

ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ. ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ И ЖКХ

УДК 536.491

ФОРМИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ ОДНОЗНАЧНОСТИ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ ДЛЯ ДОЛГОСРОЧНОГО СРОКА ЭКСПЛУАТАЦИИ ГРУНТОВОГО ТЕПЛООВОГО НАСОСА

Н. Ю. Сапрыкина, П. В. Яковлев

Астраханский государственный архитектурно-строительный университет

В статье представлены результаты математического исследования изменения температурного поля геотермальной скважины, сформированного при работе теплового насоса в условиях разных технологических режимов: без изменения направления теплового потока и со знакопеременным тепловым потоком. Основным методом исследования выбран метод численного моделирования с проверкой адекватности полученных результатов на действующей геотермальной скважине в пределах ее эксплуатационных режимов. Учитывая прикладной характер исследования, обобщение полученных результатов произведено с использованием теории подобия с выводом модифицированных критериальных зависимостей, связывающих влияющие параметры и используемых для дальнейшей разработки методики проектирования тепловых насосов на основе долгосрочного прогноза и оценки их энергетической, а также экономической эффективности.

Ключевые слова: геотермальная скважина, тепловой насос, температурное поле грунта, фильтрационный поток грунтовых вод.

FORMING OF CONDITIONS OF UNIQUITY AT NONSTANDARD WORKING SCHEDULE FOR LONG TERM EXPLOITING PERIOD OF THE GROUND HEAT PUMP UNIT

N. Yu. Saprikina, P. V. Yakovlev

Astrakhan state University of architecture and construction

The paper refers to the results of mathematical investigation of geothermal crack temperature field mathematical research, formed due to exploiting of the heat pump unit in different technological cases: without changing direction of the heat flow and with alternative heat flow. As the main research method the authors have chosen the method of numerical simulation with verification of results adequacy at the active geothermal crack in the limits of its exploiting cases. Taking into consideration the applied research character, generalization of the taken results was made with the use of similarity theory with criteria dependence output, connecting the influencing parameters and used for the further development the methods of heating pumps projecting at the long term forecasting and evaluation of their energy and economic effectiveness.

Key words: geothermal crack, heat pump unit, ground temperature field, filtration flow of ground water.

Несмотря на широкое применение в различных отраслях, теплонасосного оборудования, многие вопросы о характере влияния его составляющих на формирование температурного поля грунтового массива до сих пор остаются открытыми. Исследование длительной практики эксплуатации теплонасосной установки (ТНУ) заключается в изучении естественного изменения температурного поля нагружаемого грунтового массива. Температурное поле может меняться в зависимости от различных факторов [1-18]. Необходимость совершенствования методик долговременного прогноза параметров работы низкопотенциальных геотермальных ТНУ в нестационарном циклическом режиме обуславливает актуальность исследований в этом направлении.

В качестве метода исследования аналогичных исследуемых процессов со сложными условиями однозначности наиболее широко распространен метод моделирования. Математическое моделирование температурного поля грунта при использовании геотермальной энергии

сводится к решению задачи нестационарной теплопроводности для цилиндрической системы координат [19].

На рис. 1 представлена принятая структурная модель в виде цилиндрического тела, состоящая из нескольких контуров. Внешняя граница контура – влияние скважины. Внутренней границей является обсадная колонна скважины, через стенку которой и происходит теплообмен между циркулирующим теплоносителем и грунтом.

Вместе с тем, сама Земля и скважина имеют существенные особенности, которые необходимо учитывать в математической модели. Для решения проблемы введена компенсирующая поправка – объемные источники и стоки тепла. Тогда уравнение примет следующий вид:

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

где t – температура грунта, °С; τ – время, с; a – коэффициент температуропроводности, м²/с; r – радиальная координата, м; q – источники и стоки тепла, обусловленные тепловыми

потоками земли и тепловыделения через поверхность, Вт/м².

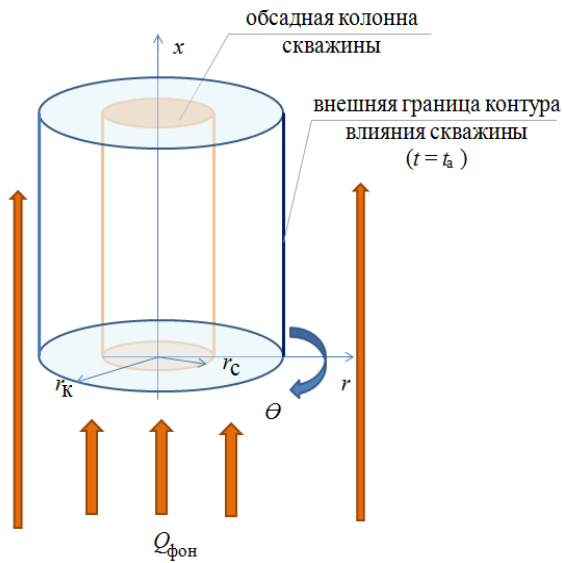


Рис. 1. Модель эксплуатируемого грунтового массива:
 r_k – радиус обсадной колонны, м; r_c – радиус скважины, м;
 $Q_{фон}$ – фоновый поток земли, Вт/м²

