

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

П. В. Яковлев\*, Н. Ю. Сапрыкина\*\*

\*Санкт-Петербургский горный университет

\*\*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 счет изменения коэффициента регенерации температурного пласта низкопотенциальной скважины на протяжении длительного срока эксплуатации.

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

## THE EFFICIENCY OF HEATING SYSTEMS AND AIR CONDITIONING SYSTEMS, HEAT PUMP

P. V. Yakovlev\*, N. Yu. Saprykina\*\*

\*St. Petersburg mining University

\*\*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 реализовав два основных принципа:

Во-первых – повысить температурный напор с относительно небольшими затратами можно 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 энергетический 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 (рисунок 1), согласно [1]. Этот температурный диапазон не может быть реализован в большинстве технологических процессов, в том числе и в системах теплоснабжения.



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

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 свою очередь 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.

Имеющаяся статистика и конкретные примеры применения на территории России (Краснодарский край, Астраханская область) и ряда Европейских стран (Канады, Германии, Швеции) и 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 ре-

жиме теплоснабжения, так и в режиме кондиционирования [3, 4, 5]. Как правило, использование разных технологических режимов сезонно. Зимой – на теплоснабжение, летом – холодоснабжение (кондиционирование). Обычно, в применяемых технологических режимах на объектах, 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 отражены в исследованиях [6,7,8]. 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 5-й год эксплуатации [2,9]. В связи с этим, для сохранения проектных параметров гелиоэнергетической установки и теплового баланса грунта, необходимо комбинировать направление тепловых потоков, то есть оптимальным режимом является чередование теплоснабжение/кондиционирование.

Для эффективной работы и высокой надежности 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 свою очередь в основном зависит от условий эксплуатации. Самый высо-

кий 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 теплоснабжение/кондиционирование.

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.

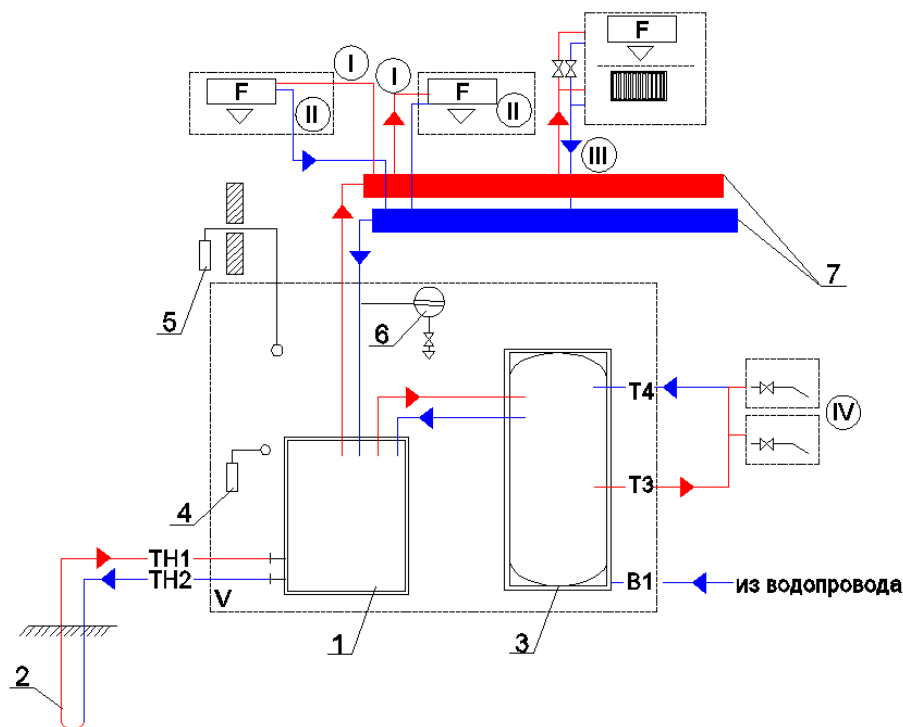


Рис. 2. Принципиальная схема теплового насоса с потребителями:

1-тепловой насос; 2-гео-зонд; 3- бак-аккумулятор; 4-автоматизированная система удаленного 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 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 передается 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 характере влияния эксплуатационных характеристик грунтового массив.

