаты исследования позволили прийти к выводу о том, что ежегодное падение грунтовой температуры будет постепенно со-

кращаться в условиях регенерации. Это говорит о том, что процесс регенерации позволяет компенсировать величины тепловой нагрузки. При этом объем грунтового массива, подверженного изменению температурного режима, будет расширяться с каждым годом.

Результаты оцифрованных расчетных данных, представленных на рисунке 7, можно изобразить в виде графической зависимости (рис. 9).

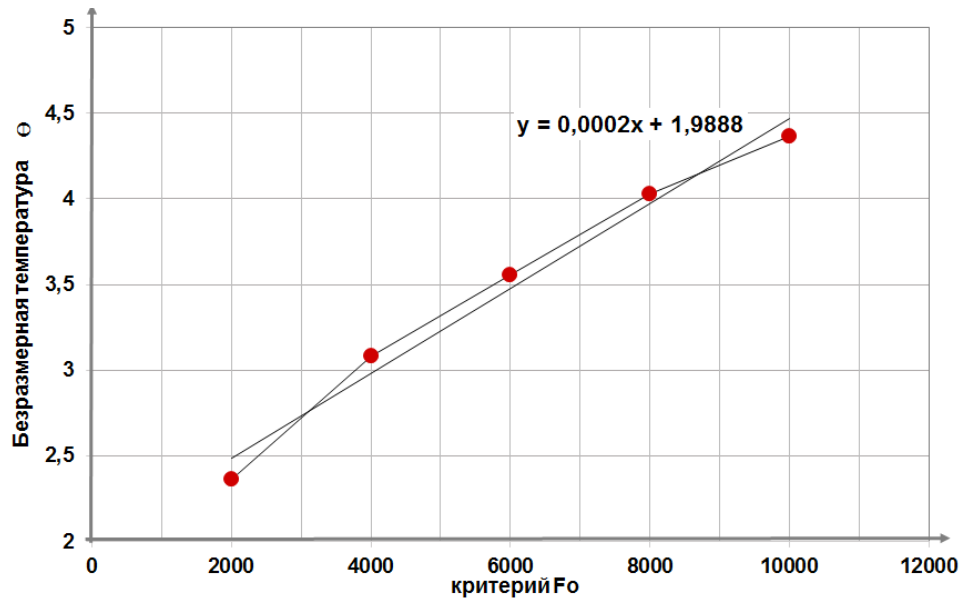


Рис. 9. Зависимость расчетных значений безразмерной температуры температурного поля без регенерации с оцифровкой данных

Таким образом, полученное уравнение (линия тренда) может служить поправкой к расчету основного выражения (1). На основании этого и был получен следующий вид уточненного критериального уравнения с поправкой на коэффициент регенерации  $k_p$  для знакопеременного режима работы инженерных систем (2):

$$\theta = -5 \cdot 10^{-9} \cdot Q \cdot Fo^2 + 2 \cdot 10^{-8} Fo \cdot Q + 0,0003 \cdot Q + 5,1(0,0002k_p + 1,98) \quad (2)$$

где  $k_p$  – коэффициент регенерации.

Исследования показали, что в результате длительной эксплуатации инженерных систем (теплоснабжение, кондиционирование), использующих геотермальное тепло и работающих в комплексе с тепловым насосом в течение продолжительного времени, происходят изменения температурного поля земли. Эти изменения температурного поля грунта затрагивают пространство вокруг эксплуатируемой геотермальной скважины в пределах радиуса 25–30 м. Наступление стабилизации температурного поля происходит в течение 3–4 лет, в зависимости от параметров грунта и режимов работы теплонасосной установки.

