

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-6-36-44

¹Орлов П.А., ^{1,*}Ильина Т.Н., ²Орлов К.П.¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова²Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

*E-mail: ilina50@rambler.ru

ВОЗДЕЙСТВИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ НА ОБЛЕДЕНЕНИЕ ИСПАРИТЕЛЕЙ ВОЗДУШНОГО ТЕПЛООВОГО НАСОСА

Аннотация. Применение тепловых насосов в системах создания микроклимата является актуальной задачей теплоснабжения. Однако распространение воздушных тепловых насосов в странах с холодным зимним периодом ограничивается в связи с проблемой обледенения наружных блоков и снижением эффективности их работы. Рассмотрены существующие методы борьбы с наледью, а также их эффективность с учетом затрат электроэнергии и проблемой утилизации конденсата. Показана возможность удаления наледи с испарителей воздушных тепловых насосов применением метода высокочастотных механических колебаний. Спроектировано лабораторное оборудование для экспериментальных исследований высокочастотных колебаний в конструкциях испарителей, изготовленных промышленным методом, позволяющее оценить различные способы крепления пьезокерамических излучателей к поверхности теплообменника. Установлена низкая эффективность болтовых соединений излучателей с поверхностью теплообменника. Наиболее рационально монолитное исполнение. Проведенные исследования испарителей воздушных тепловых насосов с различными типами теплоносителя показали неэффективность акустических методов удаления наледи для жидких теплоносителей. Даны рекомендации по подбору материала теплообменника для повышения эффективности разрушения льда с поверхности испарителей. По совокупности акустических свойств и теплопроводности материалов, применяемых в конструкции испарителей, наиболее эффективным является дюралюминий. Выявлены пути повышения степени очистки испарителей от наледи, даны рекомендации для последующих исследований применения механических колебаний для борьбы с обморожением теплообменников в воздушных тепловых насосах в условиях работы при низких температурах окружающего воздуха.

Ключевые слова: испаритель, воздушный тепловой насос, обморожение, ультразвук, пьезокерамические излучатели.

Введение. Поддержание комфортной температуры внутри зданий является одной из самых затратных статей коммунальных расходов в России и за рубежом. Помимо этого, Россия и другие развитые страны ужесточают требования к предельно допустимым выбросам CO₂ в атмосферный воздух (Постановление Правительства РФ от 9 декабря 2020 г. № 2055 О предельно допустимых выбросах, временно разрешенных, предельно допустимых нормативах вредных физических воздействий на атмосферный воздух и разрешениях на выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух). Поэтому в настоящее время большое внимание уделяется энергосберегающим мероприятиям в строительстве. Как показали исследования [1–5], наиболее эффективно снижает расходы на отопление жилых, общественных и производственных зданий следующие мероприятия: устройство рекуперации воздуха, снижение теплотерь через наружные ограждающие конструкции, повышение энергоэффективности отопительных приборов, переход на низкотемпературные системы обогрева. Тепловые насосы являются наиболее экономичными источниками для отопления, т. к. для производства тепла в количестве 1 кВт·ч тепловые

насосы потребляют 0,2–0,4 кВт·ч электроэнергии, используя низкопотенциальные источники энергии, такие как грунт, вода, воздух по сравнению с энергозатратами для других теплоносителей [6, 7]. Наибольшее распространение в странах с холодным климатом получили земляные тепловые насосы, несмотря на их высокую стоимость и потребности в производстве земляных работ для прокладки коллектора [8]. В России в районах с вечной мерзлотой устройство земляных насосов осуществить крайне сложно. Воздушные тепловые насосы так же используются для поддержания температурно-влажностного режима внутри помещений и работают по тем же термодинамическим циклам. При работе в режиме обогрева наружный блок, включающий в себя теплообменник, подвергается обморожению [9]. Слой льда и инея, возникающий на рабочих поверхностях, снижает теплопередающую способность испарителя.

