

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОГО ИСТОЧНИКА ЭНЕРГИИ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ТЕПЛООБМЕНА В КАМЕРЕ ИСПАРИТЕЛЯ ТЕПЛОНАСОСНОЙ УСТАНОВКИ

Птухин И.Н.<sup>1</sup>, Максимов В.И.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия (634050, Томск, пр. Ленина 30), e-mail: elf@tpu.ru

Экспериментально исследована работа теплонасосной установки в условиях относительно низких (до 4 °С) температур при частичном обмерзании трубок испарителя и тепловой режим в его камере с источником низкопотенциальной энергии. Использовались хромель-алюмелевые термопары с диаметром спая 1 мм. Измерены распределения температуры воды по высоте резервуара и значения безразмерного коэффициента теплообмена между отрезком трубки испарителя и окружающей средой. Проанализированы условия работы теплонасосной установки при различных значениях температуры (от 4 до 14 °С) низкопотенциального источника тепла. Установлено влияние обмерзания трубок на эффективность теплообмена в камере испарителя ТНУ. Выявлено, что образование слоя льда на поверхности испарителя приводит к неравномерному распределению температуры по объему жидкости в камере и снижению эффективности работы теплонасосной установки.

Ключевые слова: теплонасосная установка, теплообменник, испаритель, теплоснабжение, низкопотенциальный источник энергии.

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF INFLUENCE THE TEMPERATURE OF LOW POTENTIAL ENERGY ON INTENSITY OF HEAT EXCHANGE IN EVAPORATOR OF HEAT PUMP SYSTEM

Ptuhin I.N.<sup>1</sup>, Maksimov V.I.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National research Tomsk polytechnic university, Tomsk, Russia (634050, Tomsk, av. Lenina, 30), e-mail: elf@tpu.ru

Experimentally investigated work heat pump system (HPS) under the conditions of relatively low temperatures (4 °C) with the partial freezing around the vaporizer tubes and thermal condition in its camera with the source of low-potential energy. Chromel-alumel thermocouples with joint diameter 1 mm. were used. The distributions of water temperature along the height of reservoir and value of the dimensionless coefficient between the section of vaporizer tube and environment are measured. The conditions for the work of heat pumping system with the different temperature values (from 4 to 14 °C) of low-potential heat source are analyzed. Established the influence of the freezing around the tubes on the effectiveness of heat exchange in the camera of vaporizer HPS. It is revealed, that the formation of ice layer on the surface of vaporizer leads to the uneven temperature distribution by liquid volume in the camera and reduction in the effectiveness in the work of heat pumping system.

Keywords: heat pump system, heat exchanger, evaporator, heat, low-grade energy source.

Рациональное использование энергетических ресурсов всегда представляет собой одну из актуальных задач [2,5,7] и для ее успешного решения необходимы новые энергосберегающие технологии и установки, использующие нетрадиционные источники энергии [6]. В последнее время все более перспективным становится применение теплонасосных установок (ТНУ) [1,3,4,8]. Большим преимуществом схем теплоснабжения на базе ТНУ как самостоятельных систем, так и комбинированных (в сочетании с другими технологиями использования возобновляемых источников энергии [6]), является их высокая экономическая эффективность. Тем не менее, несмотря на бесспорную перспективность применения тепловых насосов [7,8], их эксплуатация имеет ряд особенностей, которые могут затруднить использование ТНУ в условиях холодного климата [2]. Например, высокая

эффективность испарительных тепловых насосов обеспечивается за счёт изменения агрегатного состояния рабочего тела. Этот процесс протекает в относительно узком интервале температур. При выходе температуры за рамки оптимального диапазона, наиболее энергоэффективный процесс фазового перехода замедляется и коэффициент полезного действия компрессионной установки существенно снижается [2].

Основной проблемой применения ТНУ в условиях холодного климата, является достаточно низкая температура используемого источника энергии и, соответственно, обмерзание трубок испарителя, что приводит к ухудшению работы всего теплового насоса. Для повышения энергоэффективности таких систем в диапазоне низких ( $4 < t < 14$  °С) температур, необходимо изучение особенностей работы ТНУ в условиях кристаллизации воды на поверхности трубок теплообменника.

Целью работы является экспериментальное исследование влияния температуры низкопотенциального источника энергии и обмерзания испарителя на интенсивность теплообмена в камере теплонасосной установки.

#### **Схема экспериментальной установки и ее описание**

Экспериментальные исследования проводились с использованием установки (рис. 1), которая представляла собой парокompрессионный тепловой насос с вынесенным в отдельную камеру (размеры  $0,55 \times 0,20 \times 0,20$  м) теплообменником-испарителем. В качестве источника низкопотенциального тепла использовалась пресная вода с близкой к реальным условиям водоемов в регионах с холодным климатом температурой. Схема экспериментальной установки включает компрессор, дроссельный вентиль, два теплообменника (испаритель, конденсатор) и контрольно-измерительную аппаратуру (рис. 1). Сжатые в компрессоре пары фреона в перегретом состоянии, пройдя через открытый вентиль, поступают в первый теплообменник (конденсатор), в котором происходит охлаждение и конденсация с отдачей теплоты нагреваемой воде. Далее хладагент движется мимо смотрового окна через фильтр-осушитель и капиллярную трубку, после которой фреон расширяется и поступает во второй теплообменник (испаритель), где происходит его кипение, при этом тепло передается от воды к хладагенту, а затем последний возвращается в компрессор и процесс повторяется.

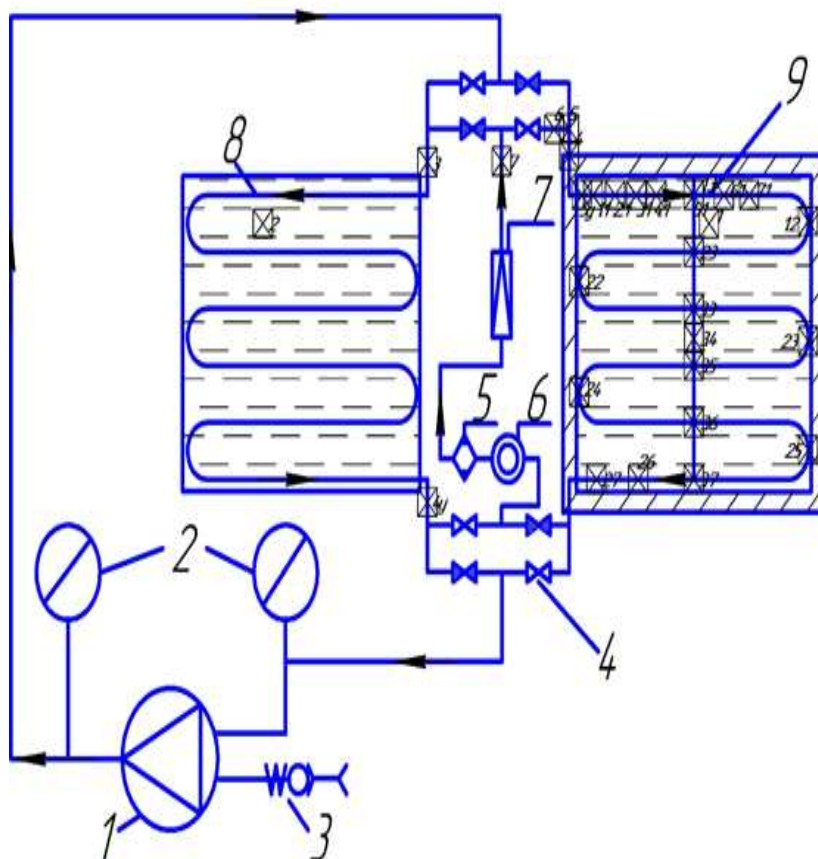


Рисунок 1 – Схема экспериментальной теплонасосной установки: 1 – компрессор, 2 – манометры, 3 – электрогенератор, 4 – задвижка, 5 – фильтр-осушитель, 6 – смотровое окно, 7 – трубка капиллярная, 8 – конденсатор, 9 – испаритель.

### Методика проведения экспериментальных исследований

Эксперимент проводился в условиях, обеспечивающих контроль численного значения всех основных факторов. Температура низкопотенциального источника в камере-испарителе варьировалась в диапазоне от 4 °С до 14 °С. Объем воды в резервуаре во всей серии экспериментов составлял 0,016 м<sup>3</sup>.

Измерение температуры осуществлялось на поверхностях трубок теплообменника (рис. 2) и в различных точках пространства внутри экспериментального блока (рис. 3), заполненного водой, с использованием градуированных хромель-алюмелевых термопар с диаметром спая 1 мм. Для определения отклонений результатов измерений каждый эксперимент повторялся несколько раз при фиксированных исходных данных и внешних условиях. Измерения проводились одновременно 4-мя блоками термопар по 8 штук в каждом.

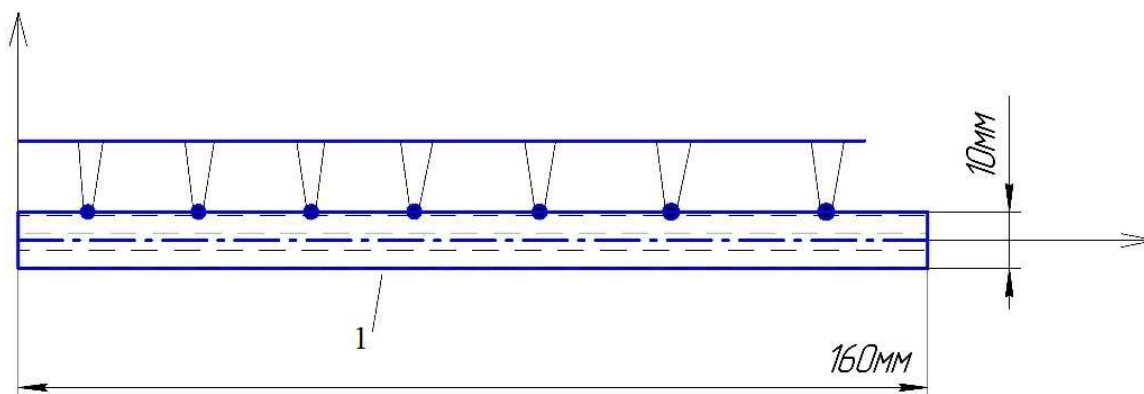


Рисунок 2. – Схема расположения термопар по длине трубки испарителя (1)

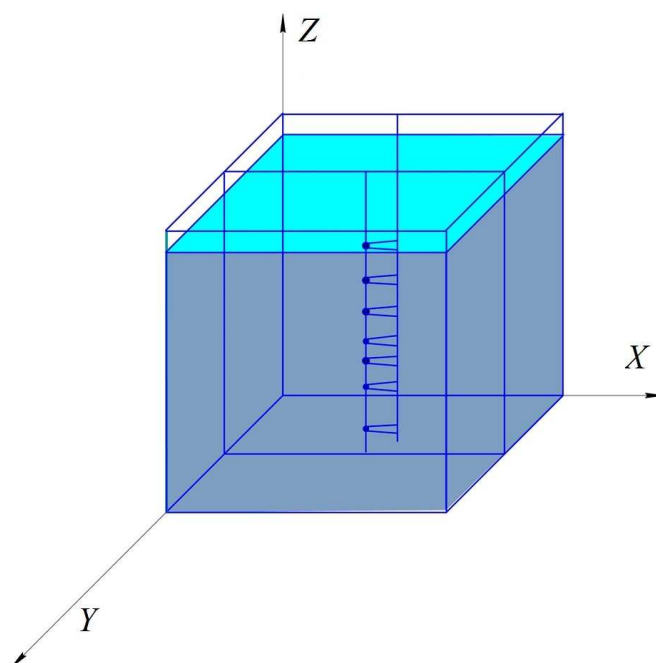


Рисунок 3 – Схема расположения термопар по высоте резервуара испарителя

Для связи аналого-цифрового преобразователя с персональным компьютером, применялся адаптер сети, обеспечивающий гальваническую развязку между приборами. В качестве средства обработки данных использовался программный комплекс LabVIEW. Значения температур регистрировались в реальном времени с сохранением полученных данных. Суммарная относительная погрешность определения значений температур не превышала 4% во всем диапазоне изменения параметров.

### Результаты экспериментальных исследований

На рис. 4, 5 представлены типичные значения локальных температур, измеренных в результате проведения экспериментальных исследований, в сечении  $X=0,1$  м и  $Y=0,1$  м при различной температуре низкопотенциального источника. Видно, что профили температуры соответствуют условиям генерации свободно-конвективных течений в рассматриваемом режиме.

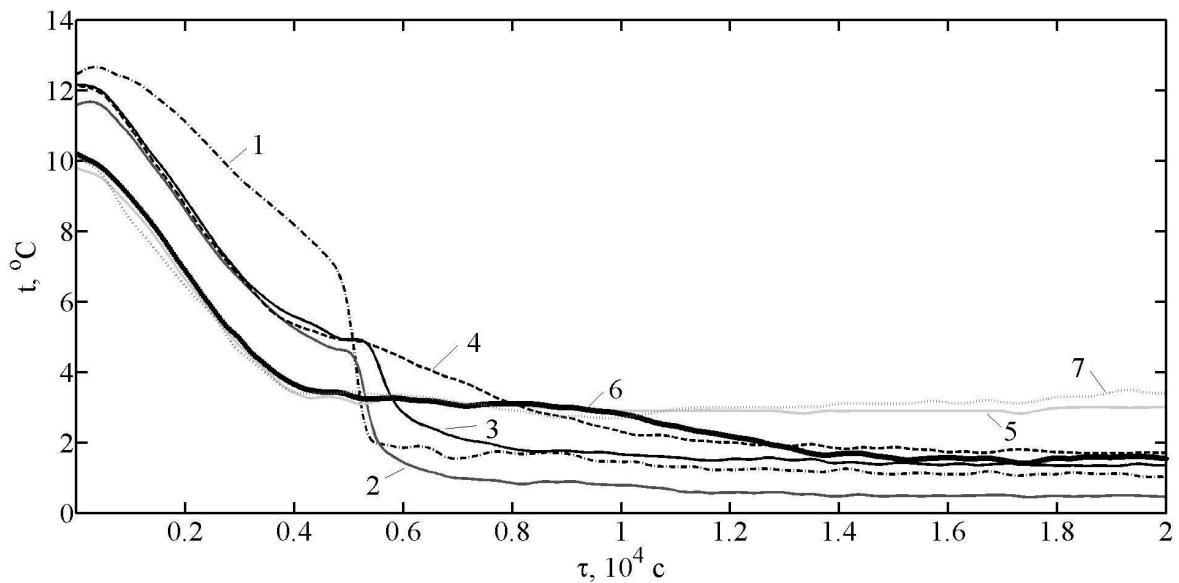


Рисунок 4 – Зависимость температуры воды от времени по высоте резервуара-испарителя при температуре низкопотенциального источника тепла 14<sup>0</sup>С (1..7 – номера термопар)

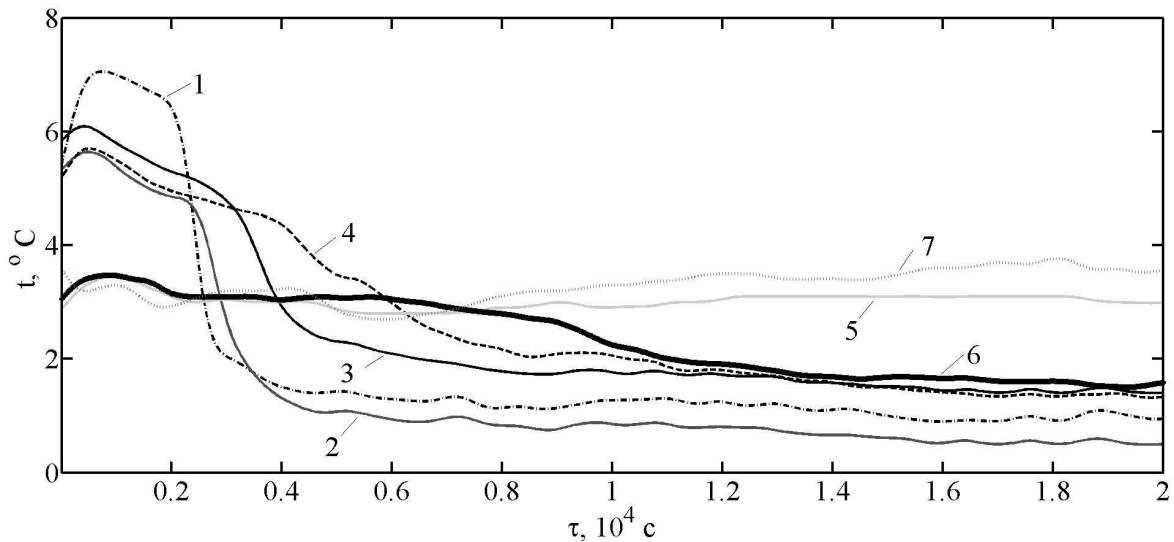


Рисунок 5 – Зависимость температуры воды от времени по высоте резервуара-испарителя при температуре низкопотенциального источника тепла 4<sup>0</sup>С (1..7 – номера термопар)

Интенсивные конвективные течения, перемешивающие массы воды в рассматриваемой области, вызваны снижением температур в начальный момент времени. При временах более 5000 сек (рис. 4) заметно резкое падение температуры на нескольких уровнях теплообменника (термопары 1-4). Это связано с тем, что в некоторых областях резервуара  $t \approx 4^{\circ}\text{C}$ . При этом значении  $t$  плотность воды становится максимальной и меняется структура конвективного течения. После этого происходит незначительное снижение температуры, обусловленное уменьшением интенсивности конвекции и началом кристаллизации воды на поверхности теплообменника.

Повышение температуры в верхней области резервуара (начальный участок испарителя) в случае низкопотенциального источника тепла при  $t=4^{\circ}\text{C}$  (рис. 5), связано с запуском установки и выходом её на стационарный режим (до 2500 сек) при температуре окружающей среды. В результате происходит резкое понижение температуры в верхней области (термопары 1 и 2) и медленное ее снижение в средней части водоема (термопары 3 и 4) вплоть до начала кристаллизации воды на поверхности трубки теплообменника. Показания термопар (5-7) остаются неизменными в течении всего времени проведения эксперимента. Такое распределение температур в исследуемом объёме показывает, что при  $t=4^{\circ}\text{C}$  интенсивность конвективных течений и теплообмен существенно снижаются в рассматриваемой области, начинается более быстрое обмерзание теплообменника со стороны низкопотенциального источника.

На рис. 6-7 приведено изменение среднего числа Нуссельта по длине трубки испарителя при различных температурах низкопотенциального источника тепла.

На начальном этапе работы установки (1200 с) среднее число Нуссельта достигает своего максимального значения (рис. 6). Затем происходит резкий спад, который продолжается вплоть до прекращения частичного обмерзания испарителя (один час работы установки), после чего  $Nu_{\text{ср}}$  несущественно снижается в течение пяти часов.

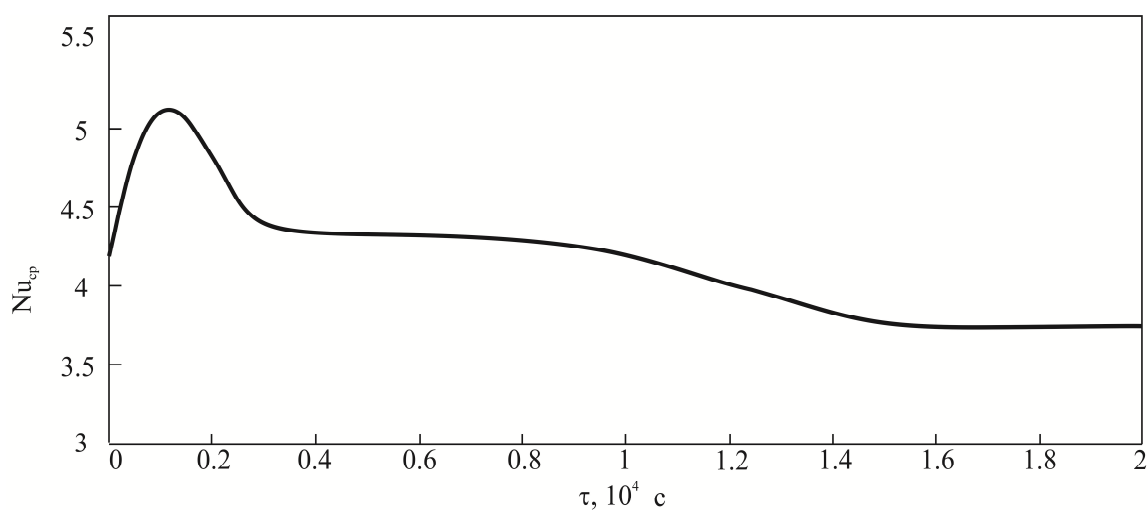


Рисунок 6 – Зависимость  $Nu_{\text{ср}}$  от времени на поверхности испарителя при температуре низкопотенциального источника тепла  $4^{\circ}\text{C}$

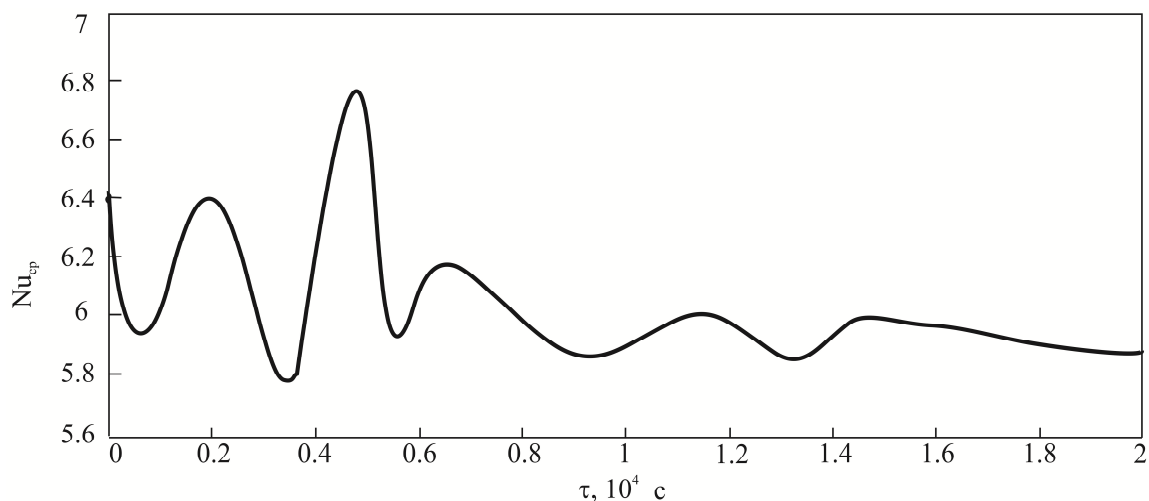


Рисунок 7 – Зависимость  $Nu_{ср}$  от времени на поверхности испарителя при температуре низкопотенциального источника тепла  $14^{\circ}\text{C}$

По сравнению с более низкой температурой источника энергии (рис. 6) при небольшом обмерзании (рис. 7) безразмерный коэффициент теплообмена характеризуется немонотонными изменениями во времени. Наибольшая величина  $Nu_{ср}$  соответствует 1,5 часам работы ТНУ.

После прекращения частичного обмерзания испарителя ( $\tau=7200$  с) численное значение числа Нуссельта снижается в течение оставшихся четырех часов (рис. 7). Это обусловлено тем, что при более высокой температуре воды в резервуаре (рис. 7) обмерзание происходит существенно медленнее, чем при низкой (рис. 6), следовательно, установка работает с максимальным коэффициентом теплоотдачи низкопотенциального источника энергии к стенке испарителя значительно больший период времени.

### Заключение

Результаты экспериментальных исследований иллюстрируют процесс кристаллизации воды на поверхности теплообменника. Кристаллизация оказывает существенное воздействие на тепловой режим камеры испарителя теплового насоса. Образование слоя льда на поверхности испарителя приводит к неравномерному распределению температуры по объему жидкости в камере. Кроме того, анализ полученных данных позволяет сделать вывод, что даже при частичном обмерзании трубок испарителя ТНУ происходит существенное ухудшение процесса теплопередачи между хладоносителем, протекающим в трубках испарителя, и омывающим их теплоносителем. Это приводит к смещению фронта испарения хладоносителя по длине трубки теплообменника, ухудшению работы камеры испарителя и снижению эффективности работы всей теплонасосной установки в целом.

*Работа выполнена в рамках НИР Госзадания «Наука» (Шифр Федеральной целевой программы 2.1321.2014).*

### Список литературы

1. Везиршвили О. Ш., Меладзе Н. В. Энергосберегающие теплонасосные системы тепло- и хладоснабжения. М.: Издательство Московского университета, 1994. – 106 с.
2. Гаджиев А.Г., Курбанов М.К., Суетнов В.В. Проблемы геотермальной энергетики. – М.: Недра, 1996. – 132 с.
3. Горшков В. Г. Тепловые насосы. Аналитический обзор // Справочник промышленного оборудования. – 2004. – № 2. – С. 47-80.
4. Елистратов С. Л. Комплексное исследование эффективности тепловых насосов: дис. док. техн. наук – Новосибирск, 2010. – 383 с.
5. Закиров Д.Г. Энергосбережение. – Пермь: Книга, 2000. – 308 с.
6. Лантух Н.М., Щербатый В.С., Агеева Г.М. Комбинированная солнечно-электрическая система теплоснабжения // С.О.К. – 2006. – № 8.
7. Мазур В.А. Тепловые насосы – перспективная стратегия энергосбережения // Энергосберегающие технологии и автоматика. – 2001. – № 1-2 (13-14). – С. 60-63.
8. Перспективы применения ТН при утилизации теплоты городских стоков / Слесаренко В.В., Князев В. В., Вагнер В. В., Слесаренко И. В. // Энергосбережение и водоподготовка. – 2012. – № 3. – С. 28-33.

### Рецензенты:

Борисов Б.В., д.ф.-м.н., профессор каф. Теоретической и промышленной теплотехники НИ ТПУ, г. Томск;

Кузнецов Г.В., д.ф.-м.н., проф., зав. каф. Теоретической и промышленной теплотехники НИ ТПУ, г. Томск.