

ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ, ВЕНТИЛЯЦИЯ, КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА, ГАЗОСНАБЖЕНИЕ И ОСВЕЩЕНИЕ

УДК 697.7

*САПРЫКИНА НАДЕЖДА ЮРЬЕВНА, аспирант,
nadin_id@rambler.ru
ЯКОВЛЕВ ПАВЕЛ ВИКТОРОВИЧ, докт. техн. наук, профессор,
astra137@mail.ru
Астраханский государственный
архитектурно-строительный университет,
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 18*

ИССЛЕДОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННОГО ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРИ МНОГОЛЕТНЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕПЛООВОГО НАСОСА

Проведены исследования температурного поля геотермальной скважины, сформированного при работе теплового насоса в условиях разных технологических режимов. Основным методом исследования выбран метод численного моделирования с проверкой адекватности полученных результатов на действующей геотермальной скважине в пределах её эксплуатационных режимов с помощью программы MathLab. С учетом прикладного характера исследования обобщение полученных результатов произведено с использованием теории подобия с выводом модифицированных критериальных зависимостей, связывающих влияющие параметры и применяемых для дальнейшей разработки методики проектирования тепловых насосов на основе долгосрочного прогноза и оценки их энергетической, а также экономической эффективности.

Ключевые слова: тепловой насос; температурное поле; регенерация; коэффициент регенерации; критериальное уравнение.

*NADEZHDA YU. SAPRYKINA, Research Assistant,
nadin_id@rambler.ru
PAVEL V. YAKOVLEV, DSc, Professor,
astra137@mail.ru
Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering,
18, Tatishchev Str., 414056, Astrakhan, Russia*

NATURAL CHANGE IN TEMPERATURE FIELD OF HEAT PUMP UNIT DURING ITS LONG-TERM OPERATION

The paper presents the temperature field investigations of geothermal well, which is formed during the operation of the heat pump unit under different processing conditions. The multi-paradigm numerical computing environment MathLab is used to compare the theoretical and experimental results on operating conditions of the geothermal well. The obtained results are generalized using the theory of similarity and the modified criteria-based dependences connecting the parameters and used for further development of design technique of heat pumps based on the long-term forecast and assessment of their energy and economic efficiency.

Keywords: heat pump; temperature field; regeneration; regeneration factor; criteria-based equation.

Опыт эксплуатации геотермальных скважин [1–4] показывает, что непрерывный отбор или сброс тепла приводят к значительному изменению теплового баланса грунта в местах размещения геотермальных скважин. Изменение температурного фона, формируемого в условиях многолетней эксплуатации ТНУ, вызывает значительное изменение температуры грунтового массива, не компенсируемого фоновыми тепловыми потоками, что отрицательно сказывается на технико-экономических показателях всей системы.

Температурное поле является сложным объектом расчёта и характеризуется переменными граничными условиями, зависящими от климатических особенностей региона, режима работы объекта, времени года, изменением теплофизических свойств грунта и т. д. Для расчёта поля температур вертикальной скважины используется уравнение нестационарной теплопроводности [5], учитывающее фоновый поток Земли в виде поправки – источника и стока тепла [6]:

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

где T – температура массива грунта, °C; τ – время, с; a – коэффициент температуропроводности, м²/с; r – радиальная координата, м; q – источники и стоки тепла, обусловленные тепловыми потоками Земли и тепловыделениями через поверхность, Вт/м².

Для построения расчетной модели выбраны следующие условия режима работы ТНУ: в одном технологическом режиме (без изменения направления теплового потока) и в двух технологических режимах (в знакопеременном направлении теплового потока).

В связи с этим 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 объёма со смещённой сеткой.

Согласно [7] принимаем сетку и контрольный объём r, Θ в полярных координатах (рис. 1). Значения температуры, рассчитываемые в узлах сетки, обозначим: $T_{n,m}, T_{n,(m+1)}, T_{n+1}, T_{n,(m-1)}, T_{(n-1),m}$.

