

DOI: <https://doi.org/10.17816/RF117508>



Использование тепловой трубы в качестве теплообменника отработанного воздуха в центральном кондиционере

А.А. Жаров, Я.М. Тимашпольский, А.В. Борисенко, А.В. Валякина, С.М. Тимашпольский

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Целью настоящей работы является обзор литературы, посвящённой тепловым трубам, для анализа целесообразности использования данного типа теплообменника в системах кондиционирования воздуха. В статье описан принцип работы и конструкция тепловой трубы, приводятся различные способы возврата конденсата, подробно описывается её термодинамический цикл. Значительное внимание уделяется фитильным конструкциям и рабочим жидкостям. Далее перечисляются ограничения на перенос теплоты тепловых труб, которые влияют на работоспособность теплообменника. Описаны рекомендации по проектированию, найденные в научной литературе и на сайтах компаний-производителей. Приводятся схемы конструкций тепловых труб, применяющиеся в центральных кондиционерах и в системах кондиционирования воздуха (СКВ). Продемонстрирован пример установки с использованием тепловых труб в качестве теплообменника отработанного воздуха в центральном кондиционере. Проведено сравнение эффективности и тепловой мощности различных способов теплоутилизации при одинаковых начальных параметрах расхода и температур наружного, вытяжного воздуха. В заключении сделан вывод о преимуществах использования тепловых труб в СКВ для утилизации теплоты. Указана причина редкого применения указанного теплообменника. Приводится результат сравнения различных способов теплоутилизации и ответ на вопрос о перспективности использования тепловой трубы в СКВ. Даются рекомендации о направлении дальнейших исследований по представленной в обзоре тематике.

Ключевые слова: тепловая труба; теплообменник; СКВ; фитиль; термосифон; теплоутилизатор.

Для цитирования:

А.А. Жаров, Я.М. Тимашпольский, А.В. Борисенко, А.В. Валякина, С.М. Тимашпольский Использование тепловой трубы в качестве теплообменника отработанного воздуха в центральном кондиционере // Холодильная техника. 2022. Т. 111, № 4. С. 221–232. DOI: <https://doi.org/10.17816/RF117508>

DOI: <https://doi.org/10.17816/RF117508>

Using a heat pipe as a waste air heat exchanger in a central air conditioner

Anton A. Zharov, Ian M. Timashpolskiy, Artem V. Borisenko,
Anna V. Valiakina, Sevastian M. Timashpolskiy

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

ABSTRACT

The present study is a review of the literature on heat pipes. The aim is to determine the feasibility of using this type of heat exchanger in air-conditioning (AC) systems. This paper deals with the principle of operation and design of the heat pipe, provides various ways to return condensate, and describes in detail its thermodynamic cycle. Considerable attention is paid to wick structures and working fluids. The restrictions on the heat transfer of heat pipes that affect heat exchanger performance are noted. Design recommendations found in scientific literature and on the websites of manufacturing companies are also described. The diagrams of the heat pipe designs used in central air conditioners and AC systems are given. An example of an installation using heat pipes as a waste air heat exchanger in a central air conditioner is given. Further, the efficiency and thermal power of various methods of heat recovery are compared with the same initial parameters of the flow rate and temperatures of outdoor/exhaust air. A conclusion is reached regarding the advantages of using heat pipes in AC systems for heat recovery. The reason for the rare use of this heat exchanger is also explained. Different methods of heat recovery are compared, and the prospects of using a heat pipe in AC systems are assessed. Recommendations are given on the direction of further research on this topic.

Keywords: heat pipe; heat exchanger; AC; wick; thermosiphon.

To cite with article:

Zharov AA, Timashpolskiy IM, Borisenko AV, Valiakina AV, Timashpolskiy SM. Using a heat pipe as a waste air heat exchanger in a central air conditioner. *Refrigeration Technology*. 2022;111(4):221–232. DOI: <https://doi.org/10.17816/RF117508>

Received: 13.12.2022

Accepted: 02.02.2023

Published online: 03.03.2023

ВВЕДЕНИЕ

Теплоутилизатор – техническое решение, встраиваемое в систему вентиляции, которое служит для экономии тепловой энергии. Оно позволяет использовать большую часть тепла или холода, которую несёт в себе удаляемый из помещения воздух, для нагрева или охлаждения приточного воздуха. Использование теплоутилизации в СКВ позволяет объединить процессы отопления и вентиляции в один, что значительно повышает энергоэффективность системы, снижая затраты электроэнергии. Разработка новых теплопередающих устройств стимулирует переход к интегральному теплоснабжению, когда на смену традиционному теплоснабжению приходит «климатизация». Совершенствование теплонасосных технологий для создания оптимальных параметров микроклимата внутри помещений позволяет им претендовать на роль базовых в системах климатизации городов и зданий. Эффективность, стоимость и класс энергопотребления СКВ зависят от способа утилизации тепла. Существует несколько известных вариантов теплоутилизаторов: пластинчатый; роторный, с промежуточным теплоносителем; тепловой насос, в виде тепловой трубы. Теплоутилизатор в виде тепловой трубы в современной технике встречается крайне редко, поэтому главной целью данной работы является изучение возможностей применения указанного способа теплоутилизации. Промышленное производство теплообменников с тепловыми трубками началось в середине 1970-х годов. С тех пор они нашли множество применений во многих отраслях промышленности. Области применения теплообменников для тепловых труб можно разделить на три основные категории: 1) рекуперация тепла в устройствах кондиционирования воздуха; 2) рекуперация тепла из технологического выхлопного потока для предварительного нагрева воздуха и последующего обогрева помещения; 3) рекуперация тепла из потока отработавших газов технологического процесса для повторного использования в процессе. Изучению тепловых труб посвящены учебники зарубежных авторов Чи С. [1] и Дан П.Д. [2].

ПРИНЦИП РАБОТЫ И КОНСТРУКЦИЯ ТЕПЛОВОЙ ТРУБЫ

Принцип работы тепловой трубы показан на рис. 1. Компонентами тепловой трубы являются: герметичный корпус (стенка трубы и торцевые крышки), фитильная конструкция и небольшое количество рабочей жидкости, находящейся в равновесии с собственным паром. Различные типы рабочих жидкостей, такие как вода, ацетон, метанол, аммиак или натрий, фреоновые смеси, могут быть использованы в тепловых трубах в зависимости от требуемой рабочей температуры. Длина тепловой трубы делится на три части: секцию испарителя,

адиабатическую (транспортную) секцию и секцию конденсатора. Тепловая труба может иметь несколько источников тепла с адиабатическими секциями или без них в зависимости от способа применения и конструкции. Тепло, подаваемое извне на секцию испарителя, проводится через стенку трубы и фитильную конструкцию, где оно испаряет рабочую жидкость. Возникающее давление пара приводит пар через адиабатическую секцию в конденсатор, где пар конденсируется, выделяя свою скрытую теплоту испарения в предусмотренный теплоотвод. Капиллярное давление, создаваемое менисками в фитиле, перекачивает конденсированную жидкость обратно в секцию испарителя. Поэтому тепловая труба может непрерывно транспортировать скрытую теплоту испарения от испарителя к секции конденсатора. Этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока существует достаточное капиллярное давление, чтобы загнать конденсат обратно в испаритель [3, 4].

