

ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ. ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ И ЖКХ

УДК 536.491

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ, РАБОТАЮЩИХ В КОМПЛЕКСЕ С ТЕПЛОМ НАСОСОМ

Н. Ю. Сапрыкина

Астраханский государственный архитектурно-строительный университет

В статье представлен анализ и рекомендации повышения технико-экономических показателей грунтовых тепловых насосов, работающих сезонно для систем теплоснабжения и кондиционирования, за счёт изменения коэффициента регенерации температурного пласта низкопотенциальной скважины на протяжении длительного срока эксплуатации.

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

INCREASE IN OVERALL PERFORMANCE OF SYSTEMS OF HEAT SUPPLY AND THE CONDITIONING WORKING IN THE COMPLEX WITH THE THERMAL PUMP

N. Yu. Saprykina

Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering

The article presents an analysis and recommendations for improving the technical and economic indicators of ground heat pumps operating seasonally for heat supply and air conditioning systems by changing the coefficient of regeneration of a temperature reservoir of a low-potential well over a long service life.

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

Энерго- и ресурсосбережение является приоритетной задачей, определяющей направление национальной политики большинства стран мира. В мировой практике, для целей энергосбережения широко используется геотермальная энергия. Различают два вида тепловой энергии, содержащейся в недрах Земли (поверхностных слоев земли): низкопотенциальная и высокопотенциальная. Высокопотенциальная тепловая энергия представляет собой геотермальные ресурсы (термальные воды, пароводяные смеси и сухой пар), которые сосредоточены лишь на малых территориях Российской Федерации (Камчатка, район Кавказских минеральных вод). Использование тепла Земли в районах с высокой вулканической активностью и высокими температурами грунта вблизи поверхности не представляет особых технических сложностей. Повысить эффективность реализации энергетического потенциала Земли можно, реализуя два основных принципа.

Во-первых, повысить температурный напор с относительно небольшими затратами, используя теплонасосные установки;

Во-вторых, термическое сопротивление грунта достаточно велико и тепловые потоки ограничены, что в принципе не позволяет создавать геотермальные теплоэнергетические установки высокой мощности.

Вместе с тем эксергетический анализ показывает перспективность использования сезонности теплового насоса, т.е. циклическое включение систем, и даже их реверс. Рассматривая грунт не

только с позиции места сбора рассеянного тепла Земли, но и теплового аккумулятора высокой ёмкости, можно реализовать принципиально иные способы получения низкопотенциальной геотермальной энергии, основанные на наличии естественных сезонных перепадов температур.

Более 90 % территорий страны на экономически доступных глубинах от 50 до 100 м ниже уровня поверхности Земли круглогодично располагают зонами с температурой 15–18 °С, которые можно отнести к низкопотенциальным источникам тепла (см. рис. 1), согласно [1]. Этот температурный диапазон не может быть реализован в большинстве технологических процессов, в том числе и в системах теплоснабжения.

Ввиду этого, наиболее перспективным считается отбор низкопотенциальной энергии с помощью тепловых насосов, позволяющих с относительно незначительными затратами получить требуемые температуры теплоносителей [1, 2]. Эффективность работы теплового насоса определяется коэффициентом температурной трансформации (COP). С изменением температуры скважины меняется и коэффициент трансформации, который в основном зависит от условий эксплуатации. Затратив 1 кВт электроэнергии в приводе насоса, можно получить 3–4 кВт тепловой энергии. Коэффициент трансформации тепла зависит от разности температур. Чем меньше разность температур, тем выше коэффициент трансформации. В связи с этим себестоимость тепла становится меньше.



Рис. 1. Эффективные районы территории России низкопотенциальной тепловой энергии поверхностных слоёв Земли для систем теплоснабжения и кондиционирования

Имеющаяся статистика и конкретные примеры применения на территории России (Краснодарский край, Астраханская область) и ряда Европейских стран (Канады, Германии, Швеции) показали положительные результаты использования низкопотенциального тепла.