Особенность математического исследования работы заключается в том, что начальным условием для каждого нового цикла является температурное поле, оставшееся после предыдущего цикла. Решение можно разделить на три этапа. Первый этап: начальное условие принято на момент первичного распределения температур – в пласте до начала эксплуатации установки, то есть это равномерное распределение с фоновой температурой пласта во всех точках. Начало координат находится в центре скважины $r=0$:

$$t(r, \tau) = t_0 \quad (2)$$

где r_0 – координата в диапазоне $r_0 \leq r \leq r_k$, м.

Тепловой насос включается циклически, и при этом чередуются периоды подвода (отвода) тепла с периодами остановок. Для второго этапа – этапа остывания – начальными условиями будет сложное температурное поле, сформировавшееся при стационарной работе теплового насоса в течение первого расчетного периода $0 < \tau < \tau_1$:

$$t = t_0(r, \tau_1) \quad (3)$$

где τ_1 – время работы ТНУ второго этапа, с.

Третий этап – включение теплового насоса после перерыва; начальным условием для расчета будет сложное температурное поле, получившееся после остывания пласта $\tau_1 < \tau < \tau_2$:

$$t = t_0(r, \tau_2) \quad (4)$$

где τ_2 – время работы ТНУ третьего этапа, с.

Граничные условия на забое скважины приняты в зависимости от технологических режимов 1-го, 2-го и 3-го рода.

1. Условия работы без изменения направления теплового потока:

- 1-го рода, в области отсутствия влияния скважин и с постоянной температурой $t(\infty, \tau) = t_{фон}$;

- 2-го рода, на поверхности обсадной колонны скважины, при работающем тепловом насосе: $-\lambda \frac{\partial t(r_c, \tau)}{\partial r} = q$ и при неработающем тепловом насосе: $\frac{\partial t(r_c, \tau)}{\partial r} = 0$

- 2-го рода, на нижней образующей расчетного цилиндра – тепло Земли, тепловой поток считаем постоянным $-\lambda \frac{\partial t(r, \tau)}{\partial r} = q$.

- 3-го рода, на поверхности Земли, в связи с отличающимся на порядки в большую сторону коэффициентом теплоотдачи на поверхности относительно коэффициента теплопередачи грунта от поверхности до теплообменной части скважины, могут быть заменены условиями 1-го рода: $t(r, \tau) = t_{климат}$.

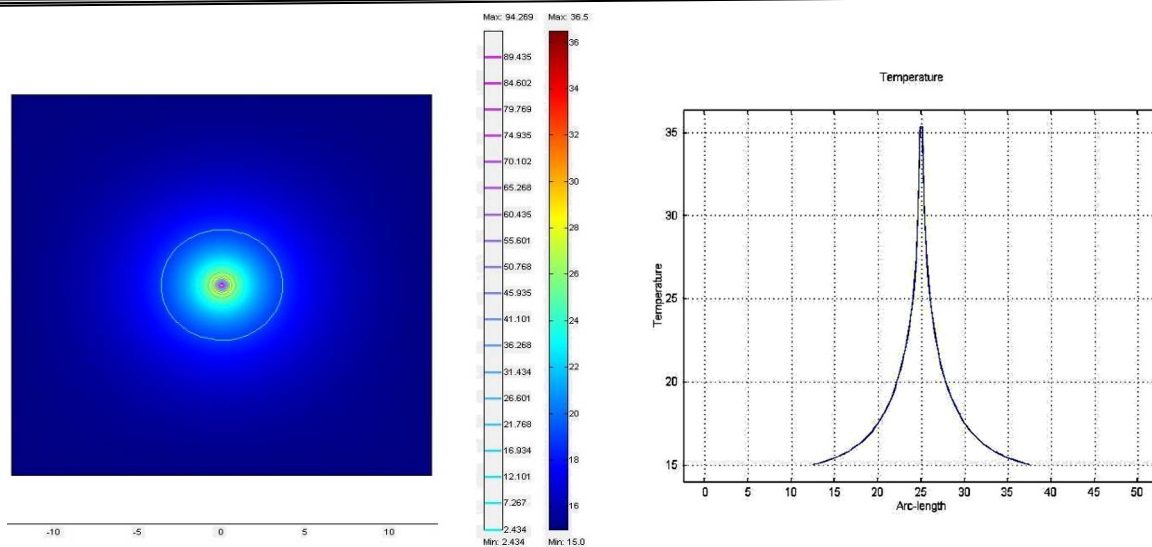
2. Условия работы ТНУ в знакопеременном режиме

- 2-го рода, в условиях знакопеременных режимов работы: $\frac{\partial t}{\partial r}(r, \tau) = -\frac{q}{\lambda}$;

- 2-го рода, тепло Земли: $-\lambda \frac{\partial t}{\partial r}(r, \tau) + q(\tau) + q_{земли} = 0$.