Материалы и методы. Существующие методы борьбы с этим нежелательным явлением в конечном счете сводятся к прогреву испарителя до положительных температур (примерно +4 °С), кроме того, чтобы осуществить прогрев испарителя требуется остановка работы теплового

насоса. В этот период времени отопление помещений прекращается. Прогрев испарителя требует затрат электроэнергии не только на оттаивание испарителя, но и на дальнейшую утилизацию конденсата, включая поддон наружного блока, и конденсатоотводящих патрубков. Расходы в совокупности доходят до 1500 Вт за один час работы теплового насоса, что заметно снижает экономическую эффективность применения воздушных тепловых насосов и их конкурентоспособность перед более дорогими и не экологичными геотермальными теплонасосами [5]. Проблема удаления наледи, возникающая в наружных блоках воздушных тепловых насосов, является наиболее актуальной в странах с холодным зимним периодом, к которым так же относится большая часть России. Анализ существующих в России и за рубежом систем борьбы с обморожением испарителей не выявил энергоэффективных методов. В качестве эксперимента был опробован метод ультразвукового воздействия на теплообменник с целью удаления льда с его рабочих поверхностей [10].

Основная часть. Испаритель в воздушных тепловых насосах – это устройство, в котором происходит изменение агрегатного состояния хладагента, жидкий хладагент превращается в газ при кипении, хладагент поглощает тепло из окружающей среды для дальнейшего использования в системе отопления здания. Испаритель представляет собой герметичный контур из материала, обеспечивающего высокий коэффициент теплопередачи. Испаритель рассчитывается по формуле:

$$Q=K \cdot A \cdot \Delta t,$$

где Q – тепловой поток (Вт); K – коэффициент теплопередачи ($\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{°C}$); A – общая площадь теплообменника (испарителя) (м^2); Δt – разница температур теплоносителей.

Из формулы следует, что при определенном значении потока тепла, при увеличении площади A , происходит уменьшению разницы температур теплоносителей Δt , а при снижении теплового потока Q происходит снижение Δt . Принимая во внимание, что испарение хладагента происходит при давлении ниже температуры фазового перехода, происходит снижение температуры насыщения. Разница теплосодержания между точкой входа в испаритель и точкой выхода из испарителя создает холодильный эффект. В случае с испарителями передается холодильному агенту больше тепла, чем требуется для кипения (условие вызвать перегрев хладагента), как правило, он должен превышать нескольких градусов, обычно это 5–8 °С. Воздушные испарители в большинстве случаев выполняются из медных трубок с алюминиевыми пластинами. Диаметры труб зависят от рабочего давления, в последнее время преимущественно применяют малые диаметры труб. Пластины в большинстве случаев выполнены из алюминия, профиль гладкий или с изгибами перпендикулярными потоку воздуха, также выпускают пластины с повышенным показателем турбулентности [11]. В работе теплообменника в режиме оттаивания важную роль играют его акустические свойства (скорость распространения продольных, поперечных и поверхностных волн, м/с). Параметры материалов, наиболее распространённых в конструкциях испарителей, представлены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики материалов испарителей

Металл	Плотность, г/см ³	Продольные волны, м/с	Поперечные волны, м/с	Поверхностные волны, м/с	Теплопроводность, Вт/(м ² ·°C)
Алюминий	2,7	6320	3130	2980	175
Медь	8,9	4660	2260	2160	384
Олово	7,29	3320	1670	1560	65

В эксперименте были использованы испарители промышленного исполнения из профилированных алюминиевых труб с закрепленными на них охлаждающими алюминиевыми пластинами, но ввиду особенности распространения ультразвуковых колебаний в местах соединения пластин и труб возникнут препятствия для их прохождения [11]. Поэтому был спроектирован испаритель из медных труб с паянными соединениями всех теплопроводящих элементов конструкции. В качестве источника механических колебаний были применены пьезоэлектрические излу-

чатели [12], работа которых основана на обратном пьезоэлектрическом эффекте [13]. При воздействии электрического напряжения, подведенного к пьезоэлектрическому кристаллу, происходит линейное изменение его размеров, то есть механическая деформация. В эксперименте были применены пьезокерамические ультразвуковые преобразователи суммарной мощностью 900 Вт. Для передачи механических колебаний в эксперименте с промышленным алюминиевым испарителем был использован алюминиевый профиль, соединенный при помощи припоя к коллектору (рис. 1).



Рис. 1. Метод крепления излучателя

Во втором варианте в медном паянном теплообменнике акустическая связь с испарителем обеспечивается за счет болтовых соединений, плотно притянутых к пьезоэлектрическим излучателям через распределитель колебаний, кото-

рый представляет собой металлическую пластину с отверстиями для крепления пьезокерамических излучателей и резьбовыми соединениями для крепления с испарителем через припаянные к нему отверстия с резьбой (рис. 2).

