

УДК 697.7

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ЭКСПЛУАТИРУЕМОГО ГРУНТОВОГО МАССИВА В УСЛОВИЯХ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГЕОТЕРМАЛЬНОГО ТЕПЛОНАСОСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Н. Ю. Сапрыкина, П. В. Яковлев

Астраханский инженерно-строительный институт

Выполнен детальный анализ температурного поля при эксплуатации геотермальных тепловых насосов в течение длительного периода, учтены теплофизические параметры грунта и фоновый тепловой поток Земли, разработана методика расчета параметров работы ТНУ при длительном сроке эксплуатации.

Ключевые слова: температурное поле грунта, модель, тепловой насос, грунтовый массив, геотермальная скважина, моделирование температурного поля.

MODELING OF THE TEMPERATURE FIELD OPERATED SOIL MASSIF IN CONTINUOUS OPERATION GEOTHERMAL HEAT PUMP EQUIPMENT

N. U. Saprykina, P. V. Yakovlev

Astrakhan Institute of Civil Engineering

Are analyzed the temperature field in the operation of geothermal heat pump for an extended period, are accounted the thermal parameters of soil heat flux and the background of the Earth, are developed the method of calculation parameters of the heat pump at a long service life.

Keywords: soil temperature field, model, heat pump, ground array, geothermal wells, the temperature field modeling.

Непрерывный отбор или сброс тепла в грунт приводят к значительному изменению теплового баланса Земли в местах размещения геотермальных скважин. Смена температурного фона грунта, формируемого в условиях многолетней эксплуатации теплонасосной установки (ТНУ), вызывает значительное изменение температурного режима установки, что приводит к падению технико-экономических параметров всей системы относительно ее проектных значений [1–3]. Указанные изменения зависят от геологических и гидрогеологических особенностей эксплуатируемого пласта, фоновых тепловых потоков, климатических условий, а также параметров работы ТНУ, в числе которых особенности скважин и их количество, температурные режимы обслуживаемого объекта и тепловая нагрузка, в том числе изменение нагрузки во времени. Проектирование геотермальных возобновляемых источников энергии с учетом перечисленных особенностей ставит перед разработчиками задачи: во-первых, определить допустимую экономически и технологически оправданную тепловую нагрузку и рабочие значения температур скважины; во-вторых, спрогнозировать изменение температурного поля грунта при многолетней эксплуатации скважины с учетом особенностей теплофизических параметров грунта [4].

Учитывая значительное число определяющих параметров, прогнозирование многолетних изменений температурного поля эксплуатируемого грунтового массива на этапе проектирования возможно с помощью математической модели геотермальной скважины.

Математическая модель температурного поля грунта при использовании геотермальной энергии базируется на решении задачи нестационарной теплопроводности [5], которое в случае геотермальной скважины имеет существенные особенности.

На рис. 1 приведена расчетная модель скважины, включающая границу эксплуатируемой скважины (обсадную колонну), внешнюю границу контура – зону влияния скважины, определяемую достижением фоновых значений температуры в пределах погрешности расчета, на которые накладывается фоновый тепловой поток Земли.

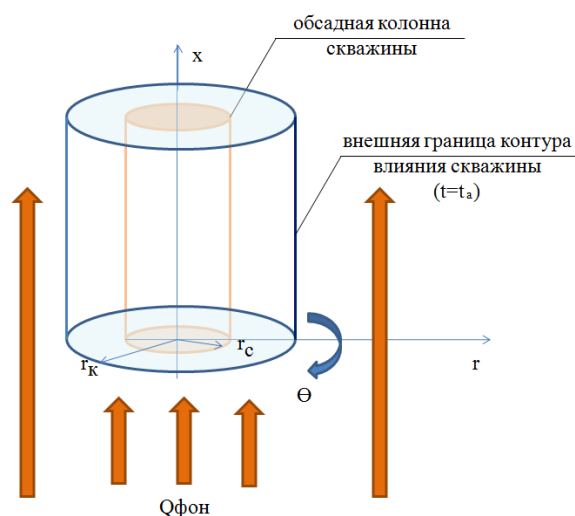


Рис. 1. Модель эксплуатируемого грунтового массива:
 r_k – радиус контура влияния скважины,
 r_c – радиус скважины, $Q_{фон}$ – фоновый поток Земли