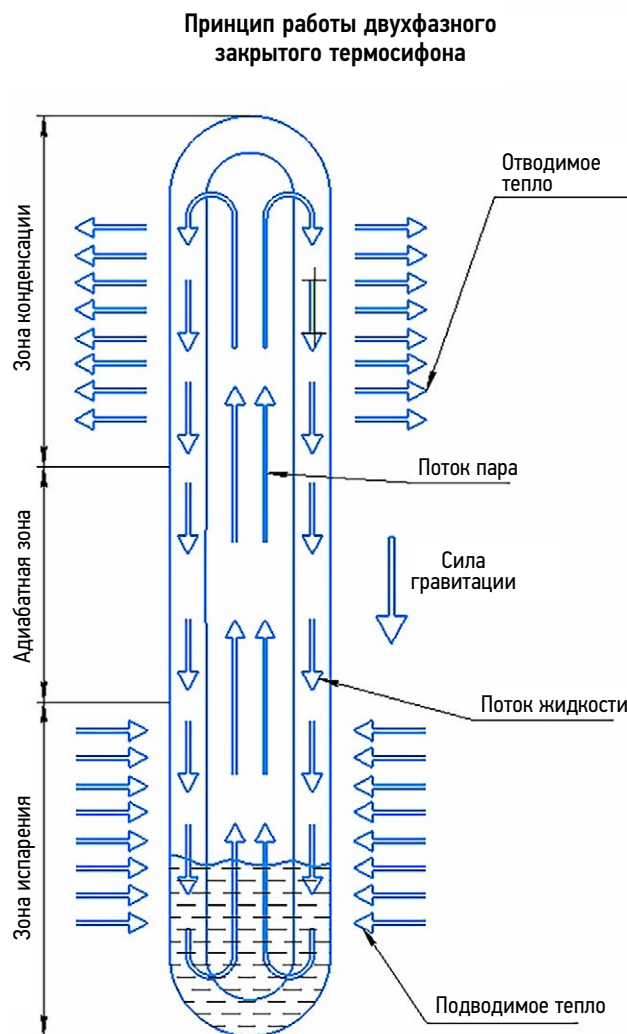


Рис. 1. Схема обычной тепловой трубы, показывающая принцип работы и циркуляцию рабочей жидкости.

Fig. 1. Diagram of a conventional heat pipe showing the principle of operation and the circulation of the working fluid.

Термин «тепловая труба» также используется для описания устройств с высокой теплопроводностью, в которых возврат конденсата достигается другими средствами, например, центростремительной силой, осмосом или электрогидродинамикой (таблица 1).

В теории тепловых труб внутренние тепловые процессы тепловой трубы рассматриваются как термодинамический цикл. Количество тепла, Q_{in} , подается в систему тепловых труб при средней температуре испарителя, T_e . При постоянной работе такое же количество тепла отводится при более низкой средней температуре конденсатора T_c . Работа производится внутри тепловой трубы, а затем полностью используется для преодоления гидродинамических потерь системы. Тепловая энергия преобразуется в механическую энергию за счет изменения фазы на границе раздела жидкость-пар путем создания напора давления. Термодинамический цикл тепловой трубы показан на рис. 2. Рабочее тело поступает в испаритель в виде жидкости под высоким давлением при температуре T_1 и выходит при температуре T_2 или T_2' в виде насыщенного или перегретого пара, соответственно. Пар проходит через паровой канал от испарителя к конденсатору из-за перепада давления пара в секциях испарителя и конденсатора (2-3 или 2'-2''-3). Пар поступает в секцию конденсатора в виде

насыщенного пара или смеси. После чего конденсат поступает в адиабатическую секцию в виде насыщенной жидкости. Наконец, жидкость покидает адиабатическую секцию и поступает в испаритель в виде жидкости под высоким давлением для завершения цикла. Работа, выполняемая с рабочей жидкостью во время ее циркуляции по тепловой трубе, 1–4 представляет собой область, ограниченную диаграммой зависимости температуры от энтропии. Из второго закона термодинамики следует что, преобразование тепловой энергии в кинетическую энергию связано с отводом тепла при температуре ниже высокотемпературного резервуара в системе с КПД менее 100%. Важно отметить, что в большинстве тепловых труб сквозная разница температур невелика по сравнению с другими проводящими системами. Тем не менее, идеальная тепловая труба никогда не может быть полностью изотермической, потому что это нарушило бы второй закон термодинамики. Возможности простого термодинамического анализа очень ограничены. В большинстве случаев для решения проблемы тепловых труб необходимы методы теплопередачи и механики жидкости, особенно когда требуется количественное решение.

Фитиль тепловой трубы

Фитильная конструкция внутри тепловой трубы предназначена для создания капиллярного напора для перемещения жидкости из конденсатора в испаритель. Кроме того фитиль обеспечивает распределение жидкости по всей зоне и передачу тепла теплопроводностью от внутренней стенки корпуса к поверхности раздела жидкость – пар. Максимальный капиллярный напор, развиваемый фитилем, увеличивается с уменьшением размеров пор в фитиле. Другая важная характеристика фитиля – его проницаемость, которая, напротив, увеличивается с ростом размеров пор. Для гомогенных фитилей существует оптимальный с точки зрения удовлетворения этих противоположных требований размер пор. Фитили, развивающие небольшой напор и применяемые в горизонтальных тепловых трубах или в трубах с использованием силы тяжести, должны обеспечивать протекание максимальных расходов жидкости и имеют сравнительно большие поры, примерно в 100–150 меш (150–100 мкм). Если подача рабочей жидкости

Термодинамический цикл работы тепловой трубы

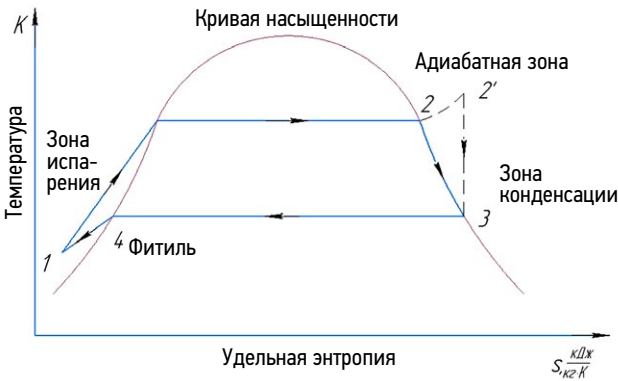


Рис. 2. Термодинамический цикл тепловой трубы.
Fig. 2. Thermodynamic cycle of a heat pipe.