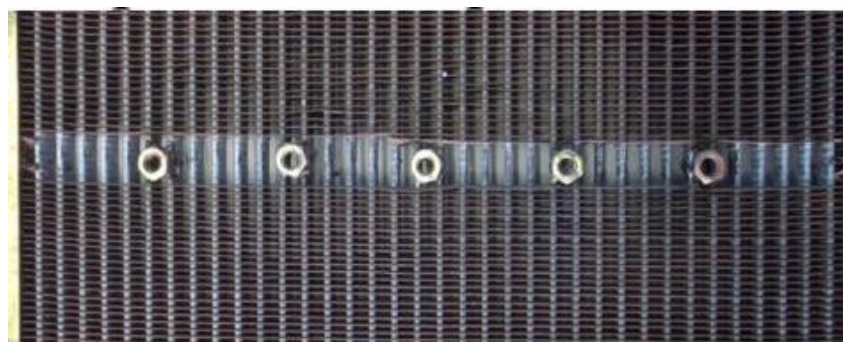


Рис. 2. Места крепления для пьезокерамических излучателей

В качестве источника механических колебаний был использован генератор электрических колебаний. Он выполняет следующие задачи: преобразование напряжения бытовой сети (220 V, 50 Гц) в напряжение, требуемое для пьезоэлектрических излучателей, поддержание частоты выходного напряжения, управление амплитудой

механических колебаний. Амплитуда колебаний пропорциональна приложенному напряжению и силе тока воздействия, а частота колебаний обеспечивается частотой переменного напряжения, приходящего на контакты пьезокерамического генератора механических колебаний. Общая схема подключения изображена на рис. 3.

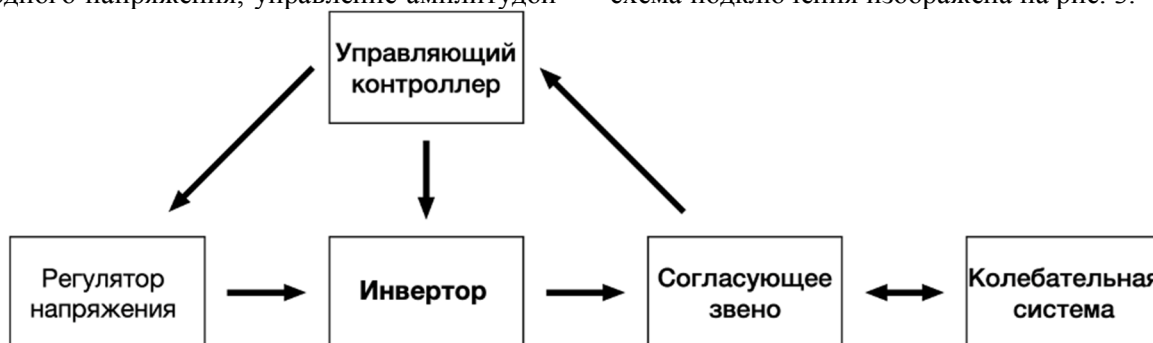


Рис. 3. Общая структурная схема ультразвукового генератора

Также для проведения экспериментов была изготовлена холодильная камера. Ее внутренние поверхности стен покрыты влагозащищенным

составом, в качестве теплоизоляционного материала был использован пеноплекс, подсветка

внутреннего пространства осуществлена при помощи четырех светодиодных светильников, расположенных по периметру квадратного корпуса

камеры. Для наблюдения за прохождением экспериментов в верхней части холодильной камеры смонтировано смотровое окно (рис.4).