Учитывая постановку задачи изменения температурного режима грунта во времени, а также цикличность использованная ТНУ, в основу модели положено дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности. Анализ показывает, что тепловой поток в осевом направлении пренебрежимо мал относительно потока в радиальном направлении, что позволяет свести решение к одномерной задаче и целесообразности записи уравнения в цилиндрических координатах. Это существенно упрощает решение, и подобный подход реализуется в большинстве известных расчетов геотермальных скважин. Однако расчет долгосрочного прогноза температурного поля по упрощенной модели дает завышенные значения температурных напоров относительно известных значений действующих скважин. Можно устранить указанное противоречие, рассмотрев скважину как возмущающий фактор в фоновом тепловом потоке Земли, то есть вернуться к необходимости включения в модель потока в осевом направлении. Сезонные колебания температур на поверхности в сочетании со значительной тепловой инерцией грунта, незначительные изменения температуры на глубине как результат эксплуатации ТНУ усложняют решение и одновременно приводят к накоплению погрешности на каждом этапе вычислений, что, в сочетании с малыми порядками тепловых потоков в осевом направлении, ставит вопрос достоверности решения. Устранить указанное противоречие позволяет включение в одномерную модель фонового теплового потока Земли как объемного источника (стока) тепла. В этом случае дифференциальное уравнение примет следующий вид:

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

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

Расчет нестационарного температурного поля вокруг геотермальной скважины аналитическим способом возможен только для простейшего случая непрерывной стационарной работы ТНУ, что не соответствует реальным режимам работы подобных установок. Аналитический метод исследования для реальных условий эксплуатации геотермальной скважины требует введения допущений, практически исключающих получение достоверного решения. Таким образом, возможно решение данной задачи аналитическим способом только для простейших случаев, определяемых допущением о постоянстве граничных условий и отсутствии источников и стоков тепла.

Геотермальная скважина является сложным объектом расчета и характеризуется переменными граничными условиями, зависящими

от климатических особенностей региона, режима работы объекта, времени года, изменения теплофизических свойств грунта и т. д. [6–9]. 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. Согласно [10], принимаем сетку и контрольный объем в координатах r, θ в полярных координатах (рис. 2).

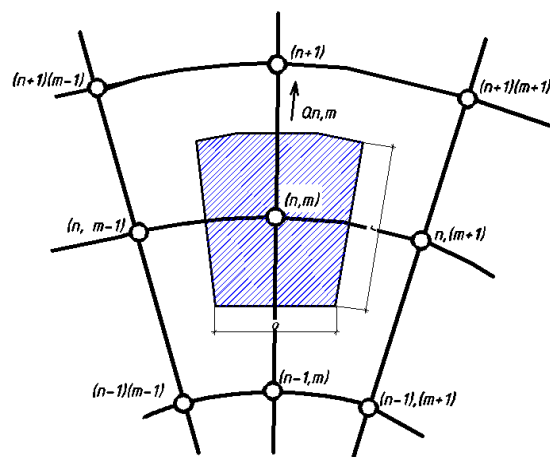


Рис. 2. Сетка и контрольный объем в полярных координатах

Цикличность включения ТНУ, чаще всего обусловленная сезонными причинами, приводит к циклическим изменениям поля температур и с каждым циклом стремится к некоему квазистационарному состоянию, когда изменения температур происходят во времени и воспроизводят предыдущий цикл [11–13]. Второй особенностью, которая должна быть учтена в исследовании, является возможность включения ТНУ в реверсном режиме, то есть когда меняется направление теплового потока, например, в режиме «зима-лето». Рассмотрим полученные результаты.

На рис. 3–5 приведены результаты исследования циклических изменений температурного поля с активной нагрузкой без изменения направления теплового потока, выполненные на базе прикладной программы MathLab.

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, то есть, 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 приведено на рис. 3.

Как видно из представленных результатов, тепловой поток в пласте вокруг скважины

распространяется радиально. При подводе тепла в скважину температура пласта увеличивается и изменяется по логарифмическому закону. При отключении ТНУ пласт остывает. В период остывания пласта, с учетом фоновой температуры пласта и инерции теплового потока Земли, температурное поле приобретает волновой характер, который визуализирован как след капли на поверхности жидкости.