Таблица 1. Способы возврата конденсата и вид тепловой трубы
Table 1. Condensate return methods and the type of heat pipe

Гравитация	Термосифон
Капиллярная сила	Стандартная тепловая труба
Центростремительная сила	Вращающаяся тепловая труба
Электрокинетические силы	Электрогидродинамическая тепловая труба
Магнитные силы	Магнитогидродинамическая тепловая труба
Осмотические силы	Осмотическая тепловая труба
Пузырьковый насос	Обратный термосифон

осуществляется против сил тяжести, то используются фитили с малыми порами. Другой, подлежащей оптимизации, характеристикой фитиля является его толщина. Теплопередающая способность тепловой трубы увеличивается с ростом толщины фитиля. Однако при этом увеличивается термическое сопротивление фитиля в радиальном направлении, что будет препятствовать росту теплопередающей способности трубы в целом и снижать допустимую максимальную плотность теплового потока в испарителе. Суммарное термическое сопротивление испарителя зависит также и от теплопроводности рабочей жидкости, заполняющей фитиль. Другими существенными характеристиками фитиля являются его совместимость с рабочей жидкостью и смачиваемость. Фитиль должен легко принимать надлежащую форму, с тем чтобы следовать за изменениями формы корпуса тепловой трубы. Однородные фитили изготавливаются из одного типа материала или с использованием одной технологии механической обработки. *Сетчатый фитиль (wrapped screen)* является самым простым и наиболее распространенным типом фитильной конструкции. Он состоит из металлической или тканевой материи, которая оборачивается вокруг стержня и вставляется в тепловую трубу. После размещения стержень снимается, оставляя фитиль, удерживаемый натяжением обернутого экрана, в случае металлического материала. Для тканевой материи в тепловую трубу может быть вставлена пружина, удерживающая фитиль на внутренней стороне стенки трубы. Капиллярное давление, создаваемое сетчатым фитилем, определяется размером прямоугольных пор между отдельными нитями. Проницаемость определяется количеством обертываний и неплотностью обертываний, которые создают кольцевые зазоры, через которые может протекать конденсат. *Спеченные металлические фитили (sintered metal)* изготавливаются путем упаковки крошечных металлических частицы между внутренней стенкой тепловой трубы и оправкой в виде порошка. Затем этот узел нагревается до тех пор, пока металлические сферы не будут спечены друг с другом и с внутренней стенкой тепловой трубы. Для оправки используются специальные материалы, чтобы ее можно было снять, оставив открытое пространство для пара. Этот тип фитиля сложнее в изготовлении по сравнению с простым сетчатым фитилем. Однако капиллярное давление, создаваемое спеченным металлическим фитилем (и, следовательно, предел капиллярности), легче предсказать, поскольку кольцевые зазоры, присутствующие в сетчатом фитиле, создают неопределенность в проницаемости. Кроме того, поскольку металлический порошок спекается, то эффективная теплопроводность намного выше, чем у аналогичного сетчатого фитиля, из-за плохого теплового контакта между сетчатыми оболочками. *Фитили с осевыми канавками (axial groove wicks)* образуются путем выдавливания или протяжки канавок по внутреннему радиусу трубы. Было

использовано и предложено несколько различных типов канавок, которые имеют прямоугольное, треугольное, трапециевидное или почти круглое поперечное сечение. Трапециевидные канавки в настоящее время являются наиболее распространенным типом. Производительность фитилей с осевой канавкой превосходна при условии, что применение не требует значительного неблагоприятного подъема против силы тяжести. Поскольку размеры канавок велики по сравнению с размерами клеток сетчатого фитиля или спеченного металлического фитиля, то давление капиллярной перекачки довольно мало. Однако, проницаемость и эффективная теплопроводность очень высоки. *Фитиль для артерий (open and integral artery)* сочетает в себе две необходимые характеристики: малый радиус пор для создания капиллярного давления и большой радиус пор для высокой проницаемости. В структуре фитиля артерии внутренняя часть тепловой трубы либо покрыта сетчатым фитилем, либо спеченным металлическим порошком обычным способом, но выполнен полый канал (каналы), проходящий по длине трубы и сообщающийся с остальной частью фитильной конструкции. Конденсат собирается в этих проходах (каналах) или артерии и перекачивается обратно в секцию испарителя за счет капиллярных сил, создаваемых на границе раздела жидкость-пар. Поскольку внутренний диаметр артерии намного больше, чем эффективный радиус пор фитиля, пар способен легко проходить по длине тепловой трубы с минимальным перепадом давления. Композитные фитильные структуры используют преимущества наличия небольших пор для создания высоких давлений капиллярной перекачки и наличия больших пор для увеличения проницаемости пути возврата жидкости. Самым простым типом композитного фитиля является *сетчатый фитиль (composite screen)*, схожий с однородным, за исключением того, что используются два экрана с разными размерами пор. Несколько оболочек экрана с большим размером пор используются напротив внутренней стенки трубы для обратного пути жидкости, и одна оболочка экрана с гораздо меньшим размером пор помещается рядом с паровым пространством для создания высоких капиллярных давлений. Аналогичным образом, осевые канавки, покрытые одной пленкой мелкопористого экрана, могут решить многие проблемы, связанные с однородным фитилем с осевой канавкой. Поскольку экран эффективно разделяет потоки жидкости и пара, унос жидкости в поток пара за счет межфазного сдвига практически исключается. Кроме того, этот композит может использоваться в неблагоприятных гравитационных полях, поскольку экран создает необходимое капиллярное давление. *Пластинчатый фитиль (slab wick)* в сочетании с кольцевыми канавками часто используется в тех случаях, когда скорости пара обычно невелики. Данный фитиль, который обычно представляет собой войлок или несколько слоев сетки, выполнен в форме бруска