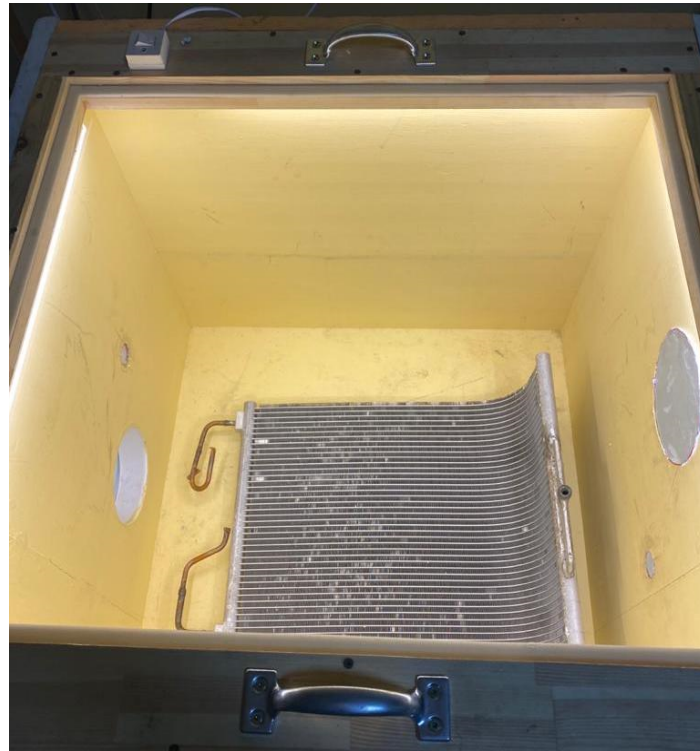


Рис. 4. Холодильная камера

Для инициирования процесса обморожения была спроектирована и изготовлена система

охлаждения азотом методом вторичного потока в теплообменнике, представленная на рис. 5.

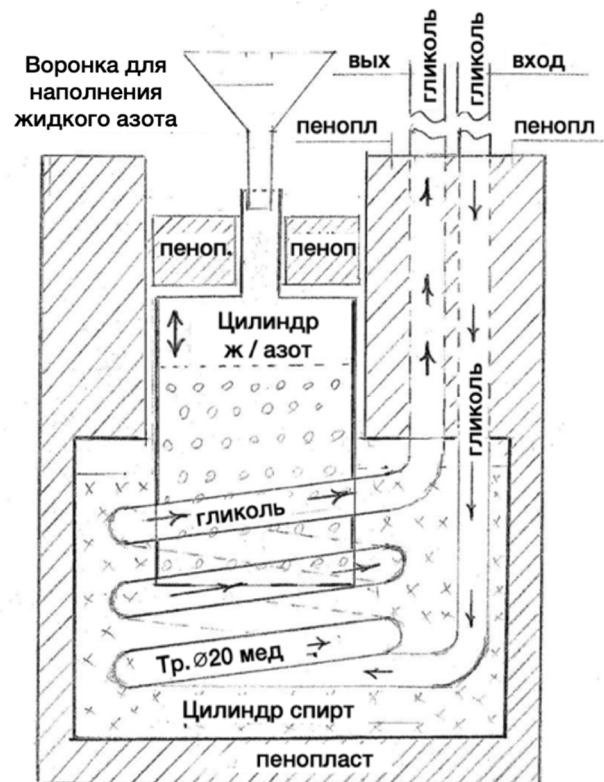


Рис. 5. Схема работы лабораторного генератора холода

Жидкий азот, находящийся в резервуаре, охлаждает воздух в медных трубках, помещенных в раствор пропиленгликоля, также система охлаждения обладает способностью охлаждать гликоль [14]. Для этого требуется заменить насос газа жидкостным насосом и произвести заполне-

ние теплообменника и системы охлаждения пропиленгликолем. Регулировка температуры испарителя происходит путем изменения положения цилиндра с жидким азотом относительно цилиндра со спиртом. Схема подключения системы искусственного обморожения показана на рис. 6.

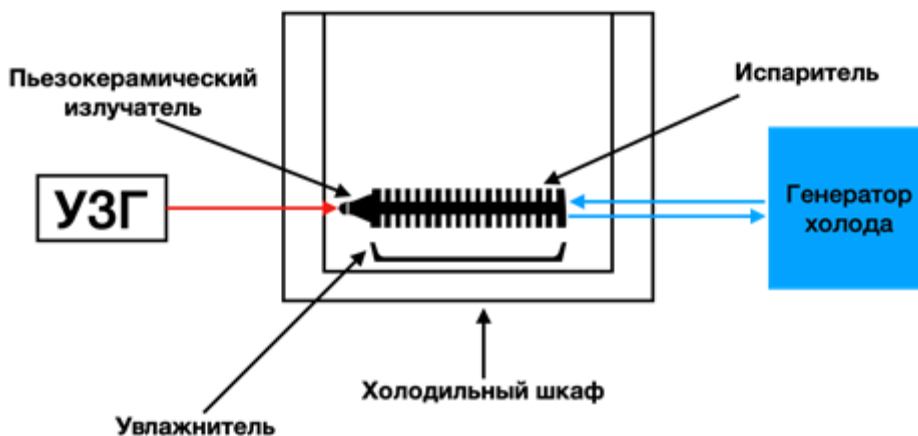


Рис. 6. Схема подключения лабораторного оборудования

Эксперименты проводились в два этапа: первый этап - апробация системы удаления льда, где теплоносителем является газообразный азот; второй этап - апробация системы с жидкостным теплоносителем (пропиленгликоль). Для создания влажности в холодильной камере поместили емкость, имеющую большую площадь поверхности, и залили в нее доведенную до кипения воду.