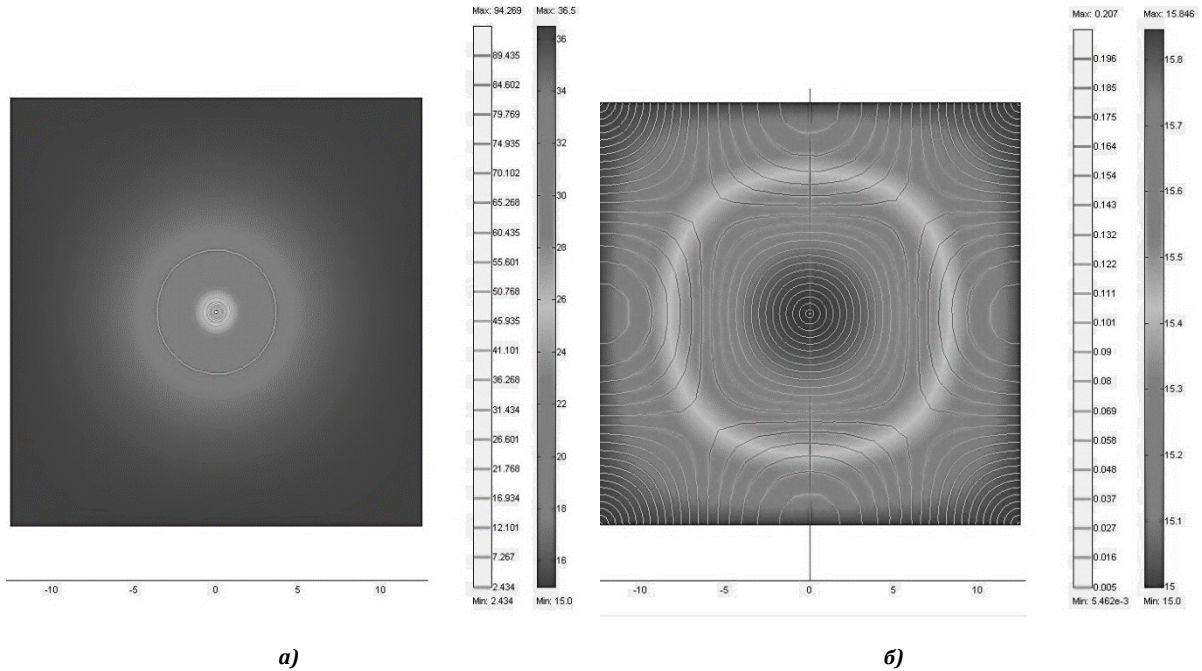


Рис. 3. Температурное поле при эксплуатации в течение: а) 6 месяцев; б) 1 года

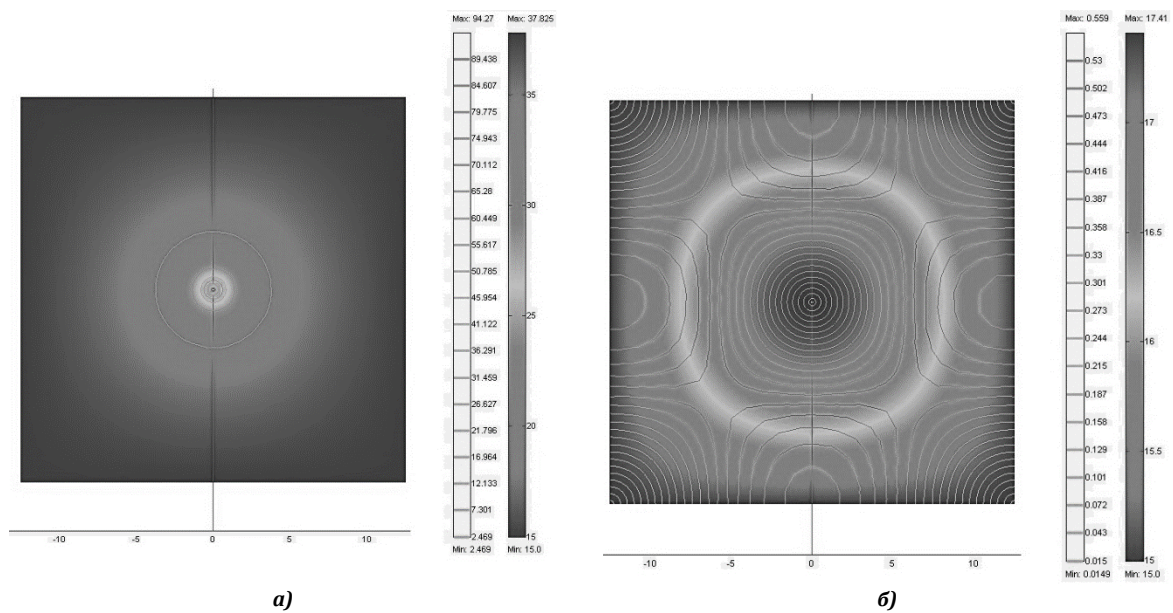


Рис. 4. Температурное поле при эксплуатации в течение: а) 2,5 лет; б) 3 лет

Графическое изображение последующих этапов эксплуатации (рис. 4а) наглядно показывает увеличение границы зоны изменения температур от границ скважины. Обработка результатов, за 2 года эксплуатации показала изменение средней температуры в диапазоне от 2 до 8 °С при постоянной величине активной

тепловой нагрузки и от 1,5 до 1,9 °С в период остывания пласта.

