

ВИХРЕВОЙ ТЕПЛООБМЕННИК ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ТЕПЛА И ХОЛОДА

А.Н. Шульц

ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

shultsalek@mail.ru

Рассмотрены возможности создания холодильной машины на основе испарительно-конденсационного цикла с использованием физических процессов, протекающих в тепловых трубах и абсорбционных холодильных машинах исходя из опыта исследования тепло- и массообмена при запуске тепловых труб из замороженного состояния теплоносителя. Выявлены вихревые структуры в паровом канале, создающие реальные границы, в пределах которых происходит формирование нестационарного парокапельного потока. Установлено, что поток влажного пара перемещается под влиянием вихревых структур, изменяющихся по интенсивности и направлению вращения. Предложены варианты построения испарительно-конденсационных теплообменников по принципу термодинамического цикла холодильной машины, рекомендуемые для использования при утилизации тепловых ресурсов, полученных при производстве холода или тепла в тепловых насосах.

Ключевые слова: испарение, конденсация, холодильник, тепловая труба, абсорбция, вихрь

Ссылка для цитирования: Шульц А.Н. Вихревой теплообменник для производства тепла и холода // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 6. С. 189–198. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-6-189-198

Возрастающие потребности общества в энергетических ресурсах вызывают интерес к поиску новых решений по утилизации тепловых ресурсов любого происхождения. Для выполнения этой задачи целесообразно обратиться к содержанию новых современных подходов к разработке холодильных машин, в которых используются испарительно-конденсационные циклы тепловой трубы. (ТТ).

Необходимая информация о достигнутых результатах в области исследования нестационарного парового потока в ТТ имеется в литературных источниках [1–4]. Наши исследования проводились с помощью оптических средств контроля на установке, созданной в лаборатории физики Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Длительное время тепловые трубы рассматривались как испарительно-конденсационные теплообменники (ИКТ), предназначенные для трансформации и передачи тепловых потоков.

Известно, что термодинамический цикл холодильных машин может быть использован как для производства холода, так и тепла (в тепловых насосах), что и привлекает внимание исследователей, разрабатывающих новые устройства для утилизации тепла различных источников.

Цель работы

Цель работы — расширение области применения тепловых труб для получения новых тепло-

физических свойств и потребительских качеств промышленных энергетических установок и бытовой техники.

Результаты исследования

Эксперимент был проведен в плоском канале рабочего участка тепловой трубы. Нестационарный паровой поток подсвечивали лазерным лучом в виде плоского светового пучка. В подсвеченной области трубы свет рассеивался по индикатрисе рассеяния [5, 6]. В результате в плоском канале трубы были обнаружены следующие явления [1, 2, 4, 7–10]:

- оптические неоднородности различного происхождения;
- вихри в виде вращающихся цилиндрических валов;
- вращение валов в испарителе поперек направления движения пара, в конденсаторе — вдоль;
- в области вдува валы создавали границы в виде сопла Лавая.

Возникновение капель жидкой фазы происходило в результате гетерофазных флуктуаций в паре [11–13]. Движение этих капель наблюдалось в эксперименте и зафиксировано фоторегистратором. Таким образом обнаружены реальные границы парового потока.

Гидродинамика парового потока. Как правило, расчет гидродинамики выполняют по модели идеального газа [14, 15]. Однако для двухфазного потока она не подходит, поскольку наличие жид-

кости в паре изменяет показатель его адиабаты C_p/C_v , упругость, скорость звука, число Маха. По этой причине расчет потерь давления не выполняется по модели идеального газа. В литературе [11–13, 16] опубликованы экспериментальные данные о зарегистрированных случаях наблюдения состояний в виде скачков уплотнения, подобных ударным волнам в идеальном газе.