Этап первый: алюминиевый теплообменник был заполнен пропиленгликолем при температуре $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ и подвергнут ультразвуковому воздействию на различных частотах 20 кГц – 38 кГц . Результаты эксперимента показали, что лед с поверхности удалить не получилось. При испытании теплообменника, изготовленного из меди, лед также остался на поверхности теплопередающих элементов. Это подтверждает неэффективность использования пьезометрических излучателей для удаления льда, а также других отложений с поверхности теплообменника при использовании жидких теплоносителей.

Этап второй: алюминиевый теплообменник промышленного изготовления был подвергнут обморожению до $-37\text{ }^{\circ}\text{C}$, в результате на его поверхности возник конденсат в виде слоя инея, было применено ультразвуковое воздействие от 21 кГц до 40 кГц [14–16]. Время воздействия 1–3 с. Лед удалился уже через 1 секунду. Дальнейшее воздействие не дало каких-либо заметных изменений в степени обморожения. Иней удалился с изогнутой поверхности испарителя по направлению крепления алюминиевой пластины. Вероятно, в процессе изготовления теплообменника с технологией придания Г - образной формы, в местах примыкания теплоъемных пластин с профилированными патрубками испарителя возникло более плотное соединение, что способствовало наилучшей передаче механических колебаний (рис. 7, а).

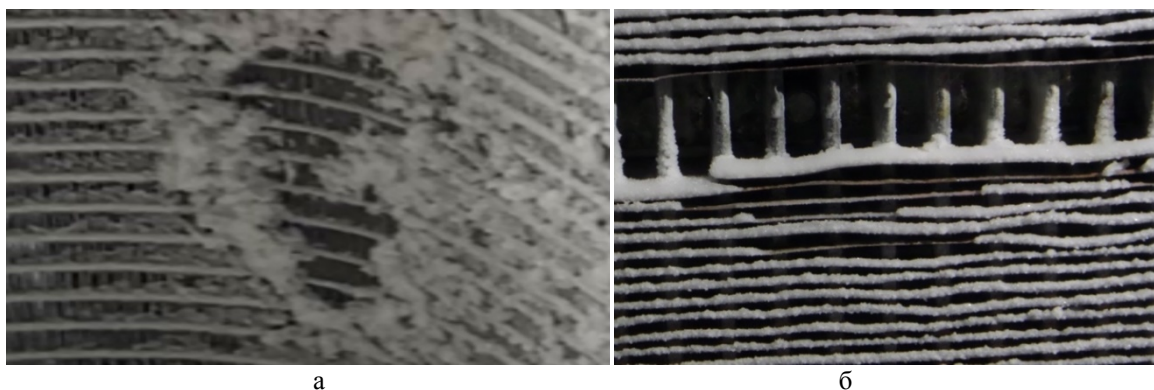


Рис. 7. Влияние формы пластин на удаление льда:
а – изогнутые пластины, б – горизонтальные

Испытания теплообменника собственной конструкции производились по той же схеме, что и промышленного радиатора. Исследования показали, что в процессе воздействия механических колебаний была нарушена целостность части паянных соединений, что свидетельствует о недостаточной надежности рассмотренного способа крепления излучателей. Это объясняется возникновением термических деформаций в месте припоя излучателя на границе материалов с различными теплофизическими и механическими свойствами. Установлена также низкая эффективность болтовых соединений за счет недостаточного контакта волновода с поверхностью теплообменника, что при эксплуатации также усугубляется воздействием механических колебаний.

Как видно из рис. 7, механические колебания привели к частичному удалению льда с металлических поверхностей, подвергнутых обморожению. Исследования показали также, что следует обратить внимание на форму пластин теплообменника, что влияет на способ передачи колебаний и эффективность снятия наледи, возможно и других отложений, с поверхности пластин.