Изображение полей последующих этапов (рис. 4–5) демонстрирует продолжение увеличение границ исследуемого поля. Температура нагреваемого пласта изменяется в среднем до 10 °С, охлаждаемого – в пределах от 0,5 до 1 °С.

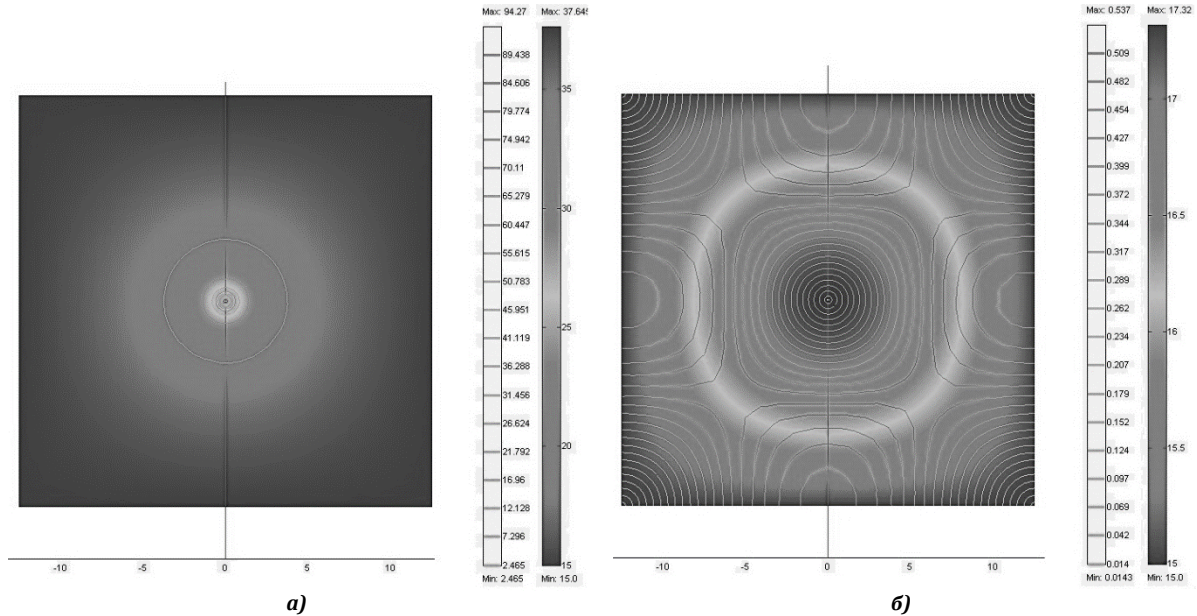


Рис. 5. Температурное поле при эксплуатации в течение: а) 4,5 лет; б) 5 лет

Температурные режимы 9-го и 10-го этапов остались неизменны по сравнению с предыдущими (7-м и 8-м), что свидетельствует о достижении квазистационарного состояния. В период остывания температурное поле грунта на глубине скважины находится под влиянием фонового теплового потока земли. Влиянием колебаний температуры наружного воздуха на большой глубине можно пренебречь.