Решение задачи моделирования температурного поля получено методом конечных разностей с использованием неявной разностной схемы [20].

Численная модель базируется на дискретном представлении уравнения энергии, граничных и начальных условий, при различных плотностях теплового потока и реализована на базе прикладного пакета программ MathLab. Основные полученные закономерности иллюстрируются представленными на рис. 2–3 температурными полями при циклическом подводе тепла в скважину в 100 Вт/м² (режим работы ТНУ – без регенерации). При включении теплового насоса начинается разогрев пласта. Как видно из представленных результатов (рис. 2), влияние скважины ограничивается расстоянием 10–15 м от ее оси. Подвод тепла при работе ТНУ сопровождается значительным разогревом пласта вблизи забоя скважины с последующим асимптотическим приближением температуры к фоновому значению на расстоянии 15 м от оси скважины (рис. 3). Изменение температуры для принятых расчетом условий однозначности и плотности теплового потока 100 Вт/м² (на поверхности обсадной колонны) превышает 20 °С.



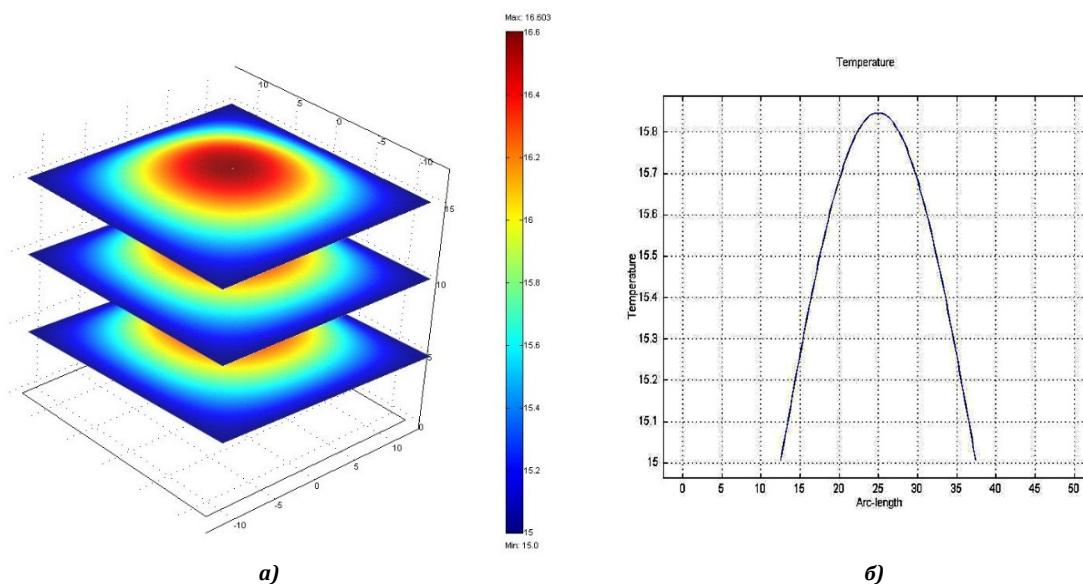
а)

б)

Рис. 2. Изменение температурного поля в процессе активной нагрузки на пласт за 6 месяцев: а) температурное поле; б) график температуры

С последующим циклом подвода тепла происходит незначительное расширение границ изменения температурного поля. На этом этапе и далее фиксируется граница зоны влияния геотермальной скважины. Следовательно, даже при длительной эксплуатации скважины граница данной зоны находится на расстоянии

15–20 м от оси скважины. Результаты расчетов для разных тепловых потоков показали, что в зависимости от величины активной тепловой нагрузки (от 100 до 500 Вт/м²) температура нагреваемого пласта на радиусе обсадной колонны с момента первого включения в среднем увеличилась на 2 °С.



а)

б)

Рис. 3. Изменение температурного поля в режиме «простая» ТНУ за 1 год: а) температурное поле; б) график температуры

Для количественного описания соотношения подведенного и отведенного количества тепла при знакопеременном технологическом режиме введено понятие коэффициента регенерации тепла k_p , определяемого отношением абсолютных значений отведенного и подведенного тепла $k_p = Q_{\text{подв.}}/Q_{\text{отв.}}$. На рис. 4 представлены результаты изменения температур-

ного поля в условиях реверса тепловой нагрузки на пласт. При наличии регенерации квазистационарное состояние наступает через 1,5 года.

Изменение температуры пласта от значений коэффициента регенерации ($k_p = 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1$) при различных величинах тепловой нагрузки приведено на рис. 5.

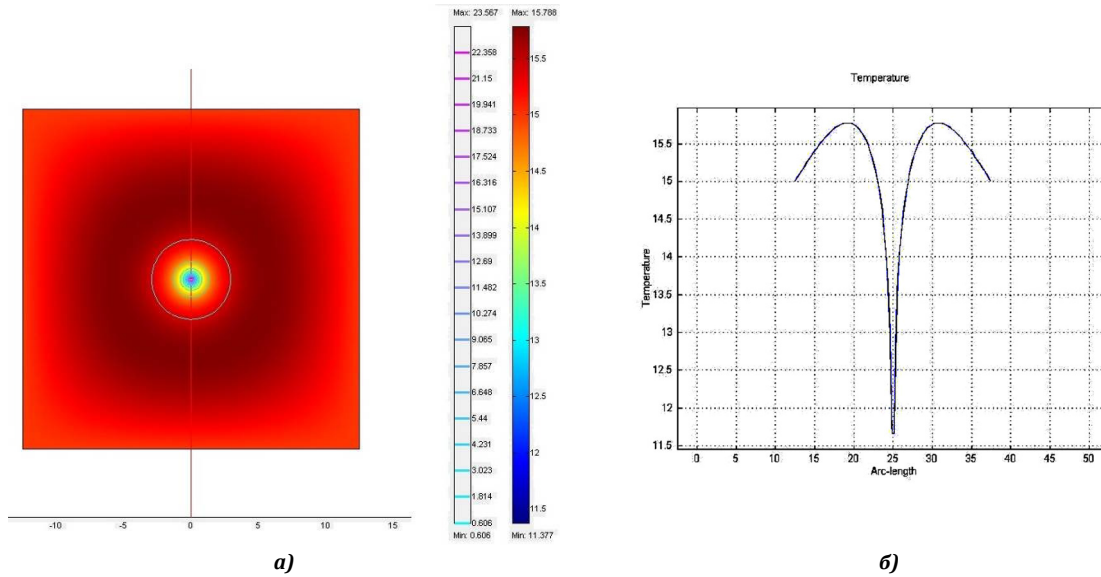


Рис. 4. Изменение температурного поля при знакопеременной нагрузке на пласт за 1 год. Расчетные параметры: $Q_{\text{подв}} = 100 \text{ Вт/м}^2$, $Q_{\text{отв}} = -25 \text{ Вт/м}^2$, $k_p = 0,25$: а) температурное поле; б) график температуры

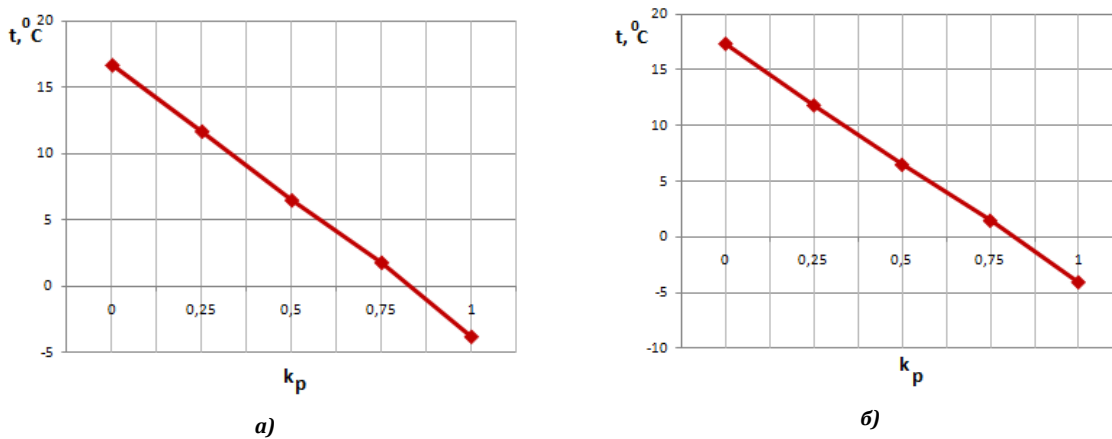


Рис. 5. Зависимость температуры грунта от коэффициента регенерации при 100 Вт/м^2 : а) 1-й год; б) 2-й год

Очевидно, что при отводе тепла пласт охлаждается, а при подводе нагревается, но последовательное реверсирование теплового насоса приводит к появлению системы тепловых волн, которые ведут к изменениям температуры скважины и влияют на технико-экономические параметры оборудования.

Результаты исследования позволили прийти к выводу о том, что ежегодное падение грунтовой температуры будет постепенно сокращаться в условиях регенерации. То есть процесс регенерации позволяет компенсировать «недостающие» величины тепловой нагрузки. При этом объем грунтового массива, подверженного изменению температурного режима, будет расширяться с каждым годом.

Для возможности распространения полученных результатов и дальнейшего их практического применения в виде обобщающей зависимости использовалась теория подобия. Известные критерии подобия не в полной мере

отражают исследуемые явления, в связи с чем предложены следующие безразмерные комплексы: безразмерный активный поток, безразмерная температура.

Результаты расчета температуры на забое геотермальной скважины как функции от определяющих параметров в безразмерном виде представлены на рис. 6.

В результате обработки полученных результатов в безразмерном виде получены следующие обобщающие критериальные уравнения при режимах работы ТНУ. В условиях работы теплового насоса:

- без изменения направления теплового потока [20]:

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

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

• со знакопеременным тепловым потоком с поправкой на коэффициент регенерации:

$$\theta = -5 \cdot 10^{-9} \cdot Q \cdot Fo^2 + 2 \cdot 10^{-8} Fo \cdot Q + 0,0003 \cdot Q + 5,1(0,0002 \cdot k_p + 1,98) \quad (6)$$

где k_p – коэффициент регенерации.

Влияние температуры забоя геотермальной скважины на коэффициент преобразования тепла исследовалось на лабораторном комплексе ТН.002 РБЭ (2901.1), в котором использу-

ется компрессионный холодильный агрегат, работающий на хладагенте R134a. В качестве источника тепловой энергии с низкой температурой применялась вода в теплообменнике-испарителе 4, а в качестве приемника тепла – вода в теплообменнике-конденсаторе 3. Полученные результаты представлены на рис. 7.

Полученные данные зависимости коэффициента трансформации $k_{тр} = R_1/R_2$ представлены графиками на рис. 8–9.

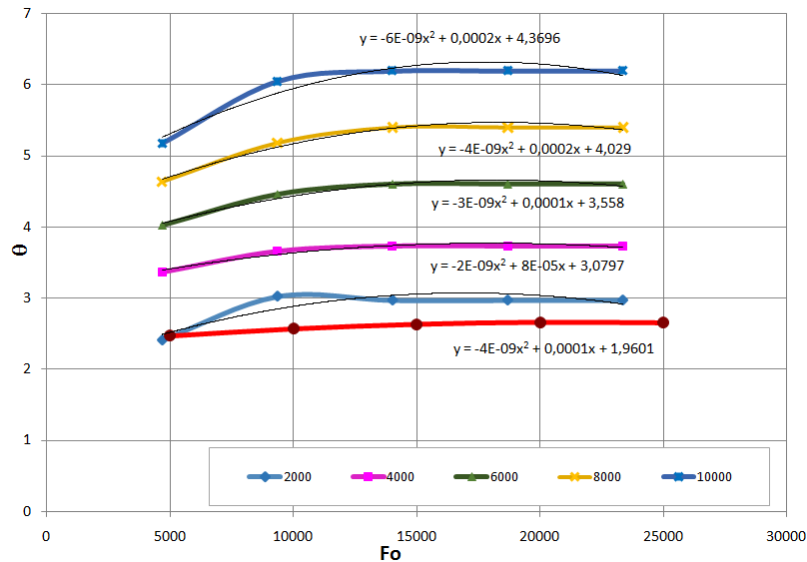


Рис. 6. Зависимость безразмерной температуры (θ) от критерия Fo при значениях безразмерного активного (теплового) потока (Q)

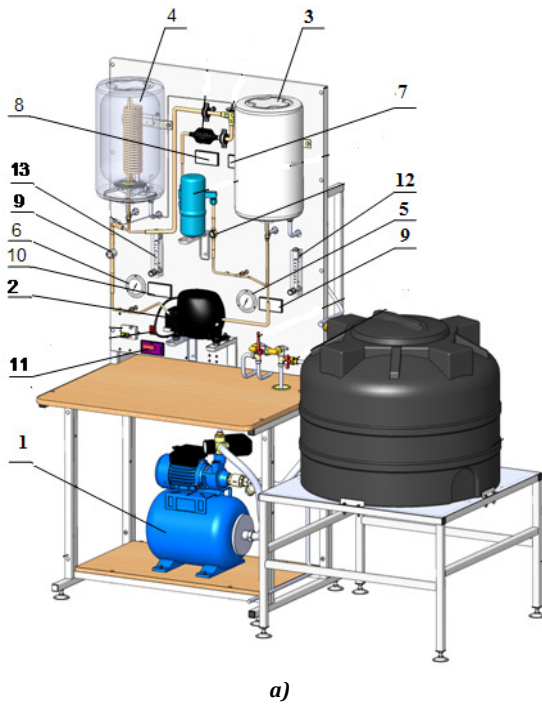
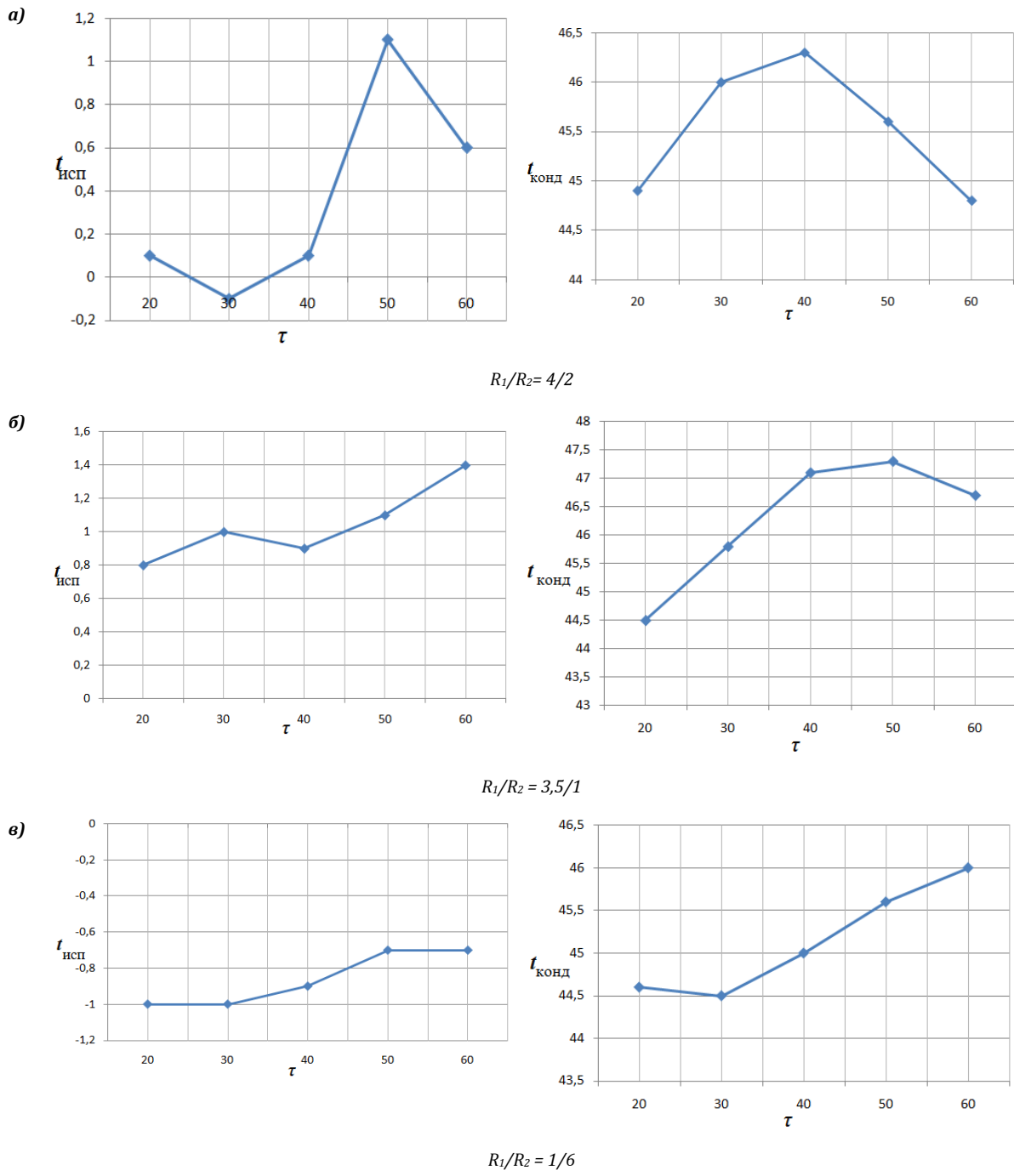


Рис. 7: а) схема лабораторной установки ТН.002 РБЭ: 1 – насосная станция, 2 – компрессор, 3, 4 – теплоизолированный теплообменник, 5, 6 – манометры, 7, 8 – индикатор температуры воды в теплообменнике, 9 – индикатор температуры жидкого хладагента на выходе из конденсатора, 10 – индикатор температуры газообразного хладагента на выходе из испарителя, 11 – измеритель электрических параметров компрессора, 12, 13 – ротаметры; б) результаты эксперимента



I II
Рис. 8. Зависимость I – $t_{\text{исп}}$ от τ ; зависимость II – $t_{\text{конд}}$ от τ



а)

	EB100-EP14-BT10 Brine in temp	-1.2°C	2015-01-30 11:43:07
	EB100-EP14-BT11 Brine out temp	-6.5°C	2015-01-30 11:43:08
	EB100-EP14-BT12 Cond. out	46.0°C	2015-01-24 09:12:14
	EB100-EP14-BT3 Return temp	53.9°C	2015-01-30 11:43:07
	EP8-BT53 Solar Panel Temp	18.5°C	2015-01-30 11:43:08
	Tot. HW op.time compr. EB100-EP14	1203h	2015-01-30 11:43:07
	Tot. op.time compr. EB100-EP14	11781h	2015-01-30 11:43:07

б)

Рис. 10. Общий вид оборудования объекта исследования в январе 2015 г.: а) тепловой насос; б) основное рабочее поле интерфейса программного обеспечения теплового насоса

Натурные исследования проводились в июне 2014 г. и в январе 2015 г., то есть срок эксплуатации геотермальных скважин составил более 2-х лет. Сопоставление результатов, полученных в ходе экспериментально-натурных исследований, с результатами численного моделирования показывает удовлетворительную сходимость.

Исследована тепловая нагрузка рассматриваемого объекта. Тепловая нагрузка на производственный комплекс в период замеров составила 11 кВт. Плотность удельного теплового потока 120 Вт/м². Согласно полученному критериальному уравнению (5) температура грунта на момент эксплуатации за первые три месяца работы (с момента первого включения – с октября по январь) составит:

$$\Theta = (-5 \cdot 10^{-9} \cdot 2400 \cdot 832^2) + (2 \cdot 10^{-8} \cdot 832 \cdot 2400) + (0,0003 \cdot 2400) + 5,1 = -2,48 \quad (7)$$

Переводим полученную относительную величину в реальную температуру. Расчеты ведутся по модулю. Значение $t_{\text{остаточное}}^{\text{грунт}} = 2,576 \text{ }^\circ\text{C}$, согласно [21]. Полученная температура отличается от фоновых значений температуры рассматриваемого периода в пределах 3 °С.

На основании полученных результатов можно сделать вывод. Отклонение температуры от пределов нормы имеет допустимые значения. На рассматриваемом объекте конструктивных мер не принималось. Стоит предположить, что фильтрационный поток присутствует, ввиду близкорасположенной реки.

Сопоставление результатов, полученных в ходе экспериментально-натурных исследований, с результатами численного моделирования показывают удовлетворительную сходимость.

Список литературы

1. Басок Б. И., Авраменко А. А., Рыжов С. С., Лунина А. А. Динамика теплообмена жидкости в грунтовом прямолинейном одностороннем трубном элементе (теплообменнике) // Пром. теплотехника. 2009. Т. 31. № 1. С. 62–67.
2. Большаков В. И., Данишевский В. В., Кушнеров Е. А. Теплотехническое моделирование вертикальных грунтовых коллекторов тепловых насосов методом конечных разностей // Строительство, материаловедение, машиностроение : сборник научных трудов. Днепрпетровск : ПГАСА, 2010. URL: <http://pgasa.dp.ua/a/dept/struct-mechanics/danishevskyy/paper19.pdf>
3. Булдакова И. Н., Корепанов Е. В. Нагрев теплоносителя в трубе U-образного грунтового коллектора теплонасосной установки // Интеллектуальные системы в производстве. 2014. № 2. С. 175–177.
4. Васильев В. Г. Геотермальные теплонасосные системы теплоснабжения и эффективность их применения в климатических условиях России // АВОК. Теплоснабжение. 2007. № 5. URL: http://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=3685
5. Высочин В. В., Громовой А. Ю. Роль грунтового теплообменника в сглаживании неравномерности работы геосистемы // Праці Одеського політехнічного університету. 2013. № 2. С. 148–152.
6. Денисова А. Е., Мармусевич А. В. Моделирование тепловых процессов в грунтовой тепловой трубе теплонасосной системы тепло- и хладоснабжения // Труды Одесского политехнического университета. 2006. № 1 (25). С. 65–69.
7. Ибрагимов Э. В., Кроник Я. А., Пустовойт Г. П. Опыт использования тепловых насосов в качестве систем термостабилизации грунта в криолитозоне // ОФМГ. 2015. № 5. С. 23–26.
8. 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-vozobnovlyаемых-istochnikov-tepla-teplovej-nasos-i-solnechnyj-kollektor>
9. Костиков А. О., Харлампиди Д. Х. Влияние теплового состояния грунта на эффективность теплонасосной установки с грунтовым теплообменником // Энергетика: економіка, технології, екологія. 2009. № 1. С. 32–40.



10. Кротов В. М. Совершенствование методики расчета первичного контура систем теплоснабжения, использующих низкопотенциальную теплоту грунта : автореф. дис. ... канд. тех. наук. Тюмень, 2011. 19 с.
11. 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. С. 75–80.
12. Малых В. В., Удалов С. Н., Захаров А. А. Методика расчета грунтового аккумулятора // Энерго- и ресурсоэффективность малоэтажных зданий : материалы научно-практической конференции 19–20 марта 2013 г. / Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН. Новосибирск, 2013. С. 317–318.
13. Мацевитый Ю. М., Тарасова В. А., Харлампиди Д. Х. Восстановление теплового потенциала грунта за счет выбора рациональных режимов работы теплонасосной системы // Тезисы докладов и сообщений XIV Минского международного форума по тепло- и массообмену. 2012. Т. 1. С. 736–739.
14. Морклярник Б. В. Закономерности изменения тепловой энергии в грунтовой основе при работе вертикального и плоского коллектора теплового насоса // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. 2015. № 3 (92). С. 85–90.
15. Накорчевский А. И. Рациональное решение в теплоэнергетической системе «грунтовой массив – тепловой насос» // Промышленная теплотехника. 2007. Т. 29. № 4. С. 77–82.
16. Палагин А. В., Корепанов Е. В. Моделирование нестационарного теплообмена грунта с U-образным коллектором теплонасосной установки // Вестник МГСУ. 2011. № 7. С. 456–462.
17. 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>
18. Лыков А. В. Теория теплопроводности : учеб. пособие. М. : Высшая школа, 1967. 600 с.
19. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости : учеб. пособие. М. : Энергоатомиздат, 1984. 152 с.
20. Сапрыкина Н. Ю., Яковлев П. В. Постановка задачи определения температурного поля геотермального теплового насоса на объектах нефтяной промышленности // Новейшие технологии освоения месторождений углеводородного сырья и обеспечение безопасности экосистем Каспийского шельфа : материалы VI Международной научно-практической конференции / Астраханский гос. техн. ун-т. Астрахань : Изд-во АГТУ, 2015. С. 126–130.
21. Сапрыкина Н. Ю., Яковлев П. В. Моделирование температурного поля эксплуатируемого грунтового массива в условиях длительной эксплуатации геотермального теплонасосного оборудования // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : науч.-техн. журнал. Астрахань, 2015. № 4 (14). С. 60–66.

© Н. Ю. Сапрыкина, П. В. Яковлев

Ссылка для цитирования:

Сапрыкина Н. Ю., Яковлев П. В. Формирование условий однозначности при нестационарном режиме работы для долгосрочного срока эксплуатации грунтового теплового насоса // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2016. № 3 (17). С. 40–48.

УДК 621.647.38

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ НИТИНОЛА В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

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

Астраханский государственный архитектурно-строительный университет

В статье обоснована возможность использования сплава нитинола на основе титана и никеля в качестве активных элементов систем пожарной автоматики и пожаротушения. Предлагается конструкция устройства для открывания аварийных и противопожарных выходов с активным элементом из нитинола и модифицированная конструкция сплинкера для автоматизированных систем пожаротушения. Актуальность разработки данных систем в России обусловлена высокой смертностью людей на пожарах. Современные традиционные устройства систем автоматики и пожарной безопасности имеют некоторые недостатки, одним из которых является хрупкость термоколбы сплинкеров. Таким образом, использование активного элемента из нитинола в сплинкерах избавит данные устройства от этого недостатка и позволит повысить надежность и эффективность их работы, а также существенно снизит стоимость конечных устройств.

Ключевые слова: система пожаротушения, никель, титан, нитинол, температура активации, аварийный и запасной выходы, сплиinker, активный элемент, пружина, диафрагма.

PROSPECTS OF NITINOL ACTIVE ELEMENTS IN FIRE SAFETY AUTOMATED SYSTEMS

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

Astrakhan state University of architecture and construction

The article refers to the possibility of using titanium and nickel alloy – nitinol, as fire automatics and fire extinguishing systems active elements. The authors propose a construction of the device for opening the emergency exits and fire with an active element of nitinol and modified splinker design for automated fire extinguishing systems. The relevance of these systems in Russia due to the high mortality of people on fire. Modern conventional devices automation systems and fire have some drawbacks, one of which is the fragility of the thermo-flask splinkers. Thus, the use of the active element of nitinol in splinker will save device data from this defect and will improve the reliability and efficiency of their work, as well as will significantly reduce the cost of the final devices.

Keywords: fire extinguishing system, nickel, titanium, nitinol, activation temperature, alarm and emergency exits, splinker, active element, the spring, the diaphragm.