Следует отметить также необходимость продолжения исследований по выбору более эффективных видов излучателей, способов их соединения с поверхностью испарителей, а также материала теплообменника с целью удаления не только наледи, но и других отложений в виде накипи, что является актуальной задачей в системах теплоснабжения инженерных сетей.

Выводы. Исследования показали, что под действием механических колебаний на теплообменник возможно удаление льда с его поверхности. Одной из проблем, выявленной в ходе экспериментов, явилась слабая акустическая связь между теплопередающими элементами конструкции. Решение этой проблемы обеспечит конструкция радиатора, выполненная в монолитном исполнении с излучателем без паянных, сварных и болтовых соединений.

Время воздействия колебаний не имеет принципиального значения, для удаления льда достаточно нескольких секунд. Пьезокерамические излучатели не могут обеспечить большой амплитуды колебаний, необходим подбор другого вида излучателей, а именно излучателей, основанных на эффекте магнитоstriction, где материалом для источника ультразвуковых колебаний являются магнитомягкие прецизионные сплавы, имеющие в своем составе железо, никель, кобальт.

Для изготовления теплообменника по совокупности акустических и теплопроводящих свойств наиболее подходящими материалами являются дюралюминий или алюминий. Метод

удаления льда воздействием на теплообменник высокочастотными колебаниями, где теплоносителем является жидкость, бесперспективен по причине затухания ультразвуковых волн в вязкой среде.

Исследования в области борьбы с обледенением имеют большие перспективы для развития воздушных тепловых насосов, повышения их производительности и расширения диапазона рабочей температуры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сериков С.В., Ильина Т.Н. Утилизация тепла уходящих газов котельной установки в системе воздушного отопления // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2013. №4. С. 53–55.
2. Ильина Т.Н., Бельмаз Д.Н. Анализ и способы утилизации вторичных энергоресурсов нефтеперерабатывающего предприятия // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2014. №3. С. 170–173.
3. Ильина Т.Н., Мухамедов Р.Ю., Веревкин О.В. Перспективы использования тепловых насосов в системах отопления малоэтажных жилых домов Белгородской области // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2009. №3. С. 142–146.
4. Минко В.А., Ильина Т.Н., Потапова О.Н. Анализ способов утилизации тепла от технологического оборудования в системах создания микроклимата производственных цехах молочных комбинатов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2009. №4. С. 109–112.
5. Орлов П.А., Уваров В.А., Ильина Т.Н., Орлова В.А., Орлов К.П., Орлов С.П. Влияние установки и использования геотермальных тепловых насосов на экологию: Межвузовский международный конгресс. Высшая школа: научные исследования, Москва, 10 декабря 2020. Москва: Издательство Инфинити. 2020. Т.1. С. 136–147.
6. Копп О.А., Семенов Н.М. Геотермальное отопление. Тепловые насосы // Научно-методический электронный журнал «Концепт». 2017. Т. 1. С. 84–88. URL: <http://e-koncept.ru/2017/571018.htm>.
7. Васильев Г.П. Теплохладоснабжение зданий и сооружений с использованием низкопотенциальной тепловой энергии поверхностных слоёв Земли: Монография. Издательский дом «Граница». М.: Красная звезда. 2006. 220 с.
8. Sayegh M.A. [et al.] Heat pump placement, connection and operational modes in European district heating // Energy and Buildings. (2018). Vol. 166. Pp 122–144.
9. Yigiang J., Huiying F.U., Yang Yao, Ling Y., Qiang G. Experimental study on concentration change of spray solution used for a novel non-frosting air source heat pump system // Energy and Buildings. 2014. Vol. 68. Pp. 707–712.

10. Патент на изобретение 2724661, Российская Федерация. Способ защиты от обледенения холодильных и вентиляционных установок. Орлов К. П.; заявка от 19.06.2019, № 2019119135.

11. Бригантини Антонио. Руководство по техническому обслуживанию холодильных установок и установок для кондиционирования воздуха. М: Евроклимат. 2004. 312 с. (Библиотека климатотехники).

12. Tressler J.F. Piezoelectric Transducer Designs for Sonar Applications. In: Safari A., Akdoğan E.K. (eds) Piezoelectric and Acoustic Materials for Transducer Applications. Springer, Boston, MA. 2008. https://doi.org/10.1007/978-0-387-76540-2_11

13. Бойцов А.А. Бойков В.И. Быстров С.В. Григорьев В.В. Караев П.В. Исполнительные

устройства и системы для микроперемещений. Университет ИТМО. Санкт-Петербург, 2017, 8 с.

14. Галкин М.Л. Пропиленгликоль как основной компонент хладоносителя // Холодильная техника. 2009. №9.

15. Хмелев В.Н. Проектирование и моделирование ультразвуковых колебательных систем // Измерение, автоматизация и моделирование в промышленных и научных исследованиях: межвузовский сборник / под ред. Г.В. Леонова. Бийск, 2003. С. 211–216.

16. Физические свойства и особенности распространения ультразвука. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://web.archive.org/web/20060518012131/http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/114/006.htm>

Информация об авторах

Орлов Павел Анатольевич, соискатель кафедры теплогоснабжения и вентиляции. Email: orlov Pavel67@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Ильина Татьяна Николаевна, доктор технических наук, профессор кафедры теплогоснабжения и вентиляции. Email: ilina50@rambler.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Орлов Кирилл Павлович, студент. Email: 2orlovkirill3@gmail.com. Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС». Россия, 119049 г. Москва, Ленинский пр. 4

Поступила 11.03.2020 г.

© Орлов П.А., Ильина Т.Н., Орлов К.П., 2021

¹Orlov P.A., ^{1,*}Il'ina T.N., ²Orlov K.P.

¹Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

²National Research Technological University "MISiS"

* E-mail: ilina50@rambler.ru

EFFECTS OF MECHANICAL VIBRATIONS ON ICE FORMATION ON EVAPORATOR OF AIR HEAT PUMP

Abstract. The analysis of the reasons for the insignificant spread of air heat pumps in countries with a cold winter period is carried out. Problems arising in the heat exchanger of the outdoor unit of the heat pump during operation in heating mode are indicated. The existing methods of anti-icing of outdoor units are considered, and their effectiveness is demonstrated, taking into account the cost of electricity and the problem of utilizing condensate. The possibility of removing ice from evaporators of air heat pumps using the method of high-frequency mechanical vibrations has been investigated. Laboratory equipment has been designed and tested for experimental research of high-frequency oscillations in the structures of evaporators manufactured by an industrial method. The possibility of their use in heat pumps, where the fight against frostbite is carried out by the method of mechanical vibrations, is considered. Investigations of evaporators of air heat pumps with different types of coolant for removing ice by means of mechanical vibrations on the surface of the heat exchanger have been carried out. Methods of fastening piezoceramic emitters to evaporators of various designs are considered. A comparative analysis of the materials used in the design of evaporators, a comparison of their acoustic properties and thermal conductivity, and recommendations on the selection of material for further research to improve the efficiency of ice destruction from the surface of evaporators are given. Ways of increasing the degree of cleaning of evaporators from ice are identified, recommendations are given for further research on the use of mechanical vibrations to combat frostbite of heat exchangers in air heat pumps under conditions of operation at low ambient temperatures.

Keywords: evaporator, air heat pump, frostbite, ultrasound, piezoceramic emitters.

REFERENCES

1. Serikov S.V., Il'ina T.N. Disposal heat of the outgoing gases of the boiler installation in the air heating system [Utilizatsiya tepla ukhodyashchikh gazov kotelnoy ustanovki v sistemt vozdushnogo otopeniya]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2013. No. 4. Pp. 53–55. (rus)
2. Il'ina T.N., Belmaz D.N. Analysis and methods of utilization of secondary energy resources of an oilrefinery [Analiz i sposoby utilizatsii vtorichnykh energoresursov nftfepererabatyvayvayshchhego predpriyatiya]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2014. No. 4. Pp. 170–173. (rus)
3. Il'ina T.N., Mukhamedov R.Yu., Verevkin O.V. Prospects for the use of heat pumps in heating systems of low-rise residential buildings in the Belgorod region [Perspektivy ispolzovaniya teplovykh nasosov v sistmakh otopeniya maloetaznykh zhi-lykh domov Btgorodskoy oblasti]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2009. No. 3. Pp. 142–146. (rus)
4. Minko V.A., Il'ina T.N., Potapova O.N. Analysis of methods of heat recovery from technological equipment in systems for creating a microclimate in production shops of dairy plants. [Analiz sposobov utilizatsii tepla ot tekhnologicheskogo oborudovaniya v sistemakh sozdaniya mikroklimata proizvodstvennykh molochnykh kombinatov]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2009. No. 4. Pp. 109–112 (rus)
5. Orlov P.A., Uvarov V.A., Il'ina T.N., Orlova V.A., Orlov K.P., Orlov S.P. The impact of the installation and use of geothermal heat pumps on the environment: Interuniversity [Vlianiye ustanovki i ispolzovaniya geotermalnykh teplonasosov na ekologiyu]. International Congress. Graduate School: Research, (Moscow December 10, 2020) M.: Infinity Publishing House. 2020. Vol. 1. Pp. 136–147. (rus)
6. Kopp O.A., Semenenko N.M. Geothermal heating. Heat pumps [Geotermalnoye otopeniye. Teplovyye nasosy]. Scientific-methodical electronic journal "Concept". 2017. No. 1. Pp. 84–88. URL: <http://e-koncept.ru/2017/571018.htm>. (rus)
7. Vasiliev G.P. Heat supply of buildings and structures with the use of low-potential thermal energy of the surface layers of the Earth [Teplogaz-osnabzheniye zdaniy i sooruzheniya s ispolzovani- yem nizkopotentsialnoy teplovooy energii poverkhnostnykh sloyv zemli]. Monograph. Publishing House "Border". M.: Krasnaya Zvezda. 2006. 220 p. (rus)
8. Sayegh M.A. [et al.] Heat pump placement, connection and operational modes in Europeandistrict heating". Energy and Buildings. 2018. Vol. 166. Pp. 122–144.
9. Yigiang J., Huiying F.U., Yang Y., Ling Y., Qiang G. Experimental study on concentration change of spray solution used for a novel non -frosting air source heat pump system. Energy and Buildings. 2014. Vol. 68. Pp. 707–712.
10. Patent for invention 2724661, Russian Federation. Anti-icing method for refrigeration andventilation units. Orlov K.P. [Sposob zashity ot obledentyiyt kholodilnykh i ventilyftsiyonnykh ustanovok]. Zayvka 19.06.2019. No. 2019119135. (rus)
11. Brigantini Antonio. Refrigeration and Air Conditioning Maintenance Manua [Rukovodstvo po tekhnicheskomu obsluzhivaniyu kholodilnykh ustanovor dlya konditsianirovaniyu vozdukh]. - M: Euroclimate. 2004.312 p. (Library of climate technology). (rus)
12. Tressler J.F. Piezoelectric Transducer Designs for Sonar Applications. In: Safari A., Akdoğan E.K. (eds) Piezoelectric and Acoustic Materials for Transducer Applications. Springer, Boston, MA. 2008. https://doi.org/10.1007/978-0-387-76540-2_11
13. Boytsov A.A., Boykov V.I., Bystrov S.V., Grigoriev V.V., Karaev P.V. Actuators and systems for micromovements [Ispolzuemye ustroystva i sistemy dlya mikroperemeshchenie]. ITMO University St. Petersburg, 2017. 8 p. (rus)
14. Galkin M.L. Propylene glycol as the main component of a refrigerant [Propylenglikol kak osnovnoy component khladonositelea]. Refrigeration technology. 2009. No. 9.
15. Khmelev V.N. Design and modeling of ultrasonic vibrational systems [Proektirovanie i modulirovanie ultrozvukovykh kolebatelnykh sistem]. Measurement, automation and modeling in industrial and scientific research: interuniversity collection. Ed. G.V. Leonova. Biysk, 2003. Pp. 211–216. (rus)
16. Physical properties and features of ultrasound propagation [Fizicheskie svoystva i osobennosti raspostraneniya ultrozvuka]. Access mode: <https://web.archive.org/web/20060518012131/http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/114/006.htm>. (rus)

Information about the authors

Orlov, Pavel A. Postgraduate student. Email: orlovpavel67@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Il'ina, Tatyana N. DSc, Professor. Email: ilina50@rambler.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Orlov, Kirill P. Bachelor student. Email: 2orlovkirill3@gmail.com. National research Technological University "MISiS". Russia. 119049, Moscow, Leninsky pr. 4,

Received 11.03.2021

Для цитирования:

Орлов П.А., Ильина Т.Н., Орлов К.П. Воздействие механических колебаний на обледенение испарителей воздушного теплового насоса // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 6. С. 36–44. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-6-36-44

For citation:

Orlov P.A., Il'ina T.N., Orlov K.P. Effects of mechanical vibrations on ice formation on evaporator of air heat pump. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 6. Pp. 36–44. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-6-36-44