с прямоугольным поперечным сечением. Самая длинная сторона поперечного сечения совпадает с внутренним диаметром тепловой трубы. Кольцевые канавки распределяют конденсат по всей окружности. Очевидно, что этот тип фитиля не подходит для очень длинных тепловых труб из-за сложности обработки кольцевых канавок на внутренней стороне трубы. *Туннельная или спиральная артерия (spiral artery)* также использует войлок или несколько слоев сетки, но выполнена в форме трубки, которая меньше внутреннего диаметра трубы. Затем артерия располагается на оси трубы с помощью фитильных отводов, которые обеспечивают сообщение конденсата между полый артерией и кольцевыми канавками на внутреннем диаметре трубы. В *однонаправленной конструкции тепловой трубы (monogroove heat pipe)* пар и жидкий конденсат текут по разным каналам, разделенным узкой канавкой. Как и в случае с другими фитильными конструкциями артериального типа, кольцевые канавки в паровом канале помогают распределять конденсат. *Артерия с двойными стенками (double-walled artery)* состоит из внутренней трубки с наружными канавками, которая перфорирована в секциях испарителя и конденсатора, чтобы пар мог выходить внутрь. Эта внутренняя трубка концентрически помещена во внешнюю трубку с сетчатым фитилем на внутренней стенке. Конструкция фитиля с двойными стенками создает высокое капиллярное давление, и поскольку конденсат возвращается в испаритель как через сетчатый фитиль, так и через артерии на внешней стороне внутренней трубы, полное блокирование возврата жидкости маловероятно. Наиболее полную информацию,

посвященную различным фитильным конструкциям, можно найти в работе A. Faghri [5].

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ

Ограничения по переносу теплоты тепловых труб

При проектировании необходимо учитывать пять основных ограничений на перенос теплоты тепловых труб: вязкость, звук, капиллярный предел, унос / затопление и кипение (см. таблицу 2). Эти пределы являются функцией многих переменных, включая рабочую температуру, выбор фитиля и свойства жидкости.

Рекомендации к проектированию, найденные в научных статьях

В ходе поиска информации по проектированию тепловых труб было найдено множество научных статей зарубежных авторов [3, 6–14]. В большинстве этих научных работ исследование возможности использования ТТ в СКВ проводится с помощью эксперимента, в ходе которого сооружается реальный теплообменник, состоящий из определённого количества тепловых труб, в которых применяется конкретная пара фитиля и рабочей жидкости. Начальные условия (напор, параметры наружного воздуха и т.д.) чаще всего не варьируются, а результатом являются параметры на выходе из теплообменника, тепловая мощность и оценка эффективности спроектированного теплообменника. Данная информация не может использоваться в качестве методологии проектирования ТТ, так как основана только на исследовании конкретных

Таблица 2. Пределы тепловых труб

Table 2. Limits of heat pipes

Ограничение тепловой трубы	Описание	Причина
Вязкость (давление пара)	Силы вязкости препятствуют потоку пара внутри тепловой трубы.	Тепловая труба, работающая вблизи тройной точки с очень низким давлением пара – необходимо использовать другую рабочую жидкость
Скорость звука	Поток пара достигает звуковой скорости при выходе из испарителя, блокируя поток.	Слишком большая мощность при более низкой рабочей температуре (заметно во время запуска)
Унос рабочей жидкости	Высокоскоростной поток пара отделяет жидкость от фитиля.	Недостаточно парового пространства для заданной мощности. (Происходит при низких температурах)
Затопление термосифона	Высокоскоростной поток пара предотвращает возврат жидкости гравитационными силами	Недостаточно парового пространства для заданной мощности. (Происходит при низких температурах)
Капилляр	Капиллярное действие структуры фитиля не может преодолеть гравитационные, паровые и жидкостные перепады давления.	Слишком высокая потребляемая мощность. (Не подходит фитиль)
Кипение	Кипение происходит в фитиле, предотвращает возврат жидкости.	Высокий радиальный тепловой поток в испарителе тепловой трубы.

теплообменников при использовании в конкретных начальных условиях. Но результаты, полученные в ходе этих экспериментов, могут пригодиться при проектировании и совершенствовании теплообменника. Можно выделить основные рекомендации для применения теплообменника с тепловыми трубами в качестве утилизатора теплоты отработанного воздуха в СКВ, встречающихся в выводах у ряда авторов: 1) Теплоотдача и эффективность испарительной и конденсаторной секций увеличивается при повышении температуры свежего воздуха на входе. 2) Увеличение отношения массового расхода возвращаемого и свежего воздуха примерно в два раза приводит к увеличению изменения температуры свежего воздуха приблизительно на 20% и эффективности теплообменника ТТ на 26%. 3) Соотношение энтальпий между рекуперацией теплоты и обычным смешением воздуха увеличивается с увеличением температуры свежего воздуха на входе и уменьшается с увеличением массового расхода возвращаемого воздуха. 4) Рекуперация теплоты увеличивается с повышением температуры свежего воздуха на входе и достигает примерно 85%. 5) Основными параметрами, влияющими на оптимальную эффективность, являются: Q – скорость теплопередачи, [Вт]; U – общий коэффициент теплопередачи, [Вт/м²*С]; $\Delta T_{\max}$ – изменение температуры воздушного потока, [К]; C_F – фиксированные эксплуатационные расходы на вентиляторы.

Рекомендации к проектированию от компаний-производителей

При поиске информации о проектировании тепловых труб было обнаружено несколько компаний, занимающихся производством оборудования для СКВ, такие как «Karyer» [15] (Турция), «Clima Gold» (Польша) [16] и «АСТ» (США) [18], в ассортименте которых представлены теплообменники с тепловыми трубами. Американская компания «АСТ» в открытом доступе представила значительно больше информации, касающейся опыта

применения тепловых труб не только в СКВ, но и в космических аппаратах, и в охлаждении микроэлектроники. На сайте были найдены различные ресурсы, описывающие метод проектирования ТТ (он основан на учебниках, уже рассмотренных выше, что не позволило получить новую информацию, способную пригодиться для проектирования теплообменника); вебинары и видео, показывающие принцип работы ТТ; примеры внедрения в реальных объектах (стадионы, отели, торговые центры, университеты и т.д.); патенты; брошюры и техническая документация [18–20]. Данная компания производит теплообменники на основе тепловых труб для СКВ, имеющих конструкционные особенности и отличающиеся способами применения. Рассмотрим несколько типовых схем.

1) *Петлевая схема* (рис. 3а). Преимуществами данной схемы являются: экономия энергии; свободное предварительное охлаждение; свободное повторное нагревание (без затрат на электричество, пар или горячую воду); пассивная система (не требует постоянного технического обслуживания); отсутствие движущихся частей; лёгкость монтажа; низкие эксплуатационные расходы. Чаще всего применяется для осушения воздуха.