Физическая картина изменений температурных волн пласта проиллюстрирована на примере графиков распределения температуры (рис. 6–8).

Резкий скачок обусловлен нагрузкой на пласт, который в течение длительного времени сохранял постоянные температуры. При начале подвода тепла из-за малости радиуса распространения зоны возмущения градиент температуры стремится к бесконечности, вследствие чего быстро увеличивается температура вблизи скважины.

Дальнейшее изменение температуры в пласте приводит к падению градиента температур, снижая темп изменения температурного поля (см. рис. 6а, б).

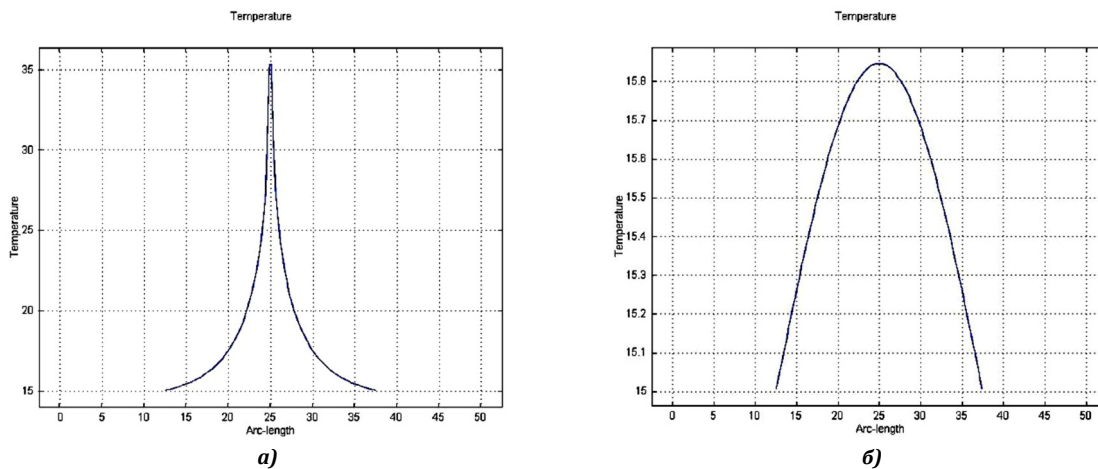


Рис. 6. Температура пласта по истечении: а) 6 месяцев; б) 1 года

При остановке подвода тепла происходит выравнивание температуры поля грунта. Как видно из рис. 6а, в период, когда тепловой насос не совершает никакой работы (период простоя), с учетом фоновой температуры пласта и инер-

ции теплового потока Земли, градиент вблизи скважины равен нулю.

Повторные включения ТНУ приводят к наложению этих температурных полей по принципу суперпозиции.