Анализ литературных источников показал, что производились расчеты стационарной теплоемкости грунтового массива в цилиндрических координатах рассеянного тепла в неограниченном пространстве. Большинство вопросов по расчету 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, приводят к изменению граничных условий. Для количественного описания знакопеременных режимов работы теплового насоса, в рамках исследовательской работы предложено ввести коэффициент регенерации - ( $k_p$ ), который определяется следующим образом [11]:

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

где  $Q_{\text{подвод}}$  - количество подведенного потока в теплый период года, Вт/м<sup>2</sup>;

$Q_{\text{отвод}}$  - количество отведенного потока в холодный период года, Вт/м<sup>2</sup>.

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).

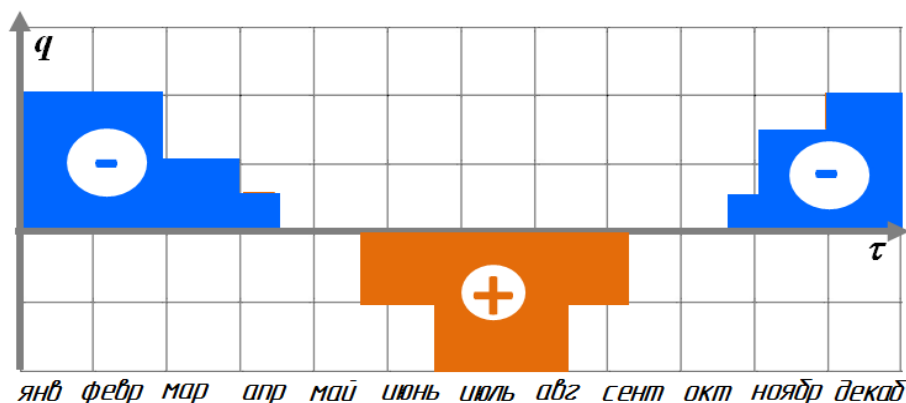


Рис. 3. Схема нагрузок теплового насоса при знакопеременном режиме

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 чередование системы теплоснабжение и кондиционирование 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 подведенного тепла летом. Т.е., 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].

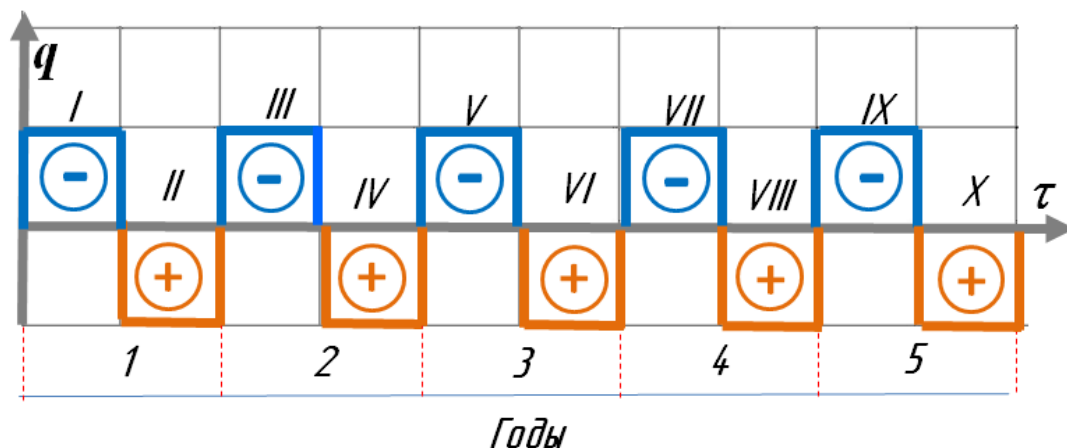


Рис. 4. Расчетная схема нагрузок теплового насоса при знакопеременном режиме для основных этапов: (I - 6 месяцев, II - 1 год, III - 1,5 года, IV - 2 года, V - 2,5 года, VI - 3 года, VII - 3,5 года, VIII - 4 года, IX - 4,5 года, X - 5 лет)

В зависимости от режима работы теплового насоса в долгосрочной перспективе, устанавливается разная температура пласта (рисунок 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.