2) *Схема с тепловыми трубами «воздух-воздух»*. Данная схема применяется в приточно-вытяжных установках (центральных кондиционерах) в качестве теплоутилизатора и имеет различия в ориентации в пространстве и в исполнении: с раздельным и близким расположением потоков воздуха (рис. 3б, 3с). Преимущества этой схемы: малый срок окупаемости (по заявлениям американского производителя менее 20 месяцев в некоторых штатах); пассивная система (не требует постоянного технического обслуживания); отсутствие движущихся частей; отсутствие перекрёстного загрязнения воздушных потоков; использование энергии здания для предварительного охлаждения или подогрева в противоточных или сплит-системах.

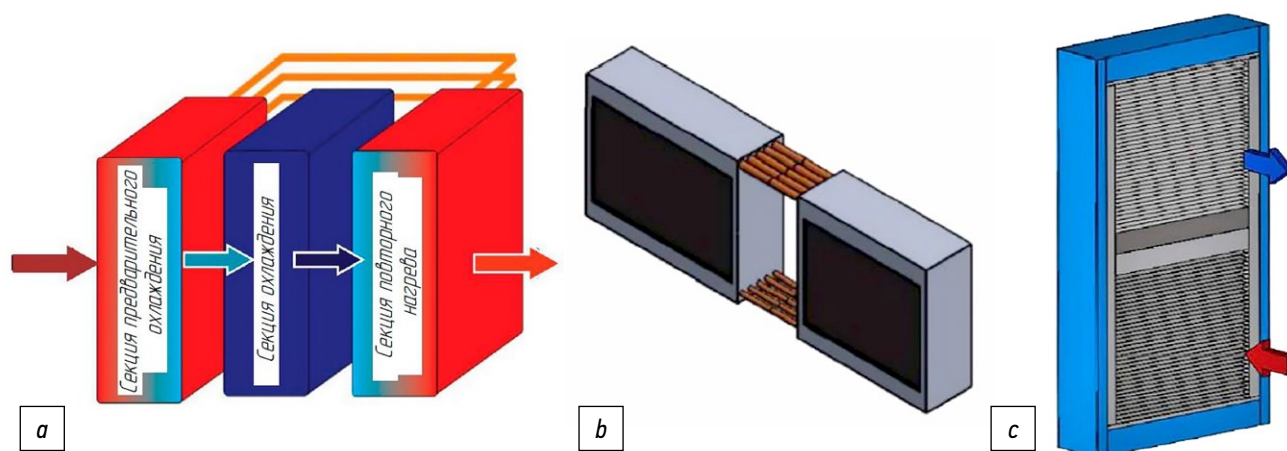


Рис. 3. Схемы расположения теплообменных аппаратов на основе тепловых труб: а) Петлевая схема. б) с раздельным расположением потоков воздуха; в) с близким расположением потоков воздуха [18].

Fig. 3. Layout diagrams of heat exchangers based on heat pipes: а) Loop circuit; б) with a separate arrangement of air flows; в) with a close arrangement of air flows[18].

3) *Схема с разделённым контуром и насосом.* Особенностью данной схемы является то, что в летний период она работает в режиме термосифона (рис. 4а), а в зимний период для перемещения хладагента из зоны конденсации в зону испарения использует насос (рис. 4б). Преимущества схемы, использующей насос: возможность применения в больших системах и на больших расстояниях; энергоэффективность; возможность дополнительного контроля температуры (без необходимости применения байпаса); возможность контроля производительности; компактность; отсутствие перекрёстного загрязнения воздушных потоков.

Выбрать и рассчитать конфигурацию тепловой трубы для требуемых параметров СКВ можно с помощью программы подбора, которая позволяет задать требуемые для теплообменника начальные параметры. Далее представлен перечень некоторых конструктивных особенностей теплообменника (рисунок 3с): 1) Тепловые медные трубы должны иметь наружный диаметр 0,5 дюйма (12,7 мм), являться бесшовными, с внутренней нарезкой. Оребрённые трубчатые намотки должны иметь алюминиевые ребра минимальной толщины 0,006 дюйма (0,15 мм) с усилением (гофрированная волна, синусоидальная волна или жалюзи) в соответствии с требованиями к производительности и перепаду давления. Плотность ребер должна составлять 10–12 ребер на дюйм. Тепловые трубы должны быть индивидуально обработаны, индивидуально заполнены и герметично запечатаны. Теплообменники с тепловыми трубами должны устанавливаться в соответствии с чертежами, представленными изготовителем. 2) Каркас теплообменника должен быть изготовлен из оцинкованной стали. Рама должна быть снабжена фланцами шириной не менее 1,50 дюйма со всех четырех сторон, как спереди, так и сзади. Теплообменник должен быть снабжен перегородкой для изоляции выходящего и входящего воздушных потоков; не должно быть перекрестного загрязнения. Должны быть предусмотрены торцевые накладки для защиты концов тепловых труб от возможных

повреждений при монтаже. Сливные поддоны рекомендуются для всех змеевиков. 3) Хладагент рабочей жидкости теплообменника тепловой трубы должен выбираться на основе рабочей температуры тепловой трубы и совместимости с материалом трубы тепловой трубы. Используемый хладагент теплообменника тепловой трубы должен быть отнесен к группе безопасности ASHRAE A1.

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕПЛОВОЙ ТРУБЫ В СКВ

Теплообменник в виде тепловой трубы в СКВ применяют, когда недопустимо применение рекуператоров роторного типа (не допускается смешение, перетекание вытяжного и приточного воздушных потоков); требуется работать в помещениях с большим содержанием влаги в воздухе (бассейн, аквапарк и т.д.); когда нет возможности использовать пластинчатый рекуператор из-за габаритов вентиляционного агрегата, так как агрегаты с тепловой трубкой имеют более компактные габариты.

На рис. 5 изображён пример использования тепловой трубы в СКВ, разработанный для помещений кафедры Э4 МГТУ им. Н.Э. Баумана. Данная система служит для обеспечения кабинетов свежим приточным воздухом. Она работает в двух режимах: в зимнем (нагрев наружного воздуха до комфортной температуры) и летнем (охлаждение наружного до минимальной требуемой температуры приточного воздуха).

Сравним характеристики трёх типов теплоутилизаторов (пластинчатый, роторный, и в виде тепловой трубы), основываясь на параметрах работы реальных установок (таблица 3).

Из таблицы 3 видно, что СКВ с теплоутилизатором в виде тепловой трубы при заданных одинаковых начальных параметрах эффективнее, чем аналогичная система с пластинчатым рекуператором, но менее эффективна в сравнении с роторным регенератором [21–26].