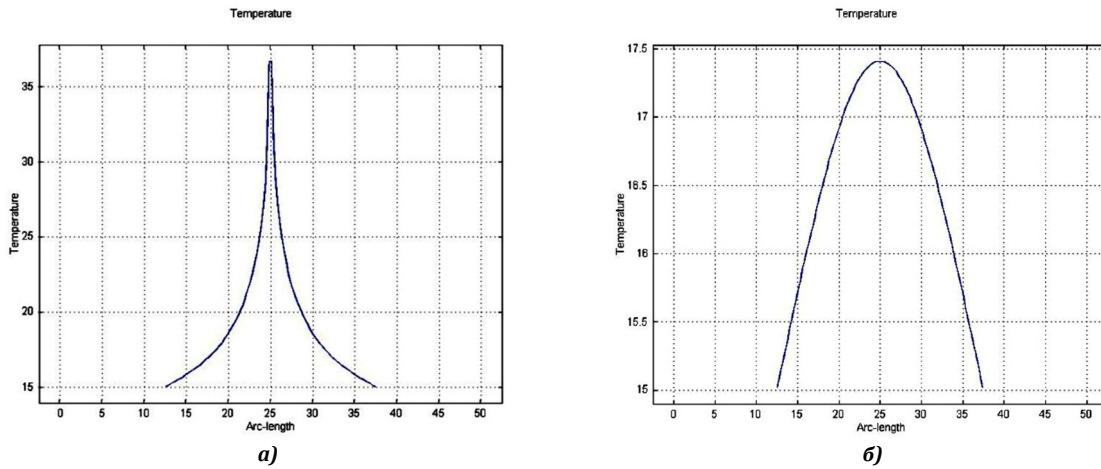


Рис. 7. Температура пласта по истечении: а) 2,5 лет; б) 3 лет

Расширение границ возле эксплуатируемой скважины обусловлено временем работы и циклическостью подвода тепловой нагрузки (рис. 7а), а температура в соответствующие временные моменты цикла стремится к постоянному значению, то есть наступает квазистационарное состояние. Исследованиями выяв-

лено, что в зависимости от величины активной тепловой нагрузки (от 100 до 500 Вт) температура нагреваемого пласта в среднем изменяется до 10 °С. В период остывания пласта (рис. 7б) температура грунта в среднем с каждым последующим годом эксплуатации увеличивается на 0,5–1 °С.

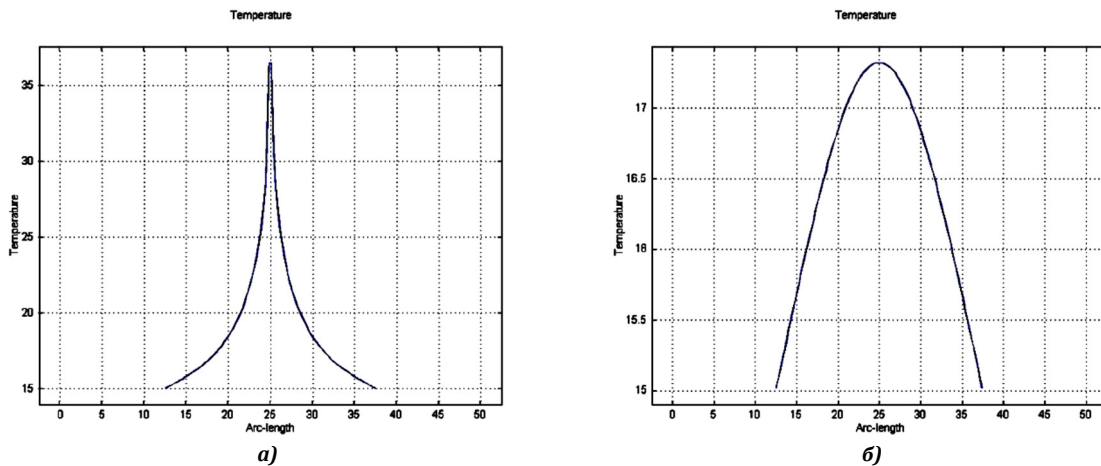


Рис. 8. Температура пласта по истечении: а) 4,5 лет; б) 5 лет

Сопоставление графиков изменения температуры еще раз наглядно доказывает, что стабилизация температурного поля в период остывания начинается лишь с 3-го года эксплуатации. Таким образом, в связи с тем, что скважина является «инородным объектом», на первых этапах эксплуатации она искажает фоновый температурный режим пласта. При циклическом подводе тепловой активной нагрузки в течение 3–5 лет формируется квазистационарный температурный фон пласта, описываемый периодическим законом.

Обработка полученных результатов при различных режимах работы ТНУ выполнена с целью получения методики для инженерных и технико-экономических расчетов. Для возможности распространения результатов экспериментальных и теоретических исследований на широкий круг объектов проектирования использовалась теория подобия [14].

Исходя из поставленной задачи выполнения технико-экономического расчета геотермальных скважин, необходимо получить критериальное уравнение, с помощью которого можно

связать температурный напор скважины в долгосрочной перспективе ее эксплуатации с режимом работы скважины и теплофизическими характеристиками пласта и скважины.

Для обобщения полученных результатов, с учетом особенностей решения, введены модифицированные безразмерный тепловой поток и безразмерная температура.

Температурное поле пласта описывается безразмерной функцией с тремя группами величин:

$$f = [Fo, \Theta, Q] \quad (2)$$

где Fo – критерий Фурье, θ – безразмерная температура, Q – безразмерный тепловой поток.