В любых устройствах, в которых происходит течение жидкости и пара в противоположных направлениях, на межфазных границах возникают касательные напряжения, тормозящие оба потока. При высокой скорости и встречном движении потоков один из них может прекратить движение и даже начать двигаться в обратном направлении. Момент возникновения такой ситуации определяется по критерию Вебера [13]

$$We = (\rho v^2 d)/(\sigma) > 1,$$

где d — ширина канавки фитиля.

Это явление создает дополнительное сопротивление, ограничивающее капиллярный напор в тепловой трубе, и максимальный теплоперенос. Его можно использовать для создания механического насоса дополнительно к капиллярному. Для этого вносятся изменения в конструкцию ТТ и создается спутное течение пара и жидкости. Идея подобной реконструкции появилась в результате изучения структуры парового потока в ТТ. Поскольку реальные границы в потоке создают вихревые структуры, то спутное течение в конденсаторе может осуществляться путем введения циркуляционного контура в конденсатор. Подобная схема предложена в работе [3]. Энергия парового потока в такой схеме течения передается жидкой фазе путем влияния касательных напряжений в открытых капиллярных канавках. Механический насос, созданный подобным образом, дополнительно к капиллярному, высокоэффективен. Согласно одной оценке [1], работа, совершаемая в контуре, значительно превышает работу капиллярных сил. Другие оценки [13] показывают, что изменение знака касательных напряжений повышает расход жидкого теплоносителя в 6 раз.

Применение массовых сил для реконструкции тепловых труб. При вращении всего устройства [17] вокруг оси симметрии возникает поле центробежных сил. Изменение угла наклона внутренней поверхности к оси вращения его основных элементов (испарителя, конденсатора и др.) позволяет управлять полями массовых сил в разных частях всего устройства. При вертикальном расположении оси ТТ можно частично или полностью скомпенсировать гравитационные силы. Массовые силы могут полностью заменить

капиллярные. Кроме того, происходит дегазация теплоносителя, что улучшает его качество и смещает в сторону высоких температур эффект Лейденфроста.

Экспериментальным путем выявлены возростание коэффициента тепло- и массообмена и возникновение сепарационного эффекта, способствующие удалению зародышей жидкой фазы из потока и прекращающие рост капель. Вследствие этого происходит равномерное распределение потока конденсирующейся (или испаряющейся) фазы на теплообменные поверхности. При этом вращение интенсифицирует внутренний и внешний теплообмен.

В абсорбционных холодильных машинах важным элементом является абсорбер. В традиционных холодильных машинах он выполняется в виде сосуда-сборника крепкого раствора бинарной смеси хладагента и абсорбента. Абсорбер можно выполнить в виде пористого тела с каналами для перетока бинарной смеси между областями с разной пористостью. При вращении такого абсорбера вокруг оси *вихревого теплообменника для производства тепла и холода* (ВТТХ), можно осуществить запланированный перенос бинарной смеси в разные его участки, например, осуществить перенос из оребренной поверхности пористого тела, обращенной к капиллярной поверхности испарителя морозильной камеры, в пористое тело — сборник крепкого раствора [18–20]. Природа такого конвективного переноса объясняется действием центробежных сил: давление жидкости во внешних слоях больше, чем во внутренних. Непрерывное обновление раствора в пористых слоях, обращенных к открытым межфазным поверхностям фитиля испарительной камеры, происходит на малом расстоянии. В этом случае можно рассчитывать на высокую эффективность переноса испаряющейся массы хладагента в тело пористого абсорбера.

При быстром вращении ВТТХ возможен выброс капель из пористого тела абсорбера морозильной камеры, тогда рассматривается применение сепаратора, состоящего из набора изогнутых пластин и выполняющего роль дефлегматора.

Выбор теплоносителя для вихревого теплообменника для производства тепла и холода. Создать холодильную машину можно в виде двух разновидностей: 1) парожеторной (пароструйной); 2) абсорбционной. В холодильной машине выбор теплоносителя обусловлен температурой, которую необходимо создать для хранения продуктов. В парожеторных машинах применяются легкокипящие теплоносители: вода, аммиак, фреон и др. Вода является хорошим хладагентом вследствие высокой теплоты испарения — в 2 раза выше аммиака.