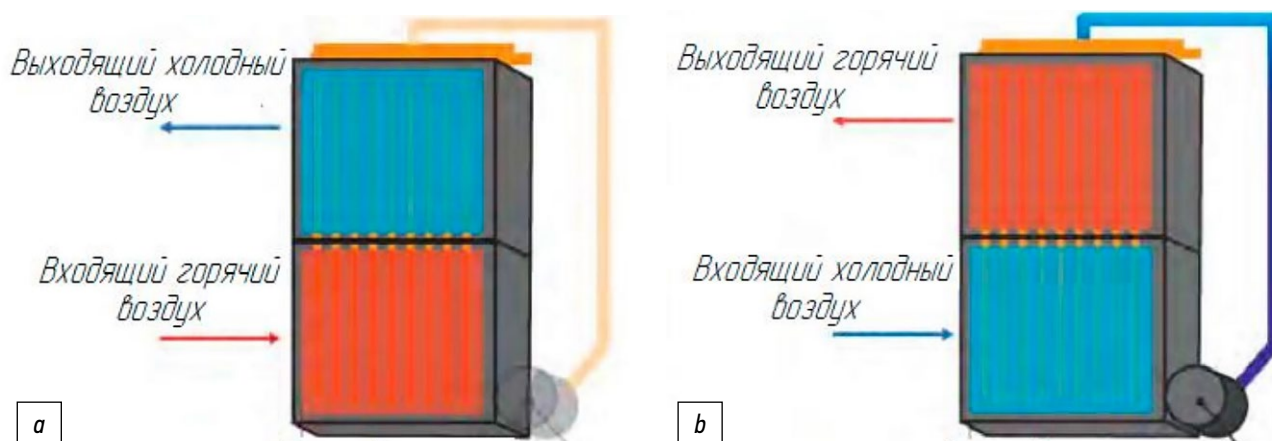


Рис. 4. Периоды работы: а) Летний режим; б) Зимний режим [18].

Fig. 4. Operating periods: a) Summer mode; b) Winter mode [18].

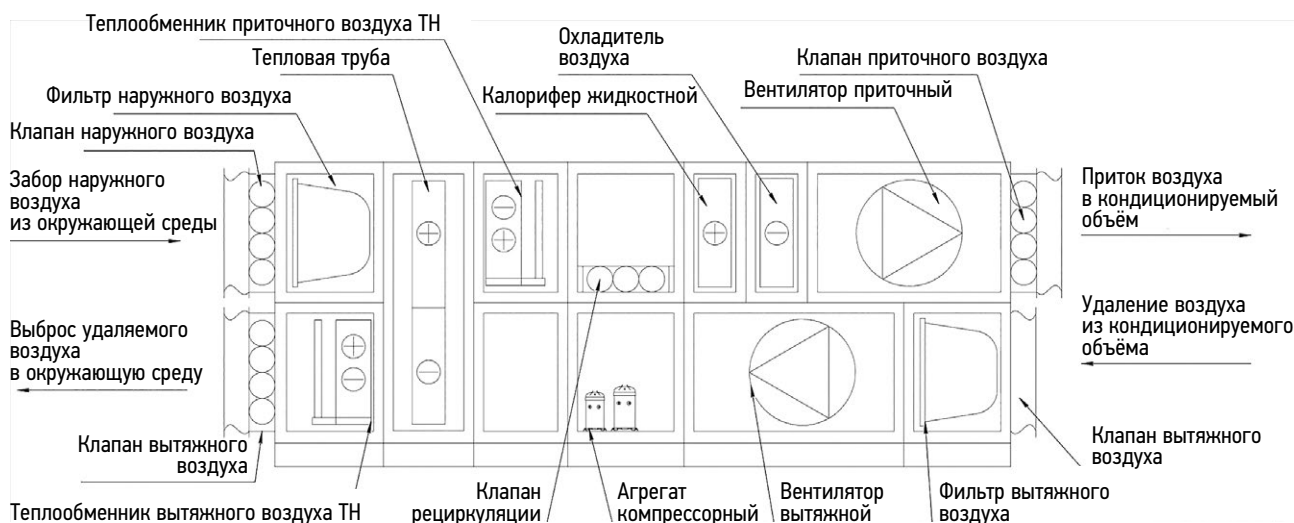


Рис. 5. Пример СКВ с использованием тепловой трубы.

Fig. 5. Example of an AC system using a heat pipe.

Таблица 3. Сравнение характеристик теплоутилизаторов

Table 3. Comparison of the characteristics of heat exchangers

Тип теплоутилизатора	Расход воздуха, м³/ч	t наружного воздуха, °C	t вытяжного воздуха, °C	Эффективность теплоутилизации, %	Тепловая мощность, кВт	t воздуха после теплоутилизатора, °C
Пластинчатый	3000	-20	+20	55,0	22,2	2,1
Роторный	3000	-20	+20	68,3	34,3	7,3
Тепловая труба	3000	-20	+20	63,0	30,5	5,3

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Преимуществами использования тепловых труб в СКВ для утилизации теплоты являются: 1) отсутствие перекрёстного загрязнения воздушных потоков; 2) отсутствие движущихся частей; 3) не требуется постоянное техническое обслуживание; 4) лёгкость монтажа; 5) большая теплообменная площадь в единице объёма; 6) возможность рекуперации теплоты при малых разностях температур; 7) реверсивность системы; 8) пассивность системы (не требуется дополнительной электроэнергии). Редкость использования тепловых труб для утилизации теплоты в большей степени связана со сложностью расчёта, проектирования и их изготовления, поэтому, чаще применяются более лёгкие в производстве безфитильные теплообменники – термосифоны. Из результата сравнения тепловых труб с другими способами теплоутилизации видно, что данный тип теплообменника более эффективен, чем пластинчатый теплообменник, но менее, чем роторный (по эффективности теплоутилизации). Найденная информация позволяет сделать вывод о том, что использование тепловой трубы в теплообменниках для утилизации теплоты является перспективной и конкурентоспособной технологией, но достаточно сложной в проектировании и производстве.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с подготовкой и публикацией статьи. их необходимо описать.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования и подготовке публикации.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contributions. All authors made a substantial contribution to the conceptual development, research, and preparation of this article and read and approved the final version before publication.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding source. This study was not supported by external sources of funding.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чи С. Тепловые трубы: теория и практика. М.: Машиностроение, 1981.
2. Дан П.Д., Рей Д.А. Тепловые трубы. М.: Энергия, 1979.
3. Abd El-Baky M.A., Mohamed M.M. Heat pipe heat exchanger for heat recovery in air conditioning // *Appl. Therm. Eng.* 2007. Vol. 27, N 4. P. 795–801. doi:10.1016/j.applthermaleng.2006.10.020
4. Mahajan G., Cho H., Smith A., et al. Experimental analysis of atypically long finned oscillating heat pipe for ventilation waste heat recovery application // *J. Therm. Sci.* 2020. Vol. 29, N 3. P. 667–675. doi: 10.1007/s11630-019-1178-5
5. Faghri A. Heat pipes: review, opportunities and challenges // *Frontiers in Heat Pipes (FHP)*. 2014. Vol. 5, N 1. P. 1–48. doi: 10.5098/fhp.5.1
6. Vasiliev L.L. Heat pipes in modern heat exchangers // *Appl. Therm. Eng.* 2005. Vol. 25, N 1. P. 1–19. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2003.12.004
7. Barrak A.S., Saleh A.A.M., Naji Z.H. An experimental study of using water, methanol, and binary fluids in oscillating heat pipe heat exchanger // *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2020. Vol. 23, N 2. P. 357–364. doi: 10.1016/j.jestch.2019.05.010
8. Eidan A.A., Alshukri M.J., Al-fahham M., et al. Optimizing the performance of the air conditioning system using an innovative heat pipe heat exchanger // *Case Studies in Thermal Engineering*. 2021. Vol. 26. P. 101075. doi: 10.1016/j.csite.2021.101075
9. Wang C., Tang S., Liu X., et al. Experimental study on heat pipe thermoelectric generator for industrial high temperature waste heat recovery // *Appl. Therm. Eng.* 2020. Vol. 175, N 5. P. 115299. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115299
10. Han Z.X., Wang D.X., Wang F. Visual experimental study on operation characteristics of condensation segment of gravity-assisted heat pipe // *CIESC Journal*. 2014. Vol. 65, N 8. P. 2934–2939. doi: 10.3969/j.issn.0438-1157.2014.08.012
11. Li Q., Ma L., Xuan Y.M. Experimental investigation of cryogenic loop heat pipe // *J. Eng. Thermophys.* 2010. Vol. 31, N 1. P. 120–123.
12. Jadhav T.S., Lele M.M. Theoretical energy saving analysis of air conditioning system using heat pipe heat exchanger for Indian climatic zones // *Int. J. Eng. Sci. Technol.* 2015. Vol. 18, N 4. P. 669–673. doi: 10.1016/j.jestch.2015.04.009
13. Ahmadzadehtalatapeh M., Yau Y.H. The application of heat pipe heat exchangers to improve the air quality and reduce the energy consumption of the air conditioning system in a hospital ward—A full year model simulation // *Energy and Buildings*. 2011. Vol. 43, N 9. P. 2344–2355.
14. Ahmadzadehtalatapeh M. An air-conditioning system performance enhancement by using heat pipe based heat recovery technology // *Scientia Iranica*. 2013. Vol. B20, N 2. P. 329–336. doi: 10.1016/j.enbuild.2011.05.021
15. ННР, VHP Heat Recovery Heat Exchangers Catalogue [internet] Режим доступа: https://karyergroup.com/ru/продукты/рекуперация-тепла-теплообменники/item/hhp-vhp-5?category_id=355 дата доступа: 13.12.2022
16. Clima Gold [internet] Режим доступа: <https://ru.climagold.com/> дата доступа: 13.12.2022
17. Advanced Cooling Technologies, Inc. [internet] Режим доступа: <https://www.1-act.com/> дата доступа: 13.12.2022
18. HVAC energy recovery [internet] Режим доступа: <https://www.1-act.com/hvac/> дата доступа: 13.12.2022
19. Air-to-air heat pipe heat exchanger (HP-AAHX) selection tool [internet] Режим доступа: <https://www.1-act.com/hvac/aahx/> дата доступа: 13.12.2022
20. Advanced heat exchangers [internet] Режим доступа: <https://www.1-act.com/innovations/heat-exchanger/> дата доступа: 13.12.2022
21. Sukarno R., Putra N., Hakim I.I., et al. Multi-stage heat-pipe heat exchanger for improving energy efficiency of the HVAC system in a hospital operating room1 [Heat pipe heat exchanger for heat recovery in air conditioning] // *Int. J. Low-Carbon Technol.* 2021. Vol. 16, N 2. P. 259–267.
22. Sukarno R., Nandy P., Hakim I.I., et al. Utilizing heat pipe heat exchanger to reduce the energy consumption of airborne infection isolation hospital room HVAC system // *Journal of Building Engineering*. 2021. Vol. 35. P. 102116. doi: 10.1016/j.jobe.2020.102116
23. Abdelaziz G.B., Abdelbaky M.A., Halim M.A., et al. Energy saving via Heat Pipe Heat Exchanger in air conditioning applications “experimental study and economic analysis” // *Journal of Building Engineering*. 2021. Vol. 35. P. 102053. doi: 10.1016/j.jobe.2020.102053
24. Enteria N., Cuartero-Enteria O., Sawachi T. Review of the advances and applications of variable refrigerant flow heating, ventilating, and air-conditioning systems for improving indoor thermal comfort and air quality // *International Journal of Energy and Environmental Engineering*. 2020. Vol. 11. P. 459–483. doi: 10.1007/s40095-020-00346-0
25. Eidan A.A., Najim S.E., Jalil J.M. An experimental and a numerical investigation of HVAC system using thermosyphon heat exchangers for subtropical climates // *Appl. Therm. Eng.* 2017. Vol. 114. P. 693–703. doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2016.12.027
26. Al-fahham M., Eidan A.A., Ahmed A.Q., AlSahlani A. Improving the performance of air conditioning system experimentally by a new type of heat pipe heat exchanger // *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2020. Vol. 928. P. 022124. doi: 10.1088/1757-899X/928/2/022124

REFERENCES

1. Chi SW. *Heat pipe theory and practice: A sourcebook*. New York: Hemisphere Pub. Corp; 1976.
2. Dunn PD, Reay DA. *Heat Pipes*. Oxford, New York, Toronto, Sydney, Paris, Braunschweig: Pergamon Press; 1976.
3. Abd El-Baky MA, Mohamed MM. Heat pipe heat exchanger for heat recovery in air conditioning. *Appl. Therm. Eng.* 2007;27(4):795–801. doi:10.1016/j.applthermaleng.2006.10.020
4. Mahajan G, Cho H, Smith A, et al. Experimental analysis of atypically long finned oscillating heat pipe for ventilation waste heat recovery application. *J. Therm. Sci.* 2020;29(3):667–675. doi: 10.1007/s11630-019-1178-5
5. Faghri A. Heat pipes: review, opportunities and challenges. *Frontiers in Heat Pipes (FHP)*. 2014;5(1):1–48. doi: 10.5098/fhp.5.1
6. Vasiliev LL. Heat pipes in modern heat exchangers. *Appl. Therm. Eng.* 2005;25(1):1–19. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2003.12.004
7. Barrak AS, Saleh AAM, Naji ZH. An experimental study of using water, methanol, and binary fluids in oscillating heat pipe heat exchanger. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2020;23(2):357–364. doi: 10.1016/j.jestch.2019.05.010
8. Eidan AA, Alshukri MJ, Al-fahham M, et al. Optimizing the performance of the air conditioning system using an innovative heat pipe heat exchanger. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2021;26:101075. doi: 10.1016/j.csite.2021.101075
9. Wang C, Tang S, Liu X, et al. Experimental study on heat pipe thermoelectric generator for industrial high temperature waste heat recovery. *Appl. Therm. Eng.* 2020;175(5):115299. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115299
10. Han ZX, Wang DX, Wang F. Visual experimental study on operation characteristics of condensation segment of gravity-assisted heat pipe. *CIESC Journal*. 2014;65(8):2934–2939. doi: 10.3969/j.issn.0438-1157.2014.08.012
11. Li Q, Ma L, Xuan YM. Experimental investigation of cryogenic loop heat pipe. *J. Eng. Thermophys.* 2010;31(1):120–123.
12. Jadhav TS, Lele MM. Theoretical energy saving analysis of air conditioning system using heat pipe heat exchanger for Indian climatic zones. *Int. J. Eng. Sci. Technol.* 2015;18(4):669–673. doi: 10.1016/j.jestch.2015.04.009
13. Ahmadzadehtalatapeh M, Yau YH. The application of heat pipe heat exchangers to improve the air quality and reduce the energy consumption of the air conditioning system in a hospital ward—A full year model simulation. *Energy and Buildings*. 2011;43(9):2344–2355.
14. Ahmadzadehtalatapeh M. An air-conditioning system performance enhancement by using heat pipe based heat recovery technology. *Scientia Iranica*. 2013;B20(2):329–336. doi: 10.1016/j.enbuild.2011.05.021
15. HHP, VHP Heat Recovery Heat Exchangers Catalogue [internet] Available from: https://karyergroup.com/ru/продукты/рекуперация-тепла-теплообменники/item/hhp-vhp-5?category_id=355 accessed: 13.12.2022
16. Clima Gold [internet] Available from: <https://ru.climagold.com/> дата доступа: 13.12.2022
17. Advanced Cooling Technologies, Inc. [internet] Available from: <https://www.1-act.com/> accessed: 13.12.2022
18. HVAC energy recovery [internet] Available from: <https://www.1-act.com/hvac/> accessed: 13.12.2022
19. Air-to-air heat pipe heat exchanger (HP-AAHX) selection tool [internet] Available from: <https://www.1-act.com/hvac/aahx/> accessed: 13.12.2022
20. Advanced heat exchangers [internet] Available from: <https://www.1-act.com/innovations/heat-exchanger/> accessed: 13.12.2022
21. Sukarno R, Putra N, Hakim II, et al. Multi-stage heat-pipe heat exchanger for improving energy efficiency of the HVAC system in a hospital operating room1 [Heat pipe heat exchanger for heat recovery in air conditioning]. *Int. J. Low-Carbon Technol.* 2021;16(2):259–267.
22. Sukarno R, Nandy P, Hakim II, et al. Utilizing heat pipe heat exchanger to reduce the energy consumption of airborne infection isolation hospital room HVAC system. *Journal of Building Engineering*. 2021;35:102116. doi: 10.1016/j.jobbe.2020.102116
23. Abdelaziz GB, Abdelbaky MA, Halim MA, et al. Energy saving via Heat Pipe Heat Exchanger in air conditioning applications “experimental study and economic analysis”. *Journal of Building Engineering*. 2021;35:102053. doi: 10.1016/j.jobbe.2020.102053
24. Enteria N, Cuartero-Enteria O, Sawachi T. Review of the advances and applications of variable refrigerant flow heating, ventilating, and air-conditioning systems for improving indoor thermal comfort and air quality. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*. 2020;11:459–483. doi: 10.1007/s40095-020-00346-0
25. Eidan AA, Najim SE, Jalil JM. An experimental and a numerical investigation of HVAC system using thermosyphon heat exchangers for subtropical climates. *Appl. Therm. Eng.* 2017;114:693–703. doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2016.12.027
26. Al-fahham M, Eidan AA, Ahmed AQ, AlSahlani A. Improving the performance of air conditioning system experimentally by a new type of heat pipe heat exchanger. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2020;928:022124. doi: 10.1088/1757-899X/928/2/022124

ОБ АВТОРАХ

*** Севастьян Михайлович Тимашпольский;**
адрес: Россия, 105005, Москва,
Лефортовская наб., д. 1;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5908-8105>;
e-mail: timsevmih@yandex.ru

Жаров Антон Андреевич,
к.т.н.;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9945-0850>;
eLibrary SPIN: 8581-1809;
e-mail: zharov_a@bmstu.ru

Ян Михайлович Тимашпольский;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3774-1825>;
e-mail: ian.timash@yandex.ru

Борисенко Артем Витальевич,
к.т.н.;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4818-3702>;
eLibrary SPIN: 2859-5006;
e-mail: borart@bmstu.ru

Валякина Анна Викторовна,
к.т.н.;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7709-1209>;
eLibrary SPIN: 7679-2022;
e-mail: valiakina@bmstu.ru

* Автор, ответственный за переписку

AUTHORS' INFO

*** Sevastian M. Timashpolskiy;**
address: 1 Lefortovskaya Naberezhnaya,
105005 Moscow, Russia;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5908-8105>;
e-mail: timsevmih@yandex.ru

Anton A. Zharov,
Cand. Sci. (Tech.);
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9945-0850>;
eLibrary SPIN: 8581-1809;
e-mail: zharov_a@bmstu.ru

Ian M. Timashpolskiy;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3774-1825>;
e-mail: ian.timash@yandex.ru

Artem V. Borisenko,
Cand. Sci. (Tech.);
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4818-3702>;
eLibrary SPIN: 2859-5006;
e-mail: borart@bmstu.ru

Anna V. Valiakina,
Cand. Sci. (Tech.);
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7709-1209>;
eLibrary SPIN: 7679-2022;
e-mail: valiakina@bmstu.ru

* Corresponding author