Влияние распространения температурного поля фиксируется количественными значениями безразмерной температуры, которая рассчитывается по формуле:

$$\Theta = \frac{t_{остаточное}^{грунт} - \bar{t}_{ос}}{t_{фоновое}^{грунт} - t_{ос}}, \quad (3)$$

где $t_{остаточное}^{грунт}$ – температура грунта рассматриваемого эксплуатируемого периода; $\bar{t}_{ос}$ – средняя температура окружающей среды эксплуатируемого периода; $t_{фоновое}^{грунт}$ – фоновое значение температуры грунта; $t_{ос}$ – температура окружающей среды.

Из-за отсутствия в литературе математического описания влияния определяющих параметров на циклическое температурное поле для инженерных расчетов нами предложено использовать более простую полуэмпирическую степенную зависимость:

$$\Theta = \sum c \cdot Fo^n \cdot Q^m \quad (4)$$

где n – степенной показатель критерия Fo , m – степенной показатель безразмерного активного потока, c – коэффициент.

Результаты расчета температурных полей, представленные в безразмерном виде с полученными аппроксимирующими зависимостями при различных значениях безразмерных тепловых потоков, приведены на рис. 9.

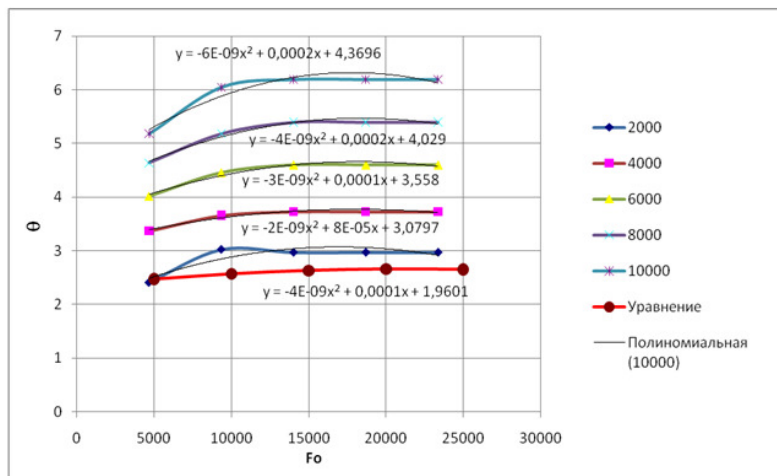


Рис. 9. Зависимость безразмерной температуры Θ при значениях безразмерного теплового потока Q

Как видно из графика, тепловая нагрузка хорошо аппроксимируется полиномом второго порядка. Используя математические зависимости, представленные на графике, возможно с большой достоверностью определить влияние безразмерной температуры.

На основании обработки результатов получено следующее критериальное уравнение:

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

Полученное уравнение хорошо согласуется с экспериментальными данными. Уравнение справедливо в диапазоне варьирования: $Fo(4672; 23360)$.

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

теплоснабжения. На основании полученных результатов можно отметить следующее:

Во-первых, исследования показали, что температурное поле грунтового массива заметно изменяется первые три года эксплуатации, а начиная с 3-го года достигается квазистационарное состояние.

Во-вторых, фоновый тепловой поток Земли оказывает существенное влияние на технико-экономические параметры ТНУ, и его учет необходим для разработки долгосрочных прогнозов температурного поля вокруг скважины.

В-третьих, предложенное критериальное уравнение позволяет определить изменение температуры эксплуатируемого грунтового массива, упрощая инженерный расчет на этапе проектирования как инструмент технико-экономического анализа ТНУ.

