

Н. Ю. САПРЫКИНА

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ГРУНТОВОГО МАССИВА ПРИ МНОГОЛЕТНЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕПЛООВОГО НАСОСА

THE PROBLEM OF MODELLING OF SOIL MASS TEMPERATURE FIELD DURING MANY YEARS SERVICE OF HEAT PUMP

С увеличением времени эксплуатации грунта процесс его теплового режима резко изменяется. В результате происходит изменение температурного поля. Увеличение времени эксплуатации грунта приводит также к теплофизическим изменениям. Длительная работа геотермальных теплонасосных установок диктует необходимость исследований температурных полей эксплуатируемой скважины. Наиболее оптимальным решением вопроса об исследовании таких процессов выступает математическое моделирование, дающее возможность в довольно короткие сроки получить результаты с наименьшими затратами. По результатам экспериментов выявлены температурные значения полей и графические модели, что позволит разработать методику для проектирования подобных систем и дать прогноз при длительном сроке эксплуатации. Данные эксперимента и полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности использовать геотермальное тепло для широкого круга задач по обеспечению тепло- и хладоснабжения.

Ключевые слова: температурное поле, регенерация, тепловой насос, математическая модель

Running time has a great impact on the process of change of soil thermal conditions. As the result temperature field changes. Many years service also causes thermophysical changes. Continuous work of geothermic heat pump plants dictates the need for temperature fields research of operating well. The best method of examination in this case is mathematic simulation. This method gives an opportunity to obtain results in a relatively short time as economically as possible. The experiment furnishes fields temperature values and graphic models which permit to develop the methodology of analogous systems design and to give a long-term outlook on these systems service. The experimental findings and obtained results allow to deduce that geothermal heat can be used for the most extensive range of tasks of heat and cold supply.

Keywords: temperature field, regeneration, heat pump, mathematical model

Геотермальная энергетика как одно из направлений развития энергосберегающих технологий в последнее время вызывает всё больший интерес. Однако даже непродолжительная эксплуатация геотермальных скважин показывает, что эксергетический потенциал прилегающих к поверхности пластов ограничен, в связи с чем эффективность системы падает [1,2]. Разработка научных основ долгосрочного прогноза с учётом различных схем эксплуатации скважин при различных пластовых условиях и стала целью нашего исследования.

Многообразие режимов и определяющих факторов потребовало проведения большого объёма исследований. Основным методом исследования стало математическое моделирование в сочетании с констатирующими натурными замерами на дей-

ствующих объектах геоэнергетики. Особенность формирования нестационарного температурного поля в условиях переменного и знакопеременного режима работы энергетической установки определяет сложный характер нелинейных зависимостей, описывающих температурные поля, решение которых сопряжено со значительными математическими трудностями или даже отсутствием аналитического решения в классическом виде [3–6]. Эта особенность потребовала перехода к численному методу моделирования, реализованному в алгоритме программы на платформе Matlab.

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 [7–15] показывает преобладание потока тепла в радиальном направлении и малую величину теплового потока в осевом направлении. Математическое моделирование температурного поля грунта при использовании геотермальной энергии сводится к решению задачи нестационарной теплопроводности [9]. Вместе с тем, сама Земля и скважина имеют существенные особенности, которые необходимо учитывать в математической модели. Одной из особенностей является влияние фонового теплового потока Земли. В цилиндрической системе координат исходное дифференциальное уравнение имеет вид:

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

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

Учитывая особенности эксплуатации теплонасосных установок (ТНУ), нами рассмотрены следующие режимы: 1) циклические – только подвод или только отвод тепла к пласту без изменения направления теплового потока; 2) циклически чередующиеся – подвод и отвод тепла ТНУ, т. е. изменение направления теплового потока с периодами остановки ТНУ.

В рамках статьи введены понятия «регенерация» и «активная нагрузка».

Было проведено исследование температурного поля в условия циклической однонаправленной эксплуатации ТНУ. Характерные результаты моделирования температурного поля в призабойной части скважины, иллюстрирующие основные закономерности и состояние пласта, представлены на рис. 1, 2.

Предельным случаем работы ТНУ следует считать рассмотренный нами однонаправленный тепловой поток только из пласта или только в пласт, т. е. когда тепловой насос работает только на охлаждение или только на нагрев. При включении теплового насоса (см. рис. 1, 2) начинается разогрев пласта, при его остановке происходит выравнивание температурного поля. Накопление тепла в адиабатном пласте или его отбор будет приводить к непрерывному изменению температурного поля, чего не происходит в реальных пластовых условиях. Выход на квазистационарное состояние объясняется тем, что работающая геотермальная скважина является лишь возмущающим объектом в фоновом температурном поле Земли. При подводе тепла (см. рис. 1, 2) тепловой поток скважины отдаётся поверхности Земли, а при отводе – понижение температуры компенсируется фоновым тепловым потоком, идущим из глубины на поверхность. Таким образом, достигается

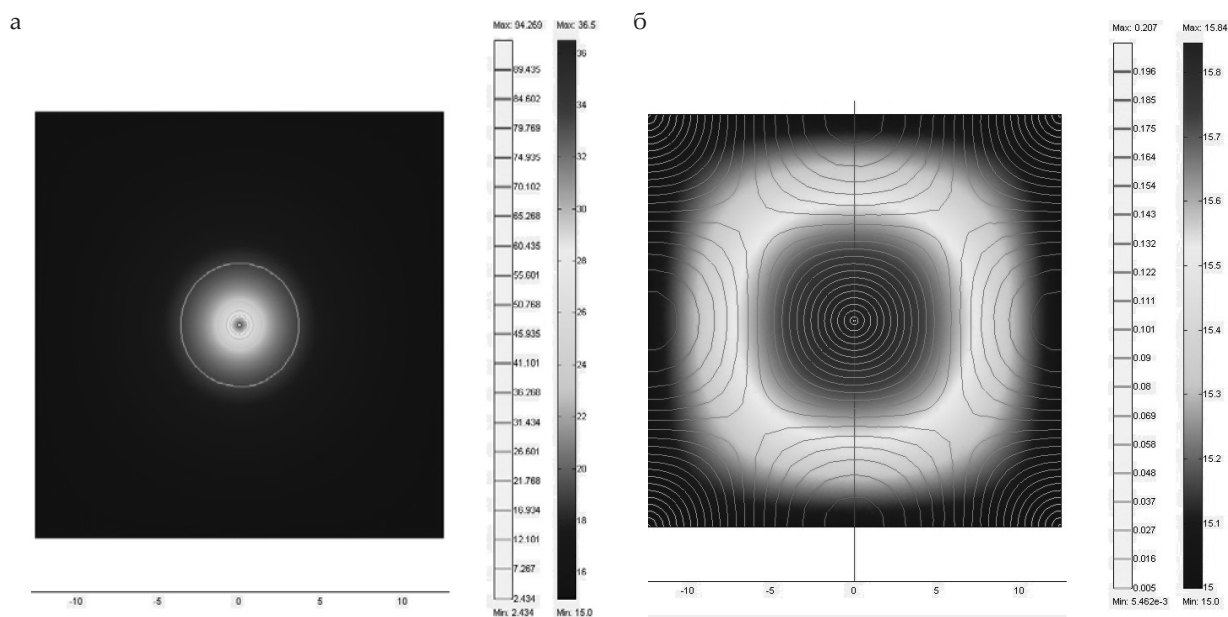


Рис. 1. Температурное поле первого года эксплуатации:
а – 6 месяцев; б – первый год

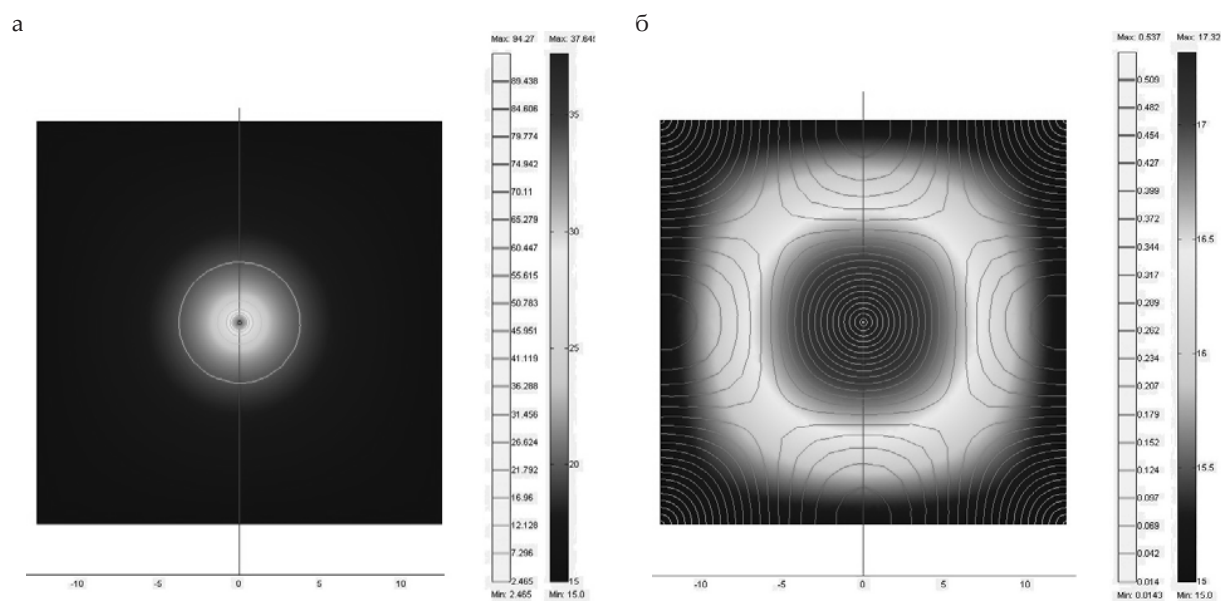


Рис. 2. Температурное поле 5-го года эксплуатации: а – 4,5 года; б – 5 лет

равновесное состояние, а радиус влияния скважины определяется параметрами её работы, теплофизическими свойствами грунта и плотностью фонового теплового потока.

Анализ температурных полей показал, что изменение температуры вокруг скважины направлено

радиально – от оси скважины к ее границам. Изменения температурного поля при завершении очередного сезонного цикла (когда тепловой насос не получает и не отдает тепла, см. рис. 1, б; 2, б) достигают наиболее заметных величин. Значения температуры за первые два года эксплуатации в среднем находятся в диапазоне

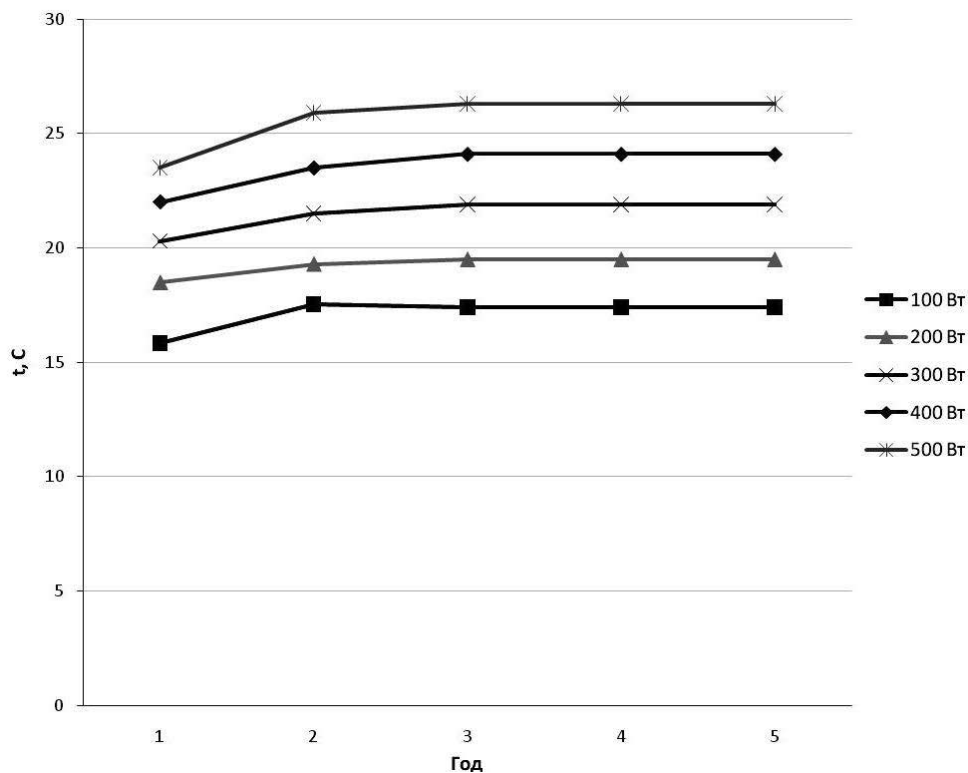


Рис. 3. Зависимость температуры пласта от величины активной нагрузки во времени: 1–100 Вт, 2–200 Вт, 3–300 Вт, 4–400 Вт, 5–500 Вт

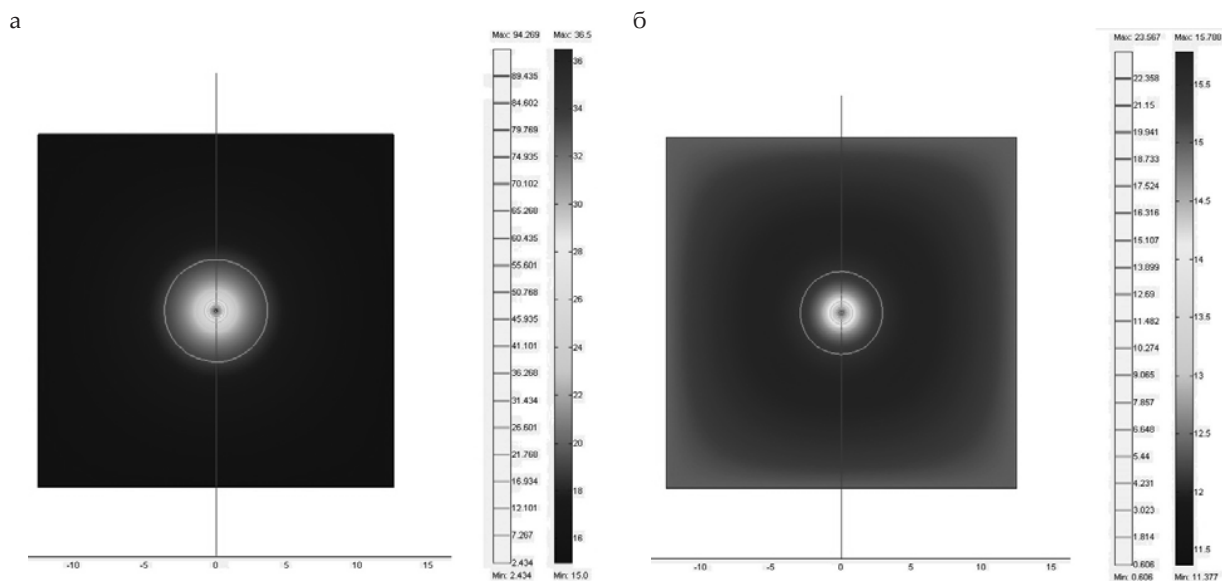


Рис. 4. Температурное поле: а – 6 месяцев; б – первый год

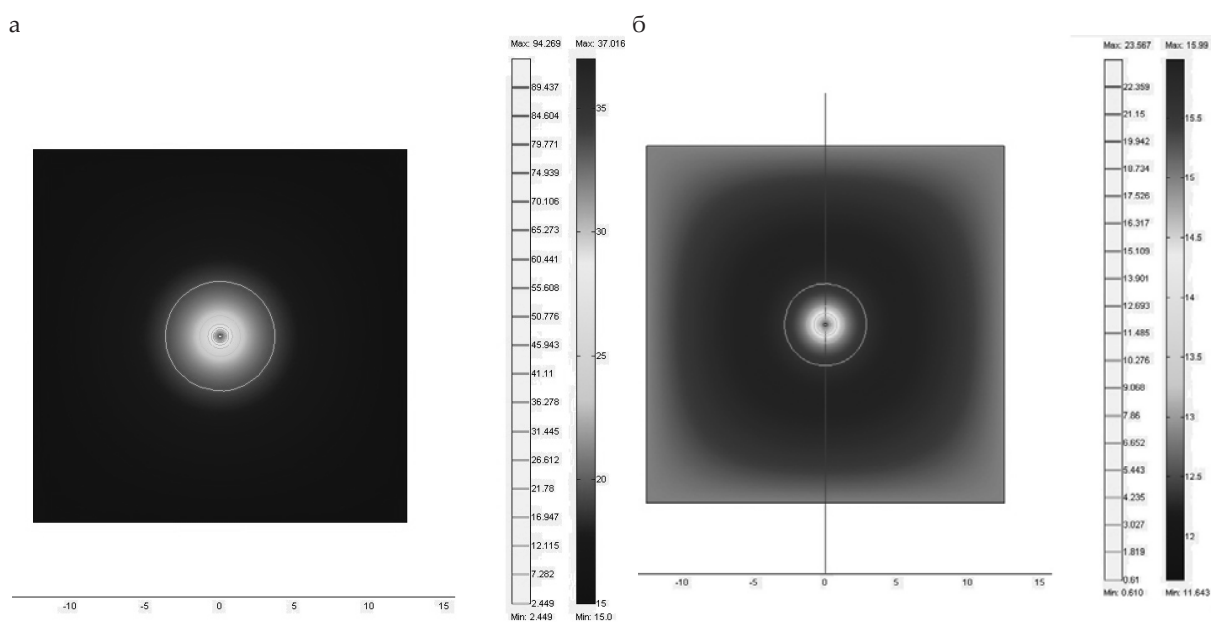
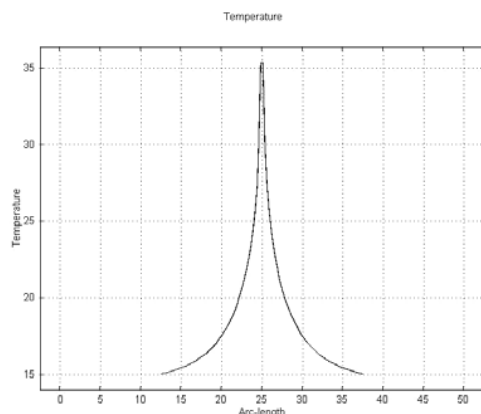


Рис. 5. Температурное поле: а – 2,5 года; б – третий год

температур от 2 до 8 °С – при постоянной величине активной тепловой нагрузки и от 1,5 до 1,9 °С – в период простоя ТНУ. Изображение полей пятого года эксплуатации (см. рис. 2) демонстрирует увеличенные границы изменяющегося поля, где температура исследуемого грунтового пласта повышается в среднем до 10 °С (при работающем режиме), в отключенном режиме – в пределах от 0,5 до 1 °С. Обобщенные результаты исследования по положительной активной нагрузке представлены на рис. 3.

Чередование режимов отвода тепла (работа системы отопления зимой) и подвода тепла (работа системы кондиционирования воздуха летом) соответствует различным температурным режимам пласта (рис. 4, 5). Очевидно, что при отводе тепла пласт охлаждается, а при подводе нагревается, но последовательное реверсирование теплового насоса приводит к появлению системы тепловых волн (рис. 5), которые, в свою очередь, приводят к изменениям технико-экономических

а



б

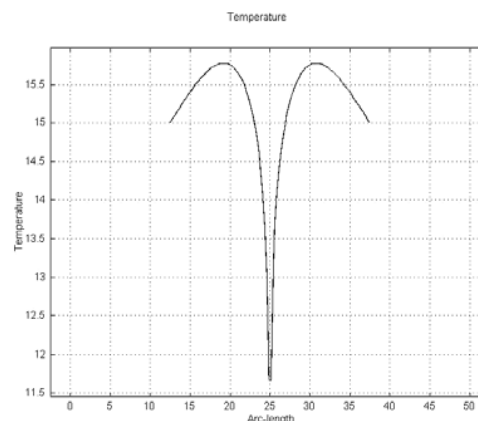


Рис. 6. График температуры: а – 6 месяцев; б – первый год

параметров холодильной машины. Как видно из рис. 4, через несколько лет (исследования, проведенные автором, показали, что минимальный период три года) наступает квазистационарное состояние, когда сезонные изменения входят в установившийся циклический режим.

Следует отметить, что знакопеременный режим работы теплового насоса сопровождается некой регенерацией тепла в пласте и в идеальных условиях лучшим может считаться нулевой баланс, когда количество отобранного из пласта тепла зимой равно количеству подведенного тепла летом.

Характерные графики изменения температурных полей в условиях чередования подвода и отвода активной нагрузки, когда тепловой насос работает круглогодично, представлены на рис. 4–6.

Результаты исследования и расчетов показывают, что стабилизация температурного поля, при переменной активной нагрузке в течение эксплуатационного года, наступает уже на второй год. Температура пласта колеблется в диапазоне 10–15 °С, т. к. зависит от длительности эксплуатации ТНУ. Продолжительность срока «регенерации» равна времени эксплуатационного периода.

Процесс формирования тепловой волны представлен на рис. 6. Подвод тепла к скважине сопровождается ростом температуры в призабойной области, переключение теплового насоса на охлаждение приводит к понижению температуры в скважине, но на удалении от скважины в пласте остаются области с температурой выше её фоновых значений.

Выводы. 1. При циклическом подводе тепловой активной нагрузки в определенном временном периоде (в условиях работы ТНУ в одном режиме):

– на первых этапах эксплуатации происходит «нагружение» скважины, что приводит к искажению температурного фона грунтового пласта;

– температура эксплуатируемого грунтового массива с каждым годом возрастает (при охлаждении падает), но к третьему году эксплуатации скважины стабилизируется независимо от величины активной нагрузки.

2. При циклически чередующейся нагрузке (подвод и отвод тепла ТНУ):

– ежегодное падение грунтовой температуры будет постепенно сокращаться в условиях регенерации (уже на второй год эксплуатации). При этом объем грунтового массива, подверженного изменению температурного режима, будет расширяться с каждым годом;

– цикл регенерации позволяет учесть особенности грунтового пласта и учитывает возможность работы системы в режиме активность/пассивность;

– процесс регенерации позволяет компенсировать недостающие величины тепловой нагрузки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шишкин Н. Д., Просвирина И. С. Оценка эффективности применения теплонасосных установок в системах теплоснабжения Астраханской области // Известия АЖКХ. 2000. № 4. С. 7.
2. Васильев Г. П. Теплохладоснабжение зданий и сооружений с использованием низкопотенциальной тепловой энергии поверхностных слоев земли: дис. ... д-ра тех. наук: 05.23.03. М., 2003. 423 с.
3. Руденко Н. Н., Фурсова И. Н. Моделирование температурного поля в грунте [Электронный ресурс] <http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/2137> // Инженерный вестник Дона (дата обращения: 25.02.2016).

4. Крылов Д. А. Математическое моделирование температурных полей с учетом фазовых переходов в криотитозоне // Электронное научно-техническое издание «Наука и образование». 2012, апрель. № 4. С. 40–43.
5. Федякин В. Я., Карпов М. К. Использование грунтовых теплообменников в системах теплоснабжения // Ползуновский вестник. 2006. № 4. С. 98–103.
6. Малых В. В., Удалов С. Н., Захаров А. А. Методика расчета грунтового аккумулятора // Энерго- и ресурсо-эффективность малоэтажных зданий: материалы научно-практической конференции / Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН. М., 2013. С. 317–318.
7. Костиков А. О., Харлампиди Д. Х. Влияние тепловосостояния грунта на эффективность теплонасосной установки с грунтовым теплообменником // Энергетика: Экономика, технология, экология. 2009. № 1. С. 32–40.
8. 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.
9. Лыков А. В. Теория теплопроводности: М.: Высшая школа, 1967. 600 с., ил.
10. Руководство по применению тепловых насосов с использованием вторичных энергетических ресурсов и нетрадиционных возобновляемых источников энергии: [утверждено и введено в действие указанием Москомархитектуры от 31.01.2011 г. № 8]. М.: ГУП «НИАЦ», 2001. 32 с.
11. Смирнов С. С. Теоретические основы и технологии извлечения геотермальной энергии с использованием абсорбционных тепловых насосов: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.14.01. Новочеркасск, 2011. 19 с.
12. Руденко Н. Н., Фурсова И. Н. Моделирование температурного поля в грунте [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона. 2013. № 2. Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-temperaturnogo-polya-v-grunte> (дата обращения: 03.02.2016).
13. Ground-source heat pump project analysis/ Clean Energy Decision Support Centre/CLEAN ENERGY PROJECT ANALYSIS: RETSCREEN® ENGINEERING & CASES TEXTBOOK/Minister of Natural Resources Canada 2001–2005.
14. Руденко Н. Н. Особенности прогнозирования эффективности работы теплового насоса [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона. 2012. № 4–1. Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-prognozirovaniya-effektivnosti-raboty-teplovogo-nasosa> (дата обращения: 01.03.2016).
15. Крылов Д. А., Мельников Ю. С. Математическое моделирование распределения температурных полей в криолитозе // Студенческий научный вестник: сборник статей четвертой научно-технической выставки «Политехника». М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. С. 94–97.

Об авторе:

САПРЫКИНА Надежда Юрьевна

аспирант Астраханского инженерно-строительного института
414056, Россия, г. Астрахань, ул. Татищева, 18,
тел. 8–927– 661-48-60
E-mail: nadin_id@rambler.ru

SAPRYKINA Nadezhda Yu.

Post-Graduate Student of the Engineering Systems and Ecology Chair
Astrakhan State University of Civil Engineering
414056, Russia, Astrakhan, Tatishcheva str., 18,
tel. (8512) 56–17–91
E-mail: nadin_id@rambler.ru

Для цитирования: Сапрыкина Н. Ю. Постановка задачи моделирования температурного поля грунтового массива при многолетней эксплуатации теплового насоса // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. 2016. № 3 (24). С. 25–30. DOI: 10.17673/Vestnik.2016.03.4.

For citation: Saprykina N. Yu. The problem of modelling of soil mass temperature field during many years service of heat pump // Vestnik SGASU. Town Planning and Architecture. 2016. № 3 (24). Pp. 25–30. DOI: 10.17673/Vestnik.2016.03.4.