Вторым фактором, влияющим на технико-экономические показатели работы инженерного комплекса, является режим его эксплуатации. В качестве существенных особенностей можно отметить циклический характер работы теплонасосной установки, обусловленный сезонностью нагрузки, циклическую работу в знакопеременном режиме подвода / отвода тепла. На основании полученных результатов можно отметить следующее: во-первых, в условиях работы теплового насоса в однопоточном режиме (только на теплоснабжение или только на кондиционирование, т.е. без изменения направления теплового потока), получено, что за первые три года температура грунтового массива повышается (или понижается в зависимости от направления потока тепла), а начиная с 3-го года стабилизируется; во-вторых, в условиях работы теплового насоса в знакопеременном режиме (зимой – теплоснабжение, летом – кондиционирование, т.е. с изменением направления теплового потока), температурное поле грунта стабилизируется уже на 2-м году эксплуатации. Выход на квазистационарное состояние при каждом из режимов (с регенерацией и без нее) объясняется тем, что работающая геотермальная скважина представляет собой локальный источ-





ник (сток) тепла в фоновом температурном поле Земли. При подводе тепла тепловой поток скважины отдает поверхности Земли, а при отводе, понижение температуры компенсируется фоновым тепловым потоком. Радиус влияния скважины определяется параметрами ее работы теплофизическими свойствами грунта и плотностью фонового потока.

Обобщены полученные результаты исследования теплообменных процессов между теплоносителем и грунтом с учётом долгосрочной эксплуатации систем теплоснабжения и кондиционирования в циклических режимах и получены критериальные зависимости для расчёта температурных напоров, учитывающие климатическую цикличность тепловых нагрузок.

#### Список литературы

1. Алгоритм формирования региональных программ энергосбережения. URL: [un/files/energo\\_review/algorithmregionalnyhprogrammenef.pdf](http://un/files/energo_review/algorithmregionalnyhprogrammenef.pdf).
2. Могиленко А., Павлюченко Д. Энергосбережение и энергоэффективность. Важные аспекты мониторинга и анализа // *Новости электротехники*. 2012. №4 (76). URL: <http://www.news.elteh.ru/arh/2011/70/08.php>.
3. Правила расчета потенциала энергосбережения / Некоммерческое партнерство «Межрегиональное объединение организаций энергетического обследования транспортного комплекса «СоюзДорЭнерго». М., 2010.
4. Шкрет А. Ф. Методические особенности оценки экономической эффективности энергосберегающих мероприятий // *Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности* : мат-лы Четвертой Росс. науч.-техн. конф., Ульяновск, 24–25 апреля 2003 г. Ульяновск, 2003. б/н.
5. Руденко Н. Н. Особенности прогнозирования эффективности работы теплового насоса // *Инженерный вестник Дона* (электронный журнал). 2012. № 4–1. URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4p1y2012/1129>.
6. Руденко Н. Н., Бондарев И. В. Выбор граничных условий для моделирования температурного поля грунта // *Инженерный вестник Дона* (электронный журнал). 2013. № 4. URL: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/2137>.
7. Руденко Н. Н., Фурсова И. Н. Влияние солнечной радиации на температурный режим грунта // *Инженерный вестник Дона* (электронный журнал). 2013. –№4. URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/2078>.
8. Руденко Н. Н., Фурсова И. Н. Моделирование температурного поля в грунте [Электронный ресурс] // *Инженерный вестник Дона* (электронный журнал). 2013. №2. URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1697>.
9. Eskilson P. Thermal analysis of heat extraction boreholes // Thesis, Dep. of Mathematical Physics, University of Lund, Sweden, 1987.
10. Кидрук М. И. Моделирование работы грунтового коллектора теплового насоса. URL: <http://progress21.com.ua/ru/news/poleznaya-informatsiya/item/35-modelirovanie-i-optimizatsiya-sistem-teplosnabzheniya-zdaniy-s-ispolzovaniem-vozobnovlyaemykh-istochnikov-tepla-teplovoj-nasos-i-solnechnyj-kollektor>.
11. Костиков А. О., Харлампиди Д. Х. Влияние теплового состояния грунта на эффективность теплонасосной установки с грунтовым теплообменником // *Энергетика: экономика, технологии, экология*. 2009. № 1. С. 32–40.
12. Никитин А. А., Крылов В. А., Любимцев А. С. Расчет геотермального теплообменника в программе ELCUT // *Современные методы и средства исследований теплофизических свойств веществ* : сб. тр. II Междунар. науч.-техн. конф. СПб. : НИУ ИТМО, 2012. С. 191–196.
13. Al-Ajmi F., Loveday D. L., Hanby V. I. The cooling potential of earth-air heat exchangers for domestic buildings in a desert climate // *Building and Environment*. 2006. № 41. P. 235–244.
14. Changsheng G., Shaoran Y. Numerical methods for temperature field about random heat source model of ground source heat pump // *American Journal of Industrial Engineering*. 2013. Vol. 1, № 2. P. 20–27.
15. Nordell B., Grein M., Kharseh M. Large-scale utilization of renewable energy requires energy storage // *International Conference for Renewable Energies and Sustainable Development*. Université Abou Bekr. 2007.
16. Nordell B., Söderlund M. Solar energy and heat storage // *Luleå University of Technology*. 2000.
17. Omer A. M. Ground-source heat pumps systems and applications // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2008. № 12. P. 344–371.
18. RETScreen @ International. Ground-source Heat Pump Project Analysis: Chapter // *RETScreen @ Engineering & Cases Textbook*. Ministry of Natural Sources of Canada, 2005. 70 p.
19. Yoon G., Okumiya M. Development and validation of numerical models of borehole heat exchanger for GSHP (double U-TUBE type and concentric tube type). URL: [https://intraweb.stockton.edu/eyos/energy\\_studies/content/docs/FINAL\\_PAPERS/7A-2.pdf](https://intraweb.stockton.edu/eyos/energy_studies/content/docs/FINAL_PAPERS/7A-2.pdf).
20. Ozgener O., Hepbasli A. Modelling and performance evaluation of ground source (geothermal) heat pump systems // *Energy and Buildings*. 2007. № 39. P. 66–75.
21. Lamarche L. Analytical g-function for inclined boreholes in ground-source heat pump systems // *Geothermics*. 2011. № 40. P. 241–249.
22. Lamarche L., Beauchamp B. A new contribution to the finite line-source model for geothermal boreholes // *Energy and Buildings*. 2007. № 39. P. 188–198.
23. Cui P., Li X., Man Y., Fang Z. Heat transfer analysis of pile geothermal heat exchangers with spiral coils // *Applied Energy*. 2011. № 88. P. 4113–4119.
24. Monzó P., Acuña J., Mogensen P., B. Palm A study of the thermal response of a borehole field in winter and summer // *International conference on applied energy ICAE*. Jul 1–4 2013.
25. Басок Б. И., Авраменко А. А., Рыжов С. С., Лунина А. А. Динамика теплообмена жидкости в грунтовом прямолинейном одиночном трубном элементе (теплообменнике) // *Пром. теплотехника*. 2009. Т. 31, № 1. С. 62–67.
26. Тарасова В. А., Харлампиди Д. Х., Шерстюк А. В. Моделирование тепловых режимов совместной работы грунтового теплообменника и теплонасосной установки // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2011. № 5 / 8 (53). С. 34–40.
27. Кротов В. М. Совершенствование методики расчета первичного контура систем теплоснабжения, использующих низкпотенциальную теплоту грунта : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Тюмень, 2011. 19 с.
28. Малых В. В., Удалов С. Н., Захаров А. А. Методика расчета грунтового аккумулятора // *Энерго- и ресурсоэффективность малоэтажных зданий* : мат-ы научно-практ. конф. / Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН. Новосибирск. 19–20 марта 2013. С. 317–318.
29. Смирнов С. С. Теоретические основы и технологии извлечения геотермальной энергии с использованием абсорбционных тепловых насосов : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Новочеркасск., 2011. 19 с.
30. Штыль А. С., Маркелова И. А. Системы теплосбора для геотермальных тепловых насосов // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Строительство и архитектура*. 2011. № 23. С. 126–133.

31. Witte H. J. L. Geothermal response tests: The design and engineering of geothermal energy systems. 2001.  
 32. Сапрыкина Н. Ю., Яковлев П. В. Моделирование температурного поля грунта при многолетней эксплуатации низкопотенциальных геотермальных скважин // Потенциал интеллектуально одаренной молодежи развитию науки и образования : сб. тр. Шестого Междунар. науч. форума молодых ученых, студентов и школьников (25–28 апреля 2017 г., Астрахань). Астрахань ; 2017. С. 29-33.

© Н. Ю. Сапрыкина

**Ссылка для цитирования:**  
 Сапрыкина Н. Ю. Исследование влияния на температуру грунта геотермальной системы теплоснабжения и кондиционирования в комплексе с тепловым насосом, при долговременном нестационарном циклическом режиме работы // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2018. № 3 (25). С. 19–27.

УДК 697.1; 697.7; 697.9

## ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ ДЛЯ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ АСТРАХАНСКОЙ ОБЛАСТИ

**О. Р. Муканова, Р. В. Муканов, Е. М. Дербасова**

*Астраханский государственный архитектурно-строительный университет*

Проведён анализ энергоэффективных технологий и возможности их использования в системах теплоснабжения и отопления объектов в условиях Астраханской области. Выявлены достоинства и недостатки анализируемых систем, дана оценка эффективности их функционирования.

**Ключевые слова:** альтернативный источник энергии, система теплоснабжения, котел, КПД, наладка, источник тепла.

## PROSPECTS OF USING ALTERNATIVE ENERGY SOURCES FOR HEAT SUPPLY SYSTEMS OF ASTRAKHAN OBJECT OBJECTS

**O. R. Mukanova, R. V. Mukanov, E. M. Derbasova**

*Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering*

The analysis of energy-efficient technologies and the possibility of their use in the systems of heat supply and heating facilities in the Astrakhan region. The advantages and disadvantages of the analyzed systems are identified, the effectiveness of their functioning is assessed.

**Keywords:** alternative energy source, heating system, boiler, efficiency, adjustment, heat source.

В настоящее время в мире наблюдается бум использования альтернативных источников энергии. В Европе до 2030 г. планируется вырабатывать до 30 % энергии, используя альтернативные и возобновляемые источники энергии. Для оценки возможности их использования в системах теплоснабжения и отопления, рассмотрим и проведем анализ наиболее эффективных технологии применительно к Астраханской области.

### Бивальные и мультизональные системы отопления

Бивальные и мультизональные системы отопления, в основе которых положена работа различных модификаций тепловых насосов, могут экономить до 30–40 % органического энергоносителя (газа, жидкого топлива) за отопительный сезон [1].

В бивальных установках систем теплоснабжения в паре с тепловым насосом работают водогрейные котлоагрегаты на органическом топливе или электродкотлы.

Бивальными такие установки называют в силу того, что подключение программатором пикового теплоисточника (котла, электродкотла) происходит только в момент снижения температуры наружного воздуха ниже, так называемой бивалентной точки (обычно отрицательной). В остальном диапазоне наружных темпе-

ратур до самой низкой бивалентной точки наружного воздуха, отопление осуществляется за счет теплового насоса (ТН).

В мультизональных системах теплоснабжения к основной сети воздушного отопления – охлаждения, создаваемого тепловыми насосами с кольцевым контуром, вставляется охладитель (градирня) и нагреватель (водогрейный или электрический котел). Охладитель контура предназначен для выведения излишков тепла, а нагреватель для быстрой компенсации температур (разогрев здания, резкое падение температур наружного воздуха и др.). Идея кольцевого контура состоит в том, что все ТН объединяются через циркуляционный насос одной водяной гидравлической системой. Благодаря этому становится возможным передавать теплоизбытки от ТН, работающих на охлаждение, к ТН, работающим на нагрев. Каждый ТН в мультизональной системе снабжается собственным термостатом тепло / холод, устанавливаемом в обслуживаемом помещении. По сигналам этого термостата он и управляется, обеспечивая поддержание заданной температуры. Система автоматически сбалансирована по теплу. «Холодные» помещения, нагреваются, «перегретые» охлаждаются, независимо от времени года.

Единственная система отопления и кондиционирования, которая может обеспечить сопоста-