Список литературы

1. Шишкин Н. Д., Просвирина И. С. Оценка эффективности применения теплонасосных установок в системах теплоснабжения Астраханской области // Известия АЖКХ. 2000. № 4.
2. Васильев Г. П. Теплохладоснабжение зданий и сооружений с использованием низкопотенциальной тепловой энергии поверхностных слоев земли : дис. ... д-ра тех. наук. М., 2006. 423 с.
3. Руденко Н. Н., Фурсова И. Н. Моделирование температурного поля в грунте // Инженерный вестник Дона. 2013. № 4. URL: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/2137>
4. Крылов В. А., Черноозерский В. А., Никитин А. А., Баранов И. В. Учет неравномерности температурного поля в геотермальной скважине теплового насоса // Вестник МАХ. 2015. № 1.
5. Лыков А. В. Теория теплопроводности : учеб. пособие. М. : Высшая школа, 1967. 600 с.
6. Крылов Д. А. Математическое моделирование температурных полей с учетом фазовых переходов в криотитозоне // Наука и образование : электронное научно-техническое издание. 2012. № 4.
7. Федякин В. Я., Карпов М. К. Использование грунтовых теплообменников в системах теплоснабжения // Ползуновский вестник. 2006. № 4.
8. Малых В. В., Удалов С. Н., Захаров А. А. Методика расчета грунтового аккумулятора // Энерго- и ресурсоэффективность малоэтажных зданий : материалы научно-практической конференции / Ин-т теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН. Новосибирск, 2013.
9. Костиков А. О., Харлампиди Д. Х. Влияние теплового состояния грунта на эффективность теплонасосной установки с грунтовым теплообменником // Энергетика: Экономика, технология, экология. 2009. № 1.
10. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости : учеб. пособие ; пер. с англ. М. : Энергоатомиздат, 1984. 152 с.
11. Руководство по применению тепловых насосов с использованием вторичных энергетических ресурсов и нетрадиционных возобновляемых источников энергии : [утв. и введ. в действие указанием Москомархитектуры от 31.01.2011 г. № 8]. М. : ГУП «НИИЦ», 2001. 32 с.
12. Смирнов С. С. Теоретические основы и технологии извлечения геотермальной энергии с использованием абсорбционных тепловых насосов : автореф. дис. ... канд. тех. наук. Новочеркасск, 2011. 19 с.
13. Маслов Н. Н. Основы механики грунтов и инженерной геологии. М. : Высшая школа, 1982. 511 с.
14. Ground-source heat pump project analysis / Clean Energy Decision Support Centre // CLEAN ENERGY PROJECT ANALYSIS: RET-SCREEN ENGINEERING and CASES TEXTBOOK/Minister of Natural Resources Canada, 2001–2005.

© Н. Ю. Сапрыкина, П. В. Яковлев

Ссылка для цитирования:

Сапрыкина Н. Ю., Яковлев П. В. Моделирование температурного поля эксплуатируемого грунтового массива в условиях длительной эксплуатации геотермального теплонасосного оборудования // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский инженерно-строительный институт. Астрахань : ГАОУ АО ВПО «АИСИ», 2015. № 4 (14). С. 60–66.

УДК 51-7, 697.98

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ И ВЕТРОВОЙ ЗАЩИТЫ ЖИЛЫХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ

П. В. Яковлев, Е. П. Яковлева, А. П. Яковлева

Астраханский инженерно-строительный институт

Астраханский государственный технический университет

Выполнены исследования аэродинамики разработанных элементов ветровой защиты жилых и производственных комплексов. Для обеспечения комфортных условий проживания, безопасности зон нахождения людей, непрерывного цикла производства в промышленных зонах, подверженных ветровым воздействиям, и решения вопросов промышленной безопасности предложены архитектурные элементы и планировочные решения для ветровой защиты.

Ключевые слова: ветровая защита, комфортные условия, промышленная безопасность, численная модель, аэродинамический профиль, защитный экран.

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL INVESTIGATION OF AERODYNAMICS AND WIND PROTECTION OF RESIDENTIAL AND INDUSTRIAL COMPLEXES

P. V. Yakovlev, E. P. Yakovleva, A. P. Yakovleva

Astrakhan Institute of Civil Engineering

Astrakhan State Technical University

It was performed aerodynamic researches of the developed elements of wind protection of residential and industrial complexes. To ensure comfortable living conditions, safety zones where people, continuous cycle of production in the industrial area subject to wind effects, and resolution of issues of industrial safety of the proposed architectural elements and planning decisions for wind protection.

Keywords: wind protection, comfort, safety, numerical model, aerodynamic profile, protective screen.

При решении архитектурно-планировочных задач жилых, парковых зон, транспортных магистралей и промышленных площадок существует проблема необходимости ветровой защиты. Как правило, это береговая линия водоемов, участки со специфическим рельефом

местности, характеризующиеся зонами значительных ветровых воздействий. Сложные погодные условия создают серьезные проблемы в части безопасности производства работ. Для решения проблемы нами предложены ветрозащитные элементы, которые могут быть