В абсорбционных холодильных машинах используются бинарные смеси. Они состоят из хладагента (воды, аммиака) и абсорбента (бромистого лития, воды).

Абсорбционные холодильные машины выгоднее с точки зрения энергозатрат, поскольку абсорбент активно поглощает пары легкокипящего компонента с более низкой температурой при том же давлении [10, 21–24].

Компоненты на основе воды и бромистого лития безвредные и используются в системе кондиционирования зданий.

Построение новых схем холодильных машин.

Современные холодильные машины выполнены из элементов различного назначения. Они разнесены в пространстве и соединены между собой трубопроводами. В итоге готовое изделие имеет большие габариты и массу. Опыт создания тепловых труб позволяет использовать его для создания компактных холодильных машин различного назначения [21–23]. Рассмотрим схемы существующих холодильных машин (рис. 1, 2). [2].

Тепловые трубы можно использовать для построения новых схем холодильных машин. В качестве насоса жидкой фазы в этом случае выступают: капиллярные силы, тепловые ресурсы парового потока, массовые силы от полей сил тяжести и центробежных сил.

Из всего многообразия принципиальных схем холодильных машин рассмотрим принципиальные схемы пароструйной (эжекторной) и абсорбционной машин, а также их основные элементы и принцип работы.

Производство холода в них основано на испарении хладагента в морозильной камере. Процесс испарения в пароструйной (эжекторной) холодильной машине создается путем понижения давления над межфазной поверхностью хладагента, в абсорбционной — путем поглощения паров хладагента в процессе абсорбции.

Реализация парозжекторной холодильной машины на основе тепловой трубы. В схеме (рис. 3) реализован опыт построения тепловой трубы с использованием эксергетических ресурсов парового потока для создания механического насоса дополнительно к капиллярному.

Устройство работает следующим образом. При подводе тепла к испарителю (3) хладагент испаряется и давление в нем повышается. Паровой поток ускоряется в сопловом аппарате эжектора (4) и совершает работу по отсосу паров из испарительной камеры (7). Этот процесс понижает давление в испарительной камере холодильника (7) и ускоряет тепло- и массоперенос на межфазной поверхности фитиля. Холодопроизводительность ВТТХ зависит от расхода испаряющегося в морозильной камере хладагента. Далее паровой

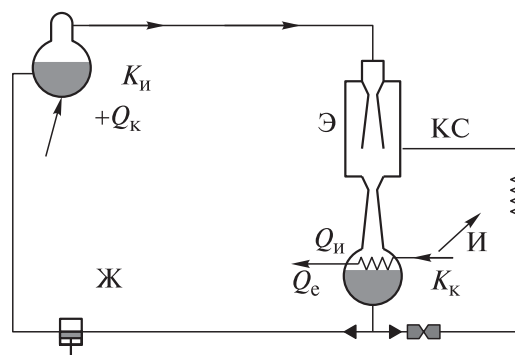


Рис. 1. Принципиальная схема парозжекторной холодильной машины: К_к — кипятильник; Э — эжектор; К/С — камера смешения; И — испаритель; К_и — конденсатор; Ж — насос абсорбера; +Q_к — теплоподвод к кипятильнику; Q_и — теплоподвод к испарителю; Q_е — теплоотвод из конденсатора

Fig. 1. Schematic diagram of a steam-ejector refrigerating machine: К_к — boiler; Э — ejector; К/С — mixing chamber; И — evaporator; К_и — condenser; Ж — absorber pump; +Q_к — heat supply to the boiler; Q_и — heat supply to the evaporator; Q_е — heat sink from the condenser