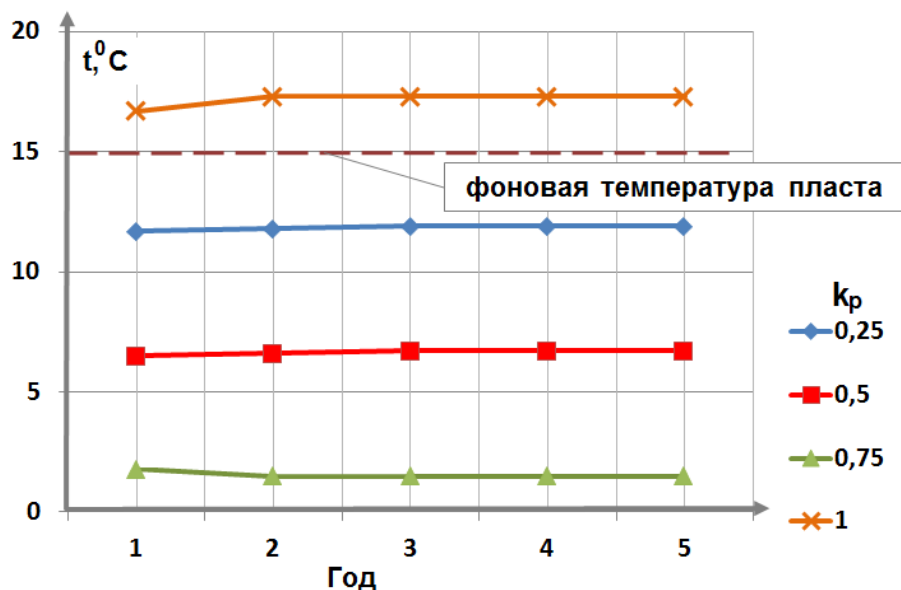


Рис. 5. Сравнительная характеристика режимов эксплуатации в зависимости от коэффициента регенерации  $k_p$  при эксплуатации теплового насоса

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  $k_p$ .

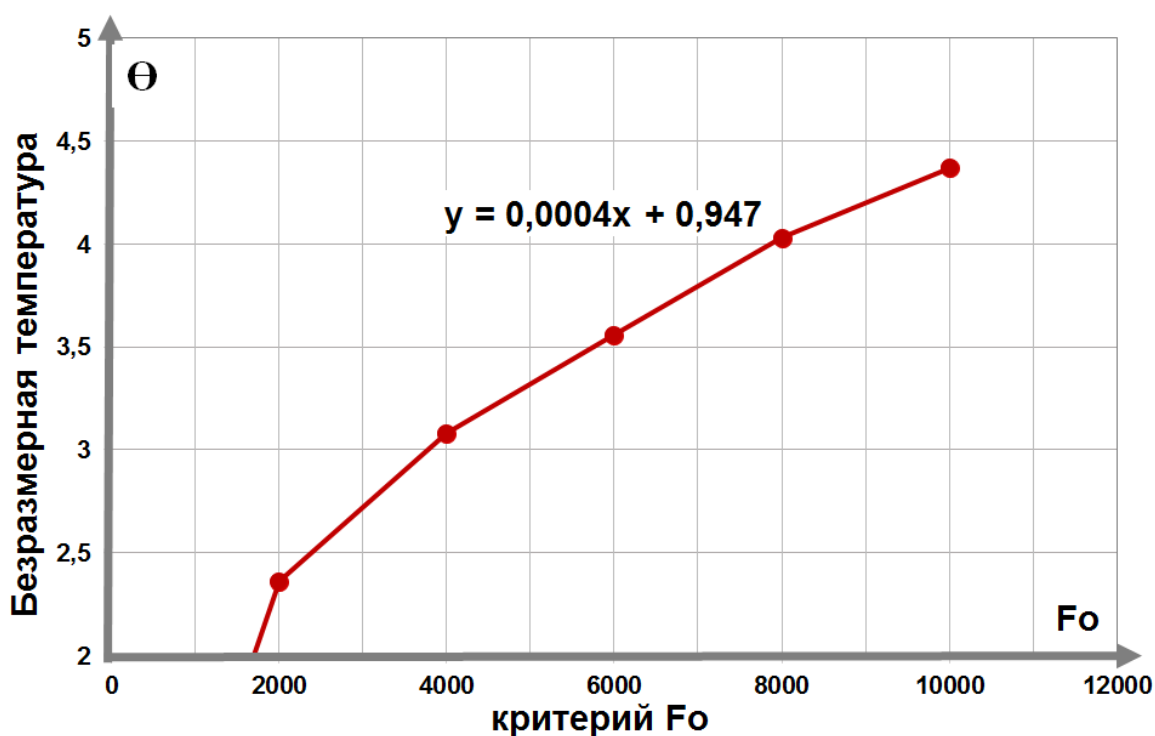


Рис. 6. Зависимость расчетных значений без регенерации с оцифровкой данных

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 расчету основного выражения для режима с сезонным чередованием теплоснабжения и кондиционирование [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  $Fo$  - критерий Фурье,  $\theta$  - безразмерная температура,  $Q$  - безразмерный активный тепловой поток,  $k_p$  - коэффициент регенерации.

В рамках исследовательской работы, получено критериальное уравнения, позволяющие учи-

тывать 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. [http://www.abok.ru/for\\_spec/articles.php?nid=3685](http://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=3685). (дата обращения 17.02.2016 г.)
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., 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. Серьогин А. А. Охлаждение оборотной воды сахарного завода с использованием грунтовых контуров тепловых насосов // Вестник АМУ. Серия. Техніка. 2014. № 2. С.122–132.
6. Денисова А. Е. Моделирование тепловых процессов в грунтовой тепловой трубе теплонасосной системы тепло- и хладоснабжения // Труды Одесского политехнического университета. 2006. №1(25). С. 65–69.
7. Мацевитый Ю. М. 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. Использование грунтовых теплообменников в системах теплоснабжения // Ползуновский вестник. 2006. №4. С.98–103.
9. Шишкин Н. Д. Оценка эффективности применения теплонасосных установок в системах теплоснабжения Астраханской области // Известия АЖКХ. 2000. № 4. С. 7.
10. Васьков Е. Т. Термодинамические основы тепловых насосов. СПб.: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. 2007. 127 с.
11. Сапрыкина Н. Ю. 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. 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. 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. 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.

© Яковлев П. В., Сапрыкина Н. Ю.

#### Ссылка для цитирования:

П. В. Яковлев, Н. Ю. Сапрыкина 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», 2019. № 1 (27). С. 27–33.

УДК 658.567.1

### НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЦЕОЛИТА ДЛЯ ДООЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ОТ ИОНОВ МЕТАЛЛОВ

**А. В. Москвичева\***, **Е. В. Москвичева\***, **А. В. Щербаков\***,  
**Л. В. Олефиренко\***, **О. П. Радченко\***, **Л. В. Боронина\*\***

*Волгоградский государственный технический университет*

*Астраханский государственный архитектурно-строительный университет*

Представлены результаты исследований доказывающие высокий эффект применения сорбционного метода для доочистки сточных вод от ионов тяжелых металлов с использованием опоки в качестве сорбента, так как это позволит получить допустимые концентрации указанных ионов в очищенной воде, установленные нормативами допустимого сброса ионов тяжелых металлов со стоками в городскую канализационную сеть или поверхностный водоем, относящийся к рыбохозяйственной категории.

**Ключевые слова:** доочистка сточных вод, сорбция, минеральные сорбенты, доочистка стоков от ионов тяжелых металлов.