Технологические особенности теплового насоса, применяемого в отраслях промышленности, сельского хозяйства, пищеперерабатывающие, культивационные сооружения позволяют использовать это оборудование как в режиме теплоснабжения, так и кондиционирования [3–5]. Как правило, использование разных технологических режимов сезонно. Зимой – на теплоснабжение, летом – холодоснабжение (кондиционирование). Обычно в применяемых технологических режимах на объектах используют отдельные схемы получения теплоты и холода, при этом полученная теплота рабочего тела в большинстве случаев рассматривается как «отходы» и утилизируется в окружающую среду. Температурное поле грунтового массива может меняться в зависимости от режимов работы инженерной системы, работающей в комплексе с тепловым насосом. Характеристика изменения температурных волн в зависимости от режима эксплуатации теплового насоса отражена в исследованиях [6–8]. Известно, что при работе установки только на нагрев или

только на охлаждение заметные изменения температурного фона грунта, отражающиеся на технико-экономических показателях (ТЭП) теплового насоса, проявляются на пятый год эксплуатации [2, 9]. По этой причине для сохранения проектных параметров гелиоэнергетической установки и теплового баланса грунта необходимо комбинировать направление тепловых потоков, то есть оптимальным режимом является чередование теплоснабжения / кондиционирования.

Для эффективной работы и высокой надёжности систем теплоснабжения (кондиционирования) и теплового насоса с вертикальным грунтовым теплообменником при проектировании должны быть выбраны оптимально благоприятные условия и месторасположения будущих скважин. Для более грамотного исполнения и применения оборудования необходимо получение дополнительной информации по геофизическим и геологическим изысканиям эксплуатируемой площадки. Разработка такого рода предпроектной документации требует дополнительных финансовых затрат и времени. Во многом ситуацию осложняет и то, что отсутствует единая информационная база климатических особенностей регионов, в которых тепловые насосы уже установлены.

Эффективность работы теплового насоса определяется коэффициентом температурной трансформации (COP). С изменением температуры скважины меняется и коэффициент трансформации, который в основном зависит от условий эксплуатации. Самый высокий COP – полученный, когда цикл является обратимым, т.е. работает на обратном цикле Карно. В этом случае COP является отношением высокой температуры резервуара и низкого теплового резервуара. Таким образом, COP, определяющий технико-экономические показатели комплекса низкопотенциальной геотермальной скважины с тепловым насосом, зависит от температуры на забое скважины.

Коэффициент трансформации тепла определяется температурными режимами. Для геотермальной установки это температура скважины и температура потребителя энергии. На рисунке 2 приведена схема работы теплового насоса с основными потребителями предприятия, в котором используется чередование режимов теплоснабжения / кондиционирования.

Согласно II закону термодинамики [10] тепло самостоятельно не может переходить от источника низкопотенциальной тепловой энергии к потребителю. Для осуществления процесса переноса теплового потока к потребителю затрачивается энергия.

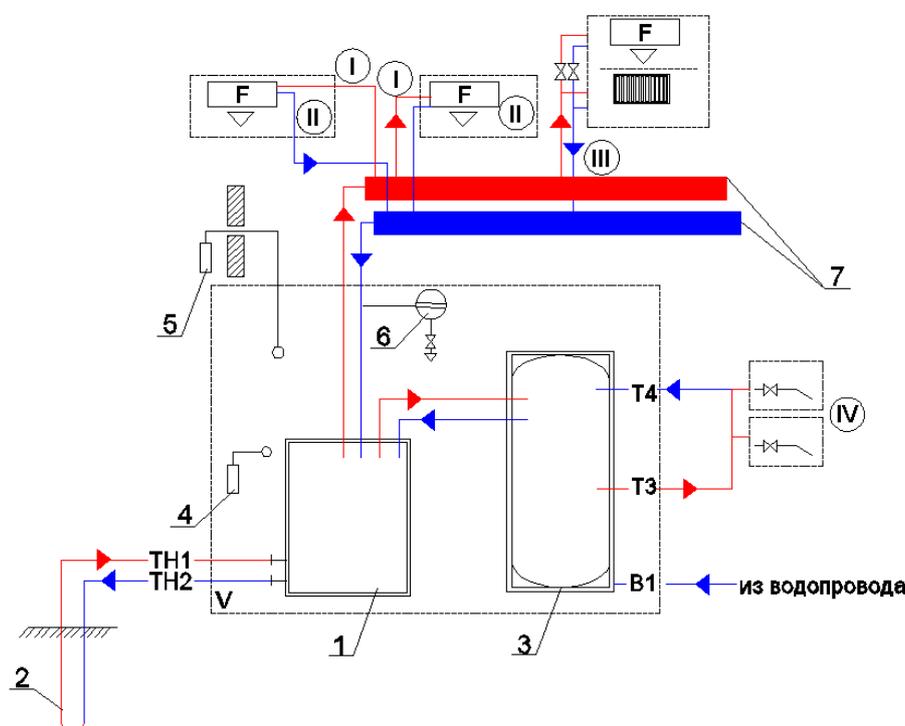


Рис. 2. Принципиальная схема теплового насоса с потребителями:

1 – тепловой насос; 2 – геозонд; 3 – бак-аккумулятор; 4 – автоматизированная система удалённого доступа; 5 – автоматика погодозависимая; 6 – расширительный бак; 7 – коллектор; I – теплоснабжение от фанкойла (холодный период года); II – кондиционирование от фанкойла (летний период года); III – кондиционирование от фанкойла; теплоснабжение от радиатора; IV – горячее водоснабжение; V – тепловой пункт; TH1 – теплоноситель из скважины, TH2 – теплоноситель в скважину; B1 – водопровод; T3, T4 – трубопроводы горячего водоснабжения

Как правило, эта работа представлена энергией, затраченной компрессором:

$$l_k = q_1 - q_2, \quad (1)$$

где l_k – работа, Дж; q_1 – теплота, отданная горячим источником, имеющим температуру T_1 , рабочему телу, Дж / кг; q_2 – теплота, отданная рабочим телом холодильнику с температурой, T_2 , Дж / кг.

В теоретическом цикле теплового насоса затрачивается дополнительная работа l_k . Горячему телу с температурой T_1 при относительно небольших температурных напорах передаётся

тепла больше, чем взято у холодного тела с температурой T_2 :

$$q_1 = q_2 + l_k. \quad (2)$$

Анализ зарубежной и отечественной научно-технической литературы подтверждает, что, несмотря на работу систем теплоснабжения и кондиционирования, на основе теплового насоса и низкопотенциального источника тепла, ключевой информацией, необходимой для проектирования и успешной эксплуатации систем, является исследование удалённых последствий, влияющих на низкопотенциальные геотермальные скважины. Конкретные вопросы реализации и

анализ основных показателей (изменение массива грунта, динамика и диапазон изменения температурных полей, графики прямого и обратного потоков в скважину, специфики требований в период многолетней эксплуатации) в научно-технических источниках освещены недостаточно полно.

Проблему осложняет и тот факт, что на данный момент на территории Российской Федерации отсутствует единая инженерно-географическая база по фиксированному применению теплонасосного оборудования и характеру влияния эксплуатационных характеристик грунтовой массив.

Анализ литературных источников показал, что производились расчёты стационарной теплоёмкости грунтового массива в цилиндрических координатах рассеянного тепла в неограниченном пространстве. Большинство вопросов по расчёту температурного поля в неограниченном пространстве для эксплуатируемого грунтового массива низкопотенциального источника тепла для систем теплоснабжения и кондиционирования до сих пор остаются открытыми. В связи с этим при эксплуатации технико-экономические показатели систем теплоснабжения и кондиционирования начинают ухудшаться. Это потребовало дополнительных исследований, которое стало основой настоящего исследования.

Как отмечалось выше, нестационарный режим работы теплового насоса, определяемый климатическими условиями и технологической историей производства, приводит к изменению граничных условий. Для количественного опи-

сания знакопеременных режимов работы теплового насоса в рамках исследовательской работы предложено ввести коэффициент регенерации – (k_p), который определяется следующим образом [11]:

$$k_p = \frac{Q_{подвод}}{Q_{отвод}}, \quad (3)$$

где $Q_{подвод}$ – количество подведённого потока в тёплый период года, Вт / м²; $Q_{отвод}$ – количество отведённого потока в холодный период года, Вт / м².

Как правило, тепло, образованное вторично, не используется и утилизируется в атмосферу. С экономической точки зрения целесообразнее направлять это тепло обратно в скважину, обеспечивая восстановление температурного поля с целью повышения термодинамической эффективности теплонасосного оборудования. В силу обратимости рабочего процесса тепловой насос может работать эффективно как в режиме теплоснабжения объекта в холодное время, так и в режиме хладоснабжения – в жаркое время года (кондиционирование помещений).

Построение температурного поля будет учитывать обратимость процесса и рассчитываться с учетом действующего коэффициента регенерации k_p (3).

Расчётная модель представлена на рисунке 3 в условиях, когда тепловой насос попеременно работает на теплоснабжение и кондиционирование. Знак « – » обозначает отрицательную нагрузку на скважину (т.е. тепло отбирается).

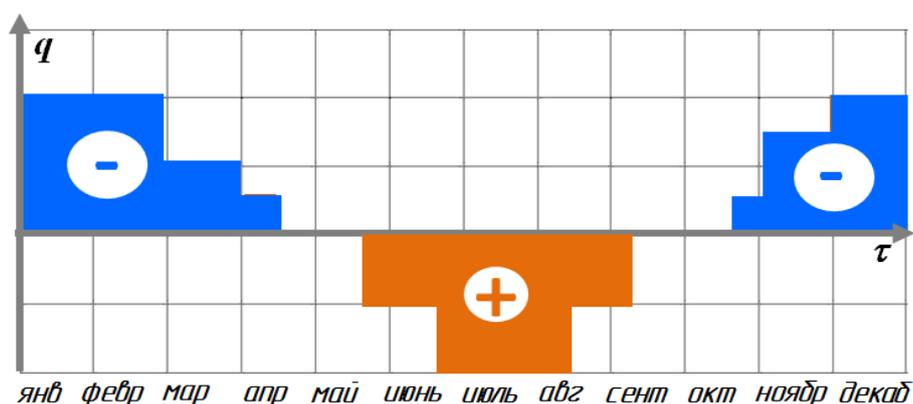


Рис. 3. Схема нагрузок теплового насоса при знакопеременном режиме

Моделирование процессов изменения теплового поля грунтового массива в условиях знакопеременного нестационарного теплового потока представляет собой чрезвычайно сложную задачу. Решение требует физико-математического описания сложного температурного поля, сформировавшегося под действием разнообразных нестационарных механизмов, определяющих процесс теплосбора (теплоотвода), включая:

внешние климатические условия, параметры теплового насоса, изменение характеристик грунта [12].

В рамках исследовательской работы знакопеременный режим принято считать чередованием системы теплоснабжения и кондиционирования и наоборот. Чередование режимов – отвода тепла (работа системы на теплоснабжение – зимой) и подвода тепла (работа системы

кондиционирования – летом) соответствует различным температурным режимам пласта. Следует отметить, что знакопеременный режим работы теплового насоса сопровождается регенерацией тепла в пласте, и, в идеальных условиях, лучшим можно считать нулевой баланс, когда количество отобранного из пласта тепла зимой равно количеству подведённого тепла летом. Иными словами, даже в адиабатном режиме температура пласта не должна изменяться в долгосрочной перспективе.

На рисунке 4 представлена схема основных этапов работы в знакопеременном режиме («+» – подвод нагрузки в скважину, знак «-» – отвод) [17].

В зависимости от режима работы теплового насоса в долгосрочной перспективе устанавливается разная температура пласта (рис. 5). Если просто отводить из пласта тепло, температура падает и через пару лет устанавливается на каком-то нижнем уровне, если чередовать подвод / отвод, то начинает приближаться к фоновой. Если коэффициент регенерации равен 1, то – практически фоновая.

На рисунке 6 отражены результаты оцифрованных расчетных данных приведенных в графике [13, 14]. На основании этого и был получен следующий вид уточненного критериального уравнения (4) с поправкой на коэффициент регенерации k_p .

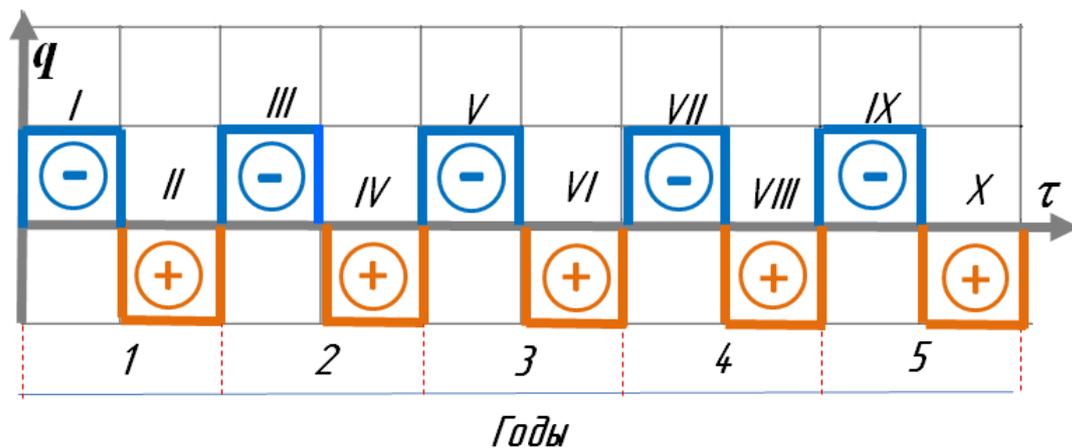


Рис. 4. Расчётная схема нагрузок теплового насоса при знакопеременном режиме для основных этапов: I – 6 месяцев, II – 1 год, III – 1,5 года, IV – 2 года, V – 2,5 года, VI – 3 года, VII – 3,5 года, VIII – 4 года, IX – 4,5 года, X – 5 лет

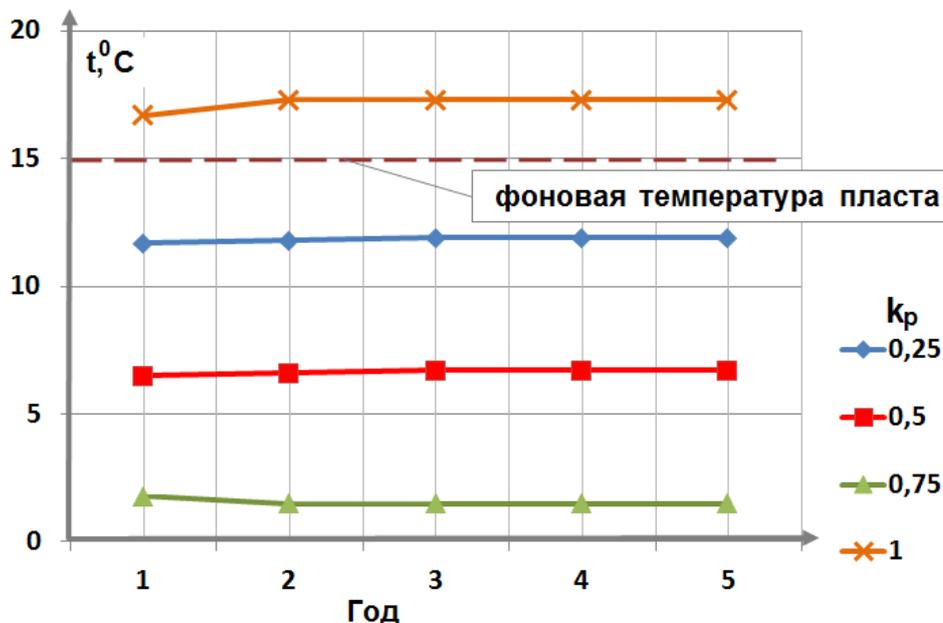


Рис. 5. Сравнительная характеристика режимов эксплуатации в зависимости от коэффициента регенерации k_p при эксплуатации теплового насоса

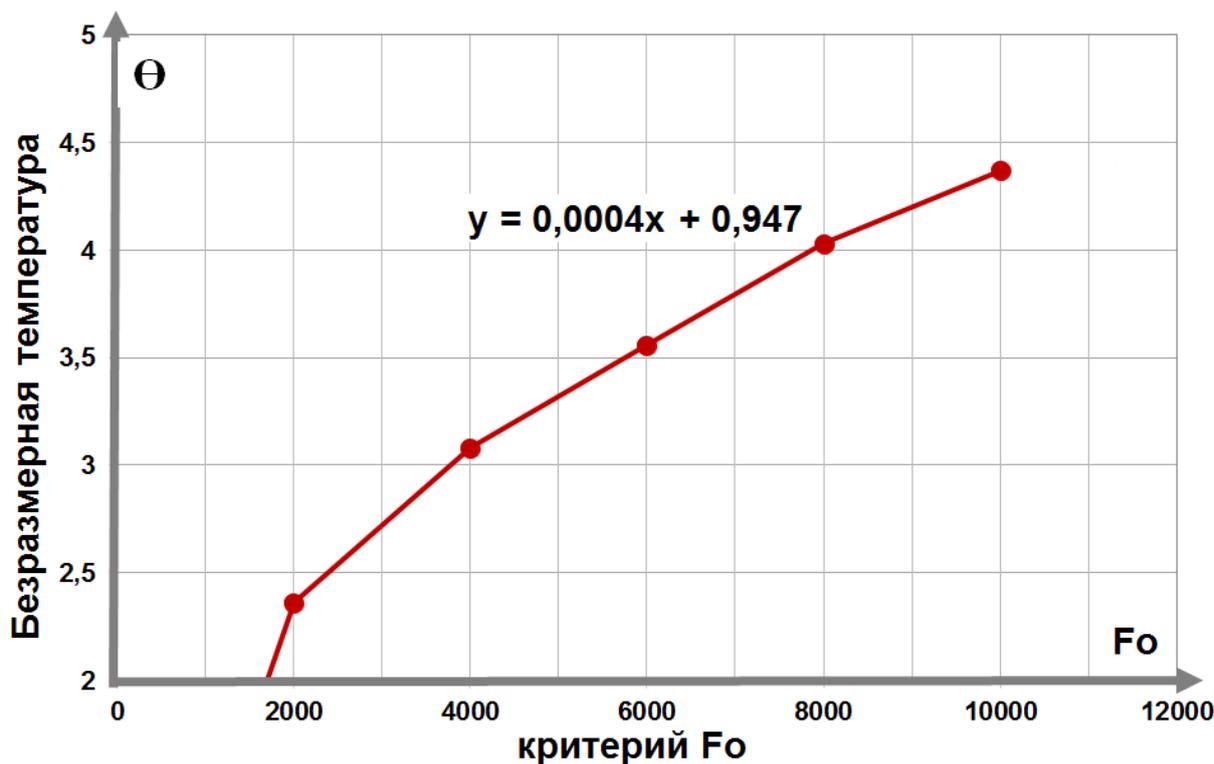


Рис. 6. Зависимость расчётных значений без регенерации с оцифровкой данных

Решением полученного уравнения линии тренда является следующее выражение:

$$f(k_p) = 0,0004 \cdot k_p + 0,947. \quad (4)$$

Таким образом, полученное уравнение может служить поправкой к расчёту основного выражения для режима с сезонным чередованием теплоснабжения и кондиционирования [13].

Тогда уравнение для знакопеременного теплового потока скважины с поправкой на коэффициент регенерации будет выглядеть:

$$\theta = -5 \cdot 10^{-9} \cdot Q \cdot Fo^2 + 2 \cdot 10^{-8} Fo \cdot Q + 0,0003 \cdot Q + 5,1(0,0004 \cdot k_p + 0,947), \quad (5)$$

где F_o – критерий Фурье, θ – безразмерная температура, Q – безразмерный активный тепловой поток, k_p – коэффициент регенерации.

В рамках исследовательской работы получены критериальные уравнения, позволяющие учитывать цикличность тепловых нагрузок и режимы эксплуатации систем теплоснабжения и кондиционирования с учётом их сезонного характера работы, а также возможность распространения полученных результатов исследований на широкий круг объектов проектирования различных климатических регионов.

Список литературы

1. 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 (дата обращения 17.02.2016).
2. Васильев Г. П. Теплохладоснабжение зданий и сооружений с использованием низкопотенциальной тепловой энергии поверхностных слоев земли : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 2006. С. 423.
3. Амерханов Р. А. Тепловые насосы. М. : Энергоиздат, 2005. 160 с.
4. Амерханов Р. А. Теплоэнергетические установки и системы сельского хозяйства / под ред. Б. Д. Драганова. М. : Колос-Пресс, 2002. 426 с.
5. Сergygin A. A., Osmak A. A., Ryabokon N. V. Охлаждение оборотной воды сахарного завода с использованием грунтовых контуров тепловых насосов // Вістник АМУ. Серія. Техніка. 2014. № 2. С. 122–132.
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. Мацевиты Ю. М., Тарасова В. А., Харлампида Д. Х. Восстановление теплового потенциала грунта за счет выбора рациональных режимов работы теплонасосной системы // Тезисы докладов и сообщения XIV Минского международного форума по тепло- и массообмену. 2012. Т. 1. С. 736–739.
8. Федянин В. Я., Карлов М. К. Использование грунтовых теплообменников в системах теплоснабжения // Ползуновский вестник. 2006. № 4. С. 98–103.
9. Шишкин Н. Д., Просвирина И. С. Оценка эффективности применения теплонасосных установок в системах теплоснабжения Астраханской области // Известия АЖКХ. 2000. № 4. С. 7.
10. Васков Е. Т. Термодинамические основы тепловых насосов. СПб. : СПбГАСУ, 2007. 127 с.

11. Сапрыкина Н. Ю., Яковлев П. В. Исследование естественного изменения температурного поля при многолетней эксплуатации теплового насоса // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 4 (57). С. 117–125.
12. 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. 2015. № 4 (14). С. 60–66.
13. Сапрыкина Н. Ю., Панов М. Я. Исследование влияния режимов работы геотермальной скважины с системами теплоснабжения и кондиционирования в комплексе с тепловым насосом на температуру грунтового пласта // Научный журнал строительства и архитектуры. 2018. № 4 (52). С. 105–116.
14. Сапрыкина Н. Ю., Панов М. Я. Исследование изменения температурного поля грунтового массива при воздействии циклическим знакопеременным тепловым потоком (регенерация температурного поля) // Научный журнал строительства и архитектуры. 2018. № 4 (52). С. 117–128.
15. Сапрыкина Н. Ю. Исследование факторов, влияющих на работу грунтовых тепловых насосов при длительных сроках эксплуатации // Известия КГАСУ. 2018. № 2 (44). С.177–183.

© Н. Ю. Сапрыкина

Ссылка для цитирования:

Сапрыкина Н. Ю. Повышение эффективности работы систем теплоснабжения и кондиционирования, работающих в комплексе с тепловым насосом // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2018. № 2 (24). С. 17–23.

УДК 697.1

ПЕРСПЕКТИВЫ «ЗЕЛЁНОГО» СТРОИТЕЛЬСТВА НА ТЕРРИТОРИИ АСТРАХАНСКОЙ ОБЛАСТИ

Ю. А. Аляутдинова, Н. Д. Шалак

Астраханский государственный архитектурно-строительный университет

Рассмотрен вопрос зарождения «зелёного» строительства, его связь с понятием «устойчивое развитие». Установлены основные критерии, определяющие соответствие здания «зелёным» стандартам. Изучен вопрос внедрения технологий «зелёного» строительства как на территории России, так и на территории Астраханской области. Установлены основные заказчики «зелёных» зданий, определены причины их интереса к подобным технологиям. Предложены пути решения вопроса о внедрении «зелёных» технологий, а также ожидания от их дальнейшего развития.

Ключевые слова: «зеленое» строительство, энергосбережение, энергоэффективность, ресурсосбережение.

PROSPECTS OF “GREEN” BUILDINGS IN THE ASTRAKHAN REGION

Yu. A. Alyautdinova, N. D. Shalak

Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering

The question of the emergence of “green” buildings, its connection with the concept of “sustainable development.” The main criteria determining the compliance of the building with “green” standards are defined. The issue of introducing technologies of “green” buildings, both in Russia and in the Astrakhan region, has been studied. The main customers of “green” buildings were established, the reasons for their interest in similar technologies were determined. The ways of solving the issue of introducing “green” technologies, as well as expectations of their further development, are proposed.

Keywords: “green” buildings, energy saving, energy efficiency, resource saving.

К настоящему времени «зелёное» строительство является одним из наиболее активно развивающихся мировых направлений в архитектуре и строительстве. «Зелёное» строительство – это вид строительства и эксплуатации зданий, оказывающих наименьшее влияние на окружающую среду. Его задачей является понижение степени расхода энергетических и материальных ресурсов на протяжении всего жизненного цикла строительного объекта: от выбора земельного участка под строительство и проектирования и возведения здания до эксплуатации и сноса. К подобным решениям относят меры по снижению потребления тепловой и электрической энергии, увеличение роли индивидуальных источников энергии и рациональное водопользования, современные дизайнерские и архитектурные проекты, направленные в том числе на рекультивацию земель, за-

нятых зданием, переработку отходов на этапе строительства и дальнейшего функционирования здания [1].

«Зелёное» строительство, как и развитие энергоэффективных технологий на западе, берёт своё начало с энергетического кризиса 1973 г., хотя первые прототипы и проекты энергоэффективных зданий стали появляться уже в 60-х гг. XX в., например, дома с использованием стены Тромба – Мишеля [2, 3]. Однако рейтинговые системы, позволяющие оценить соответствие здания «зелёным» стандартам, появились в 90-х гг. XX в. К наиболее авторитетным из них относят созданный в 1990 г. английский рейтинг BREEAM и рейтинг LEED, разработанный в США в 1998 г.

Российские стандарты «зелёного» строительства изначально были разработаны в 2009 г. с началом постройки олимпийских объектов в г. Сочи, в 2012 г. Исходя из опыта применения, они