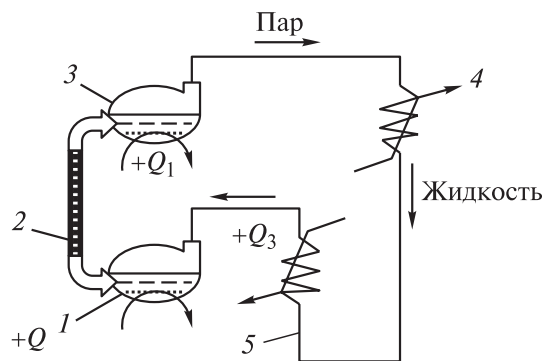


Рис. 2. Принципиальная схема абсорбционной холодильной машины: 1 — абсорбер; 2 — насос; 3 — генератор; 4 — конденсатор; 5 — испаритель

Fig. 2. Schematic diagram of the absorption refrigerating machine: 1 — absorber; 2 — pump; 3 — generator; 4 — condenser; 5 — evaporator

поток, содержащий пары хладагента, извлеченные из испарителя и основного потока, движутся в конденсатор.

В конце конденсатора располагается устройство, выполненное в соответствии с экспериментально выявленными границами вихревой структуры в торце тепловой трубы [2]. В начале конденсатора имеется второй эжектор. Он служит для формирования вихревой структуры и получения спутного потока пара и жидкости. Капиллярная структура в конденсаторе выполнена в виде канавок, заполненных жидким хладагентом с открытой межфазной поверхностью. Часть энергии парового потока совершает работу по перекачиванию хладагента подобно капиллярному насосу. Конденсированная фаза дросселируется через пористую вставку

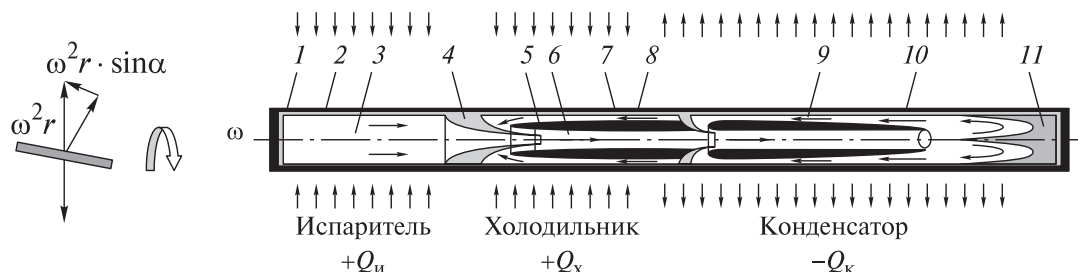


Рис. 3. Принципиальная схема модифицированной тепловой трубы с холодильным эффектом: 1 — корпус; 2 — фитиль; 3 — испаритель; 4 — сопло эжектора; 5 — осесимметричная вставка; 6 — камера смешения; 7 — испаритель холодильника; 8 — холодильная камера; 9 — канал конденсатора; 10 — капиллярные канавки специальной формы; 11 — диффузор; стрелками показано направление движения пара; стрелкой показано направление вращения корпуса тепловой трубы для создания массовых сил; $\omega = (2\pi n)/60$; α — угол между осью тепловой трубы и поверхностью фитиля

Fig. 3. Principle scheme of the modified heat pipe with refrigeration effect: 1 — body; 2 — wick; 3 — evaporator; 4 — ejector nozzle; 5 — axisymmetric insert; 6 — mixing chamber; 7 — refrigerator evaporator; 8 — refrigeration chamber; 9 — condenser channel; 10 — capillary grooves of special shape; 11 — diffuser; arrows show the direction of vapour movement; arrow shows the direction of heat pipe body rotation to create mass forces; $\omega = (2\pi n)/60$; α — angle between the heat pipe axis and the wick surface