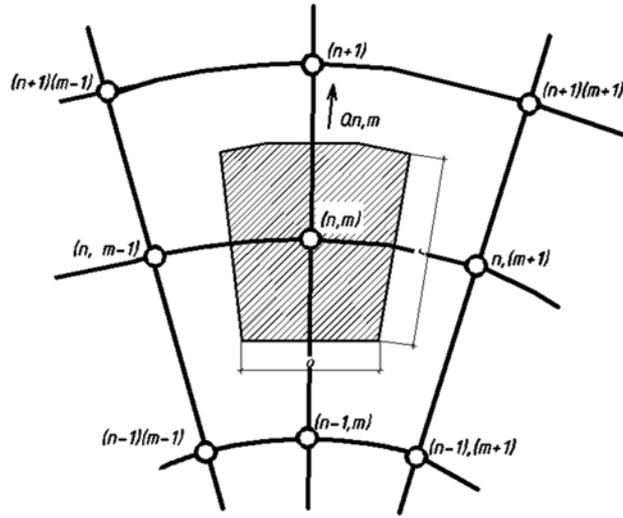


Рис. 1. Сетка и контрольный объем в полярных координатах r, Θ

Уравнение (1) в дискретном виде имеет вид

$$a_{n,m} T_{n,m} = a_{n,m}^0 (a_{n,(m+1)} T_{n,(m+1)} + a_{n,(m-1)} T_{n,(m-1)} + a_{n+1} + a_{(n-1),m}) + q_{n,m} \Delta V, \quad (2)$$

где n, m – координаты (номера) узловой точки по оси X и оси Y и коэффициенты:

$$a_{n,(m+1)} = \frac{\Delta r}{\partial r (\delta \Theta)_{n,(m+1)}}; \quad (3)$$

$$a_{n,(m-1)} = \frac{\Delta r}{\partial r (\delta \Theta)_{n,(m-1)}}; \quad (4)$$

$$a_{(n+1)} = \frac{r_{(n+1)} \cdot \Delta \Theta}{\partial r_{n+1}}; \quad (5)$$

$$a_{(n-1)} = \frac{r_{(n-1),m} \cdot \Delta \Theta}{\partial r_{(n-1),m}}. \quad (6)$$

Численная модель базируется на дискретном представлении уравнения энергии, граничных и начальных условий и реализована на базе прикладного пакета программ MathLab. На рис. 2 представлены результаты расчёта температурных полей, полученных на основных этапах работы ТНУ без изменения направления теплового потока.

При включении теплового насоса начинается разогрев пласта. Как видно из представленных результатов, тепловой поток от скважины распространяется радиально – от оси скважины к ее границам (рис. 2, а). На рис. 2, б изображен температурный график поля, где резкий скачок обусловлен нагрузкой на пласт, который в течение длительного времени сохранял постоянные температуры. При подводе тепла увеличивается пластовая температура. При

отключении ТНУ пласт остывает. В период остывания пласта неравномерность нагрева различных участков приводит к появлению волновых явлений, которые визуально могут быть представлены как след капли на поверхности жидкости (рис. 2, в), а изменение температурного поля стремится к фоновой температуре грунта (рис. 2, з).

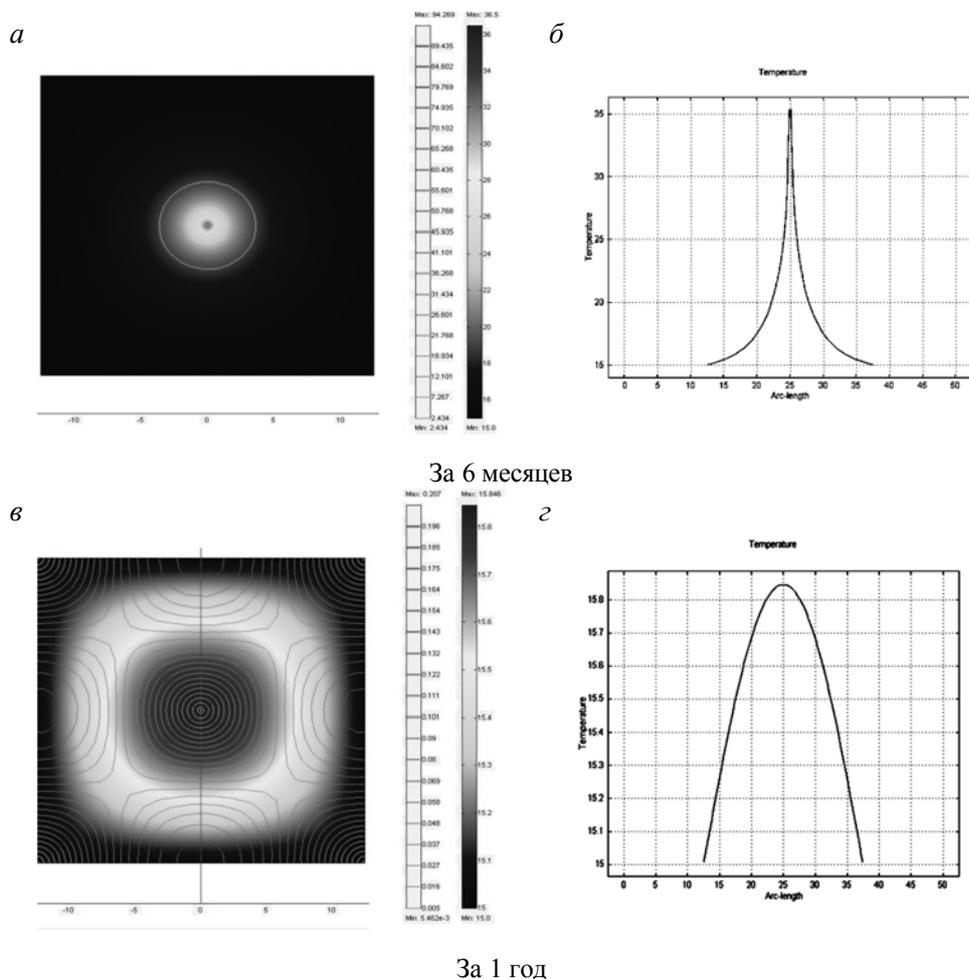


Рис. 2. Изменение температурного поля I и II этапов

С последующей нагрузкой на пласт наблюдается расширение границ температурного поля (рис. 3, а), и такое изменение происходит вследствие чередования нагрузки на пласт. В результате исследования выявлено, что в зависимости от величины активной тепловой нагрузки температура нагреваемого пласта с момента первого включения в среднем увеличивается на $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 3, б).

При сезонной эксплуатации, в чередующемся режиме «нагрузка» – «отключение» на период 2,5 года, расширение границ температурного поля не наблюдается, и наступает квазистационарный температурный режим грун-

та. С момента первого включения теплового насоса до 2,5 лет в период, когда тепловой насос активно работает, температура грунта в среднем изменилась на 2 °С. Можно отметить, что полученные результаты позволяют сделать выводы, что температурное поле стабилизировалось в режиме «активной» работы ТНУ 2,5 года и 3 года в режиме «простоя» (рис. 3, в, г).

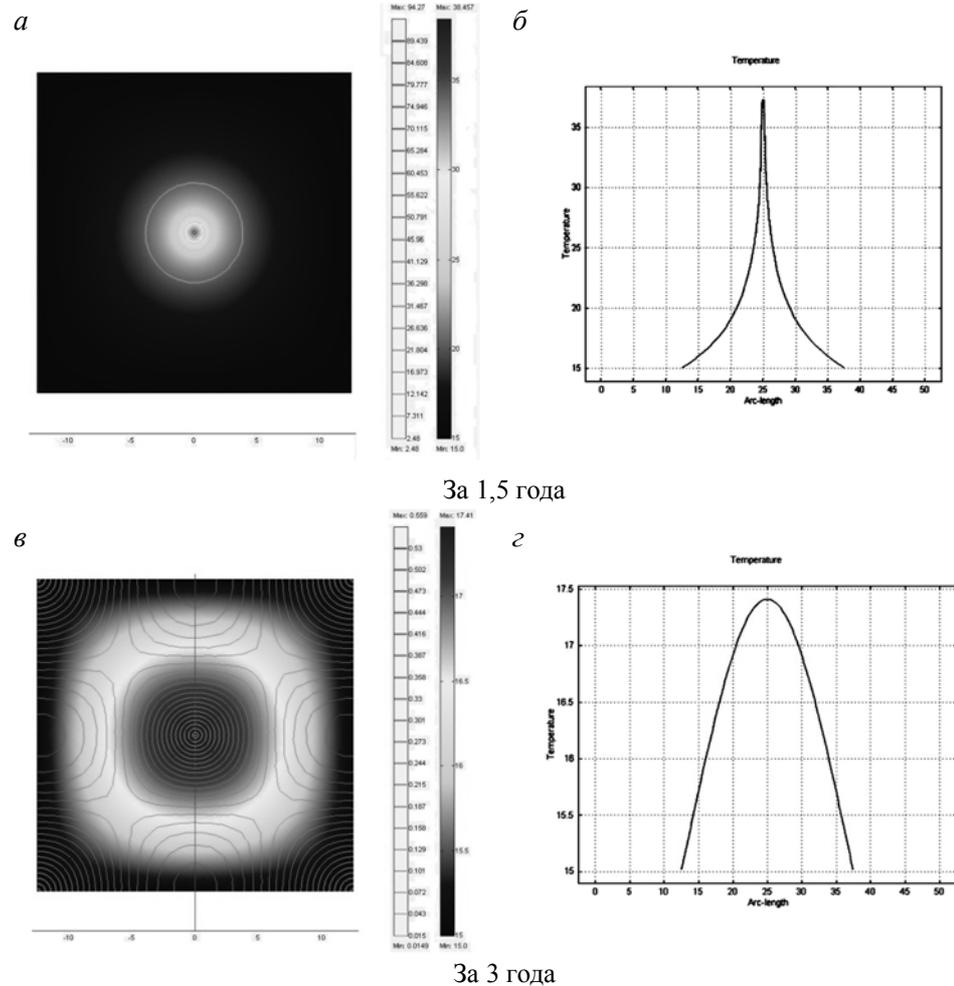


Рис. 3. Изменение температурного поля III и VI этапов

Циклические исследования температурного поля со знакопеременным направлением потока отражены на рис. 4.

Распространение тепловой волны в условиях знакопеременного теплового потока на период 6 месяцев аналогично (рис. 2, а, б). Ввиду того, что на втором этапе (1 год) вводится другая активная нагрузка, тепловая волна значительно отличается от предыдущего этапа (рис. 4, а). Изменено направление температурной волны (рис. 4, б) в противоположную сторону, что обусловлено

изменением направления активного потока скважины. По результатам работы 3 лет можно сделать вывод о стабилизации температурного поля (рис. 4, в, з). Исследованиями установлено, что стабилизация пласта в режиме знакопеременной нагрузки наступает уже на 2-й год эксплуатации.

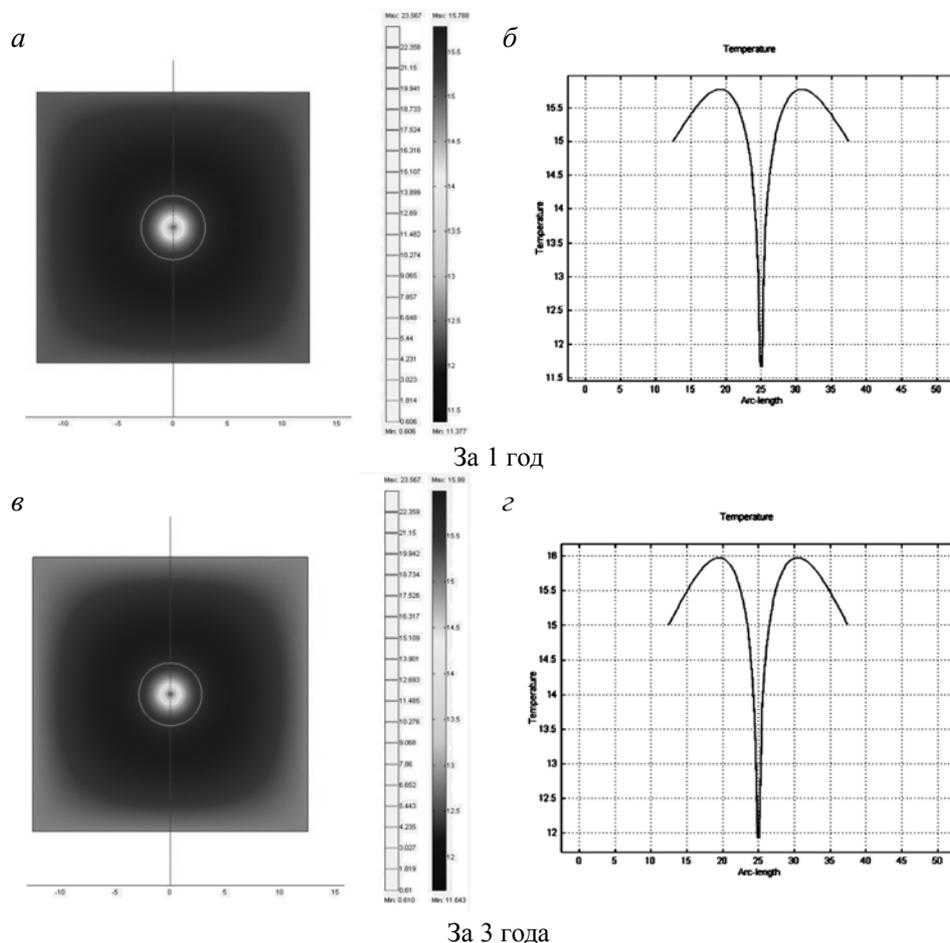


Рис. 4. Изменение температурного поля в процессе знакопеременной нагрузки на пласт

Обобщая результаты исследования, необходимо констатировать, что работа ТНУ в знакопеременном режиме эффективна в условиях годовой эксплуатации. Продолжительность срока «регенерации» равна времени эксплуатационного периода.

Как отмечалось выше, нестационарный режим работы теплового насоса, определяемый климатическими условиями и технологической историей производства, приводит к изменению граничных условий. Для количественного описания знакопеременных режимов работы ТНУ в рамках исследовательской работы предложено ввести коэффициент регенерации – (k_p), который определяется следующим образом:

$$k_p = \frac{Q_{\text{подвод}}}{Q_{\text{отвод}}}, \quad (7)$$

где $Q_{\text{подвод}}$ – количество подведенного потока в холодный период года, Вт;
 $Q_{\text{отвод}}$ – количество отведенного потока в теплый период года, Вт/м².

На рис. 5 представлены результаты определения коэффициента регенерации (k_p) для величин активных нагрузок от +100 до –100 Вт и коэффициента регенерации (k_p) от 0 до 1.

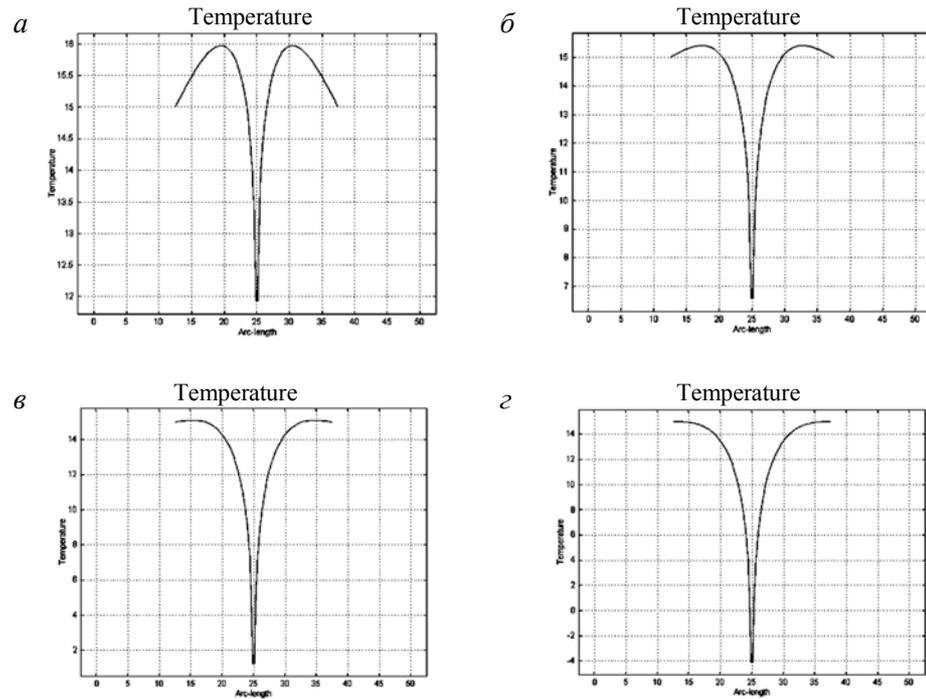


Рис. 5. Температурный график пласта при k_p :
 $a - 0,25$; $б - 0,5$; $в - 0,75$; $г - 1$

Анализируя результаты, полученные в ходе расчета коэффициента регенерации, приходим к выводу, что с его увеличением температура пласта понижается.

Распределение обобщенной зависимости температуры пласта от значений коэффициента регенерации ($k_p = 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1$) величин тепловой нагрузки отражено на рис. 6.

Стоит отметить, что при эксплуатации скважины с регенерацией необходимо ввести некоторые ограничения. При достижении отрицательных температур на оси скважины это может привести к образованию льда. Хотя это явление и приводит к некоторому увеличению съема теплоты за счет увеличения теплопроводности и фазового перехода от жидкого к твердому состоянию вещества, но это же явление приводит к дополнительным проблемам:

– возникает сжатие трубопроводов коллектора или зонда вплоть до их разрушения;

– увеличение объема грунта при его замерзании приводит к его вспучиванию, что может негативно сказаться на дальнейшей эксплуатации.

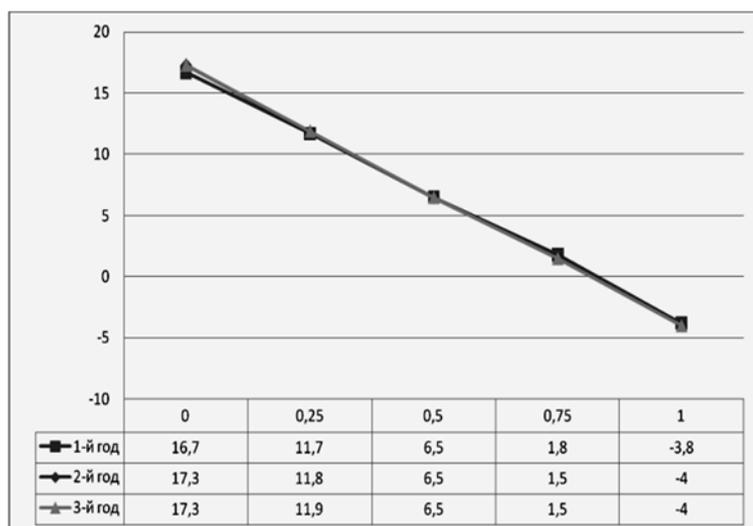


Рис. 6. Зависимость температуры грунта от коэффициента регенерации

Диапазон изменения коэффициента регенерации находится в пределах 0–1. Ввиду разности температурных климатических особенностей регионов и особенностей работы ТНУ значения коэффициента регенерации при обработке принимаем по модулю.

В условиях обобщения полученных результатов и возможности их распространения на расчеты технико-экономических показателей в рамках исследовательской работы авторами предложены модифицированные критериальные зависимости (8), (9) для определения расчётных значений безразмерной температуры при работе теплового насоса:

– без изменения направления теплового потока:

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

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

– с изменением направления теплового потока с поправкой на коэффициент регенерации (9):

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

где k_p – коэффициент регенерации.

Выводы

1. Выход на квазистационарное состояние объясняется тем, что работающая геотермальная скважина является лишь возмущающим объектом в фоно-

вом 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.

2. При работе теплового насоса с изменением направления теплового потока (с регенерацией) температура успевает компенсироваться до следующего режимного нагружения. При коэффициенте регенерации, равном 1, среднее цикловое значение температуры будет находиться в области фоновой температуры пласта. Процесс регенерации позволяет компенсировать «недостающие» величины тепловой нагрузки.

3. Обработка полученных данных в критериальном виде позволяет распространить полученные результаты для широкого диапазона определяющих параметров, практически охватывающих все режимы работы геотермальных установок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Шишкин, Н.Д.* Оценка эффективности применения теплонасосных установок в системах теплоснабжения Астраханской области / Н.Д. Шишкин, И.С. Просвирина // Известия АЖКХ. – 2000. – № 4. – С. 7.
2. *Руденко, Н.Н.* Моделирование температурного поля в грунте / Н.Н. Руденко, И.Н. Фурсова // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 2. – Условия доступа : <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1697>
3. *Васильев, Г.П.* Теплохладоснабжение зданий и сооружений с использованием низкопотенциальной тепловой энергии поверхностных слоев земли : дис. ... докт. техн. наук. – М., 2006. – С. 423.
4. *Костиков, А.О.* Влияние теплового состояния грунта на эффективность теплонасосной установки с грунтовым теплообменником / А.О. Костиков, Д.Х. Харлампиди // Энергетика: Экономика, технология, экология. – 2009. – № 1. – С. 32–40.
5. *Лыков, А.В.* Теория теплопроводности / А.В. Лыков. – М. : Высшая школа, 1967. – 600 с.
6. *Сапрыкина, Н. Ю.* Постановка задачи определения температурного поля геотермального теплового насоса на объектах нефтяной промышленности / Н.Ю. Сапрыкина, П.В. Яковлев // Новейшие технологии освоения месторождений углеводородного сырья и обеспечения безопасности экосистем Каспийского шельфа : материалы VI Международной научно-практической конференции (сентябрь 2015 г.). – Астрахань : Изд-во АГТУ, 2015. – С. 126–130.
7. *Патанкар, С.* Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости : пер. с англ / С. Патанкар. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.

REFERENCES

1. *Shishkin, N.D., Prosvirina I.S.* Otsenka effektivnosti primeneniya teplonasosnykh ustanovok v sistemakh teplosnabzheniya Astrakhanskoi oblasti [Efficiency assessment of heat pump installations in Astrakhan heating systems]. *Izvestiya AZhKKh*. 2000. No 4. P. 7. (rus)
2. *Rudenko N.N., Fursova I.N.* Modelirovanie temperaturnogo polya v grunte [Simulation of soil temperature field]. *Inzhenernyi vestnik Dona*. 2013. No2. Available at: <http://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-temperaturnogo-polya-v-grunte> (rus)
3. *Vasil'ev G.P.* Teplokhladonosnabzhenie zdaniy i sooruzhenii s ispol'zovaniem nizkopotentsial'noi teplovoi energii poverkhnostnykh sloev zemli: dis. ... d-ra tekhn. nauk [Heat supply of buildings using low-grade thermal energy of the earth surface layers. DSc Thesis]. Moscow, 2006. 423 p. (rus)

4. *Kostikov A.O., Kharlampidi D.Kh.* Vliyaniye teplovogo sostoyaniya grunta na effektivnost' teploobmennoi ustanovki s gruntovym teploobmennikom [Soil thermal state and efficiency of heat pump system with heat exchanger]. *Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya*. 2009. No. 1. Pp. 32–40. (rus)
5. *Lykov A.V.* Teoriya teploprovodnosti [Thermal conductivity theory]. Moscow : Vysshaya Shkola Publ., 1967. P. 600. (rus)
6. *Saprykina N.Yu., Yakovlev P.V.* Postanovka zadachi opredeleniya temperaturnogo polya geotermal'nogo teplovogo nasosa na ob'ektakh neftyanoi promyshlennosti [Determination of temperature field of geothermal heat pump in oil industry]. *Proc. 6th Int. Sci. Conf. Astrakhan*: ASTU Publ., 2015. Pp. 126–130. (rus)
7. *Patankar S.V.* Chislennyye metody resheniya zadach teploobmena i dinamiki zhidkosti: uchebnoye posobie [Numerical heat transfer and fluid flow]. Moscow : Energoatomizdat, 1984. 152 p. (transl. from Engl.)