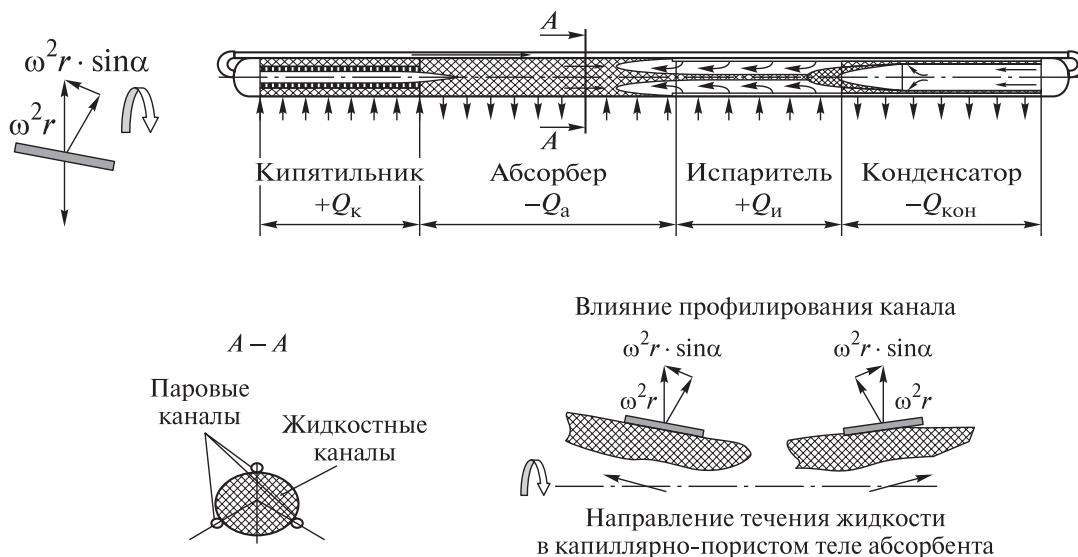


Рис. 4. Схема абсорбционной холодильной машины на базе тепловой трубы (стрелкой показано направление вращения)

Fig. 4. Scheme of the absorption refrigerating machine based on heat pipe (arrow shows the direction of heat pipe body rotation)

в испаритель морозильной камеры. Одна часть поступившего хладагента испаряется и создает холодильный эффект, другая — используется эжектором, третья — через пористую вставку первого эжектора (4) поступает в основной испаритель (3).

Построение абсорбционной холодильной машины на базе тепловой трубы. Схема ВТХ (рис. 4) обладает дополнительными полезными свойствами:

1) обводные каналы передают пары хладагента мимо горячей зоны абсорбера;

2) часть абсорбера выводится из зоны нагрева и частично охлаждается парами хладагента, завершившими холодильный цикл;

3) в обводные каналы можно включить дефлегматор для очистки паров от капель жидкости (этот элемент обычно есть в схемах бытовых абсорбционных холодильников).

Дефлегматор — устройство, предназначенное для точного разделения фракций в процессе перегонки путем их охлаждения. Длина царги сравнима с длиной ТТ. Однако встраивание дефлегматора в данную схему требует вертикального расположения ТТ, а также создания емкости — сборника жидкой фракции в нижней части устройства (на рис. 3 он не указан).

Недостаток схемы (см. рис. 4) заключается в том, что обводные каналы должны быть размещены за пределами корпуса ТТ и иметь хорошую

теплоизоляцию. Но это неудобство можно решить компромиссно, без серьезного ущерба для ХМ.

Устройство абсорбера. Абсорбер (см. рис. 4) состоит из трех частей, расположенных вдоль тепловой трубы последовательно: 1 — кипятильник абсорбера $+Q$; 2 — охлаждаемая часть абсорбера; $-Q$; 3 — испаритель (элемент морозильной камеры) — поглощает тепло охлаждаемых продуктов $+Q$. Изображенный на рис. 4 элемент, обозначенный как конденсатор, не относится к абсорберу. Его функция заключается в охлаждении и конденсации паров хладагента, а жидкая фаза выводится через пористую вставку в испаритель морозильной камеры.

Все части абсорбера выполняются в виде пористого тела. Часть объема в кипятильнике предназначена для сбора бинарной смеси и изготовлена в виде зерен с крупной пористостью. Она должна иметь плотный термический контакт с корпусом. Обращенная внутрь часть пористого тела выполнена в виде ребер с мелкой пористостью. Это необходимо для исключения выброса мелких капель в паровой поток при высоких тепловых нагрузках.

В массивном теле пористого абсорбера при вертикальном расположении и вращении его вокруг оси ВТТХ возникают циркуляционные зоны за счет действия массовых сил. На рис. 5 показаны эта область и направление движения бинарной смеси [19, 20, 25].

В данную область увлекается обедненная смесь из испарителя морозильной камеры и переносится в кипятильник. Подведенное тепло расходуется на испарение хладагента. Далее его пары передаются через обводные каналы в конденсатор, где при отводе тепла превращаются в жидкость. Таким образом, завершается цикл работы абсорбционной ВТТХ.

Объединение парозжекторной и абсорбционной холодильных машин. Рассмотренные выше схемы (см. рис. 1–5) содержат одинаковые по своему назначению части, но выполненные по-разному — это испаритель, холодильник и конденсатор. Целесообразно рассмотреть объединение этих схем для получения нового качества. В этих целях необходимо осуществить следующие работы:

- 1) выполнить осесимметричные вставки в испарителе и холодильнике из пористого материала;
- 2) пропитать их бинарной смесью;
- 3) объединить каналами для протока хладагента;
- 4) выполнить в испарителе абсорбер (см. рис. 6, б) с большой развитой поверхностью (оребреной) и открытой пористостью;
- 5) обеспечить закрытую пористость внутренней поверхности, образующей канал эжектора.

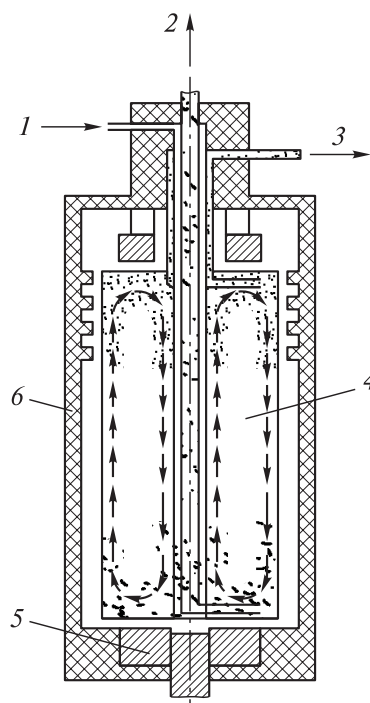


Рис. 5. Возникновение циркуляционных зон в абсорбере при вращении тепловой трубы: 1 — подача смеси; 2 — обогащенная фракция; 3 — обедненная фракция; 4 — циркуляционная зона; 5 — электродвигатель; 6 — корпус

Fig. 5. Example of the occurrence of circulation zones in the absorber during the rotation of the heat pipe: 1 — supply of the mixture; 2 — enriched fraction; 3 — depleted fraction; 4 — circulation zone; 5 — electric motor; 6 — housing

Тогда одновременно будут происходить два процесса: испарение, стимулированное эжектором, и поглощение, стимулированное абсорбером. При их совместной работе можно достичь значительного увеличения расхода хладагента в испарительной камере холодильника.

Осесимметричная вставка в конденсаторе (на рис. 6 не показана) может быть выполнена по схеме, изображенной на рис. 3. В данной схеме она не имеет принципиального значения, ее введение в контур конденсатора определяется расчетным путем. При положительной оценке она будет выполнять две функции: создавать спутные потоки пара в конденсаторе, охлаждать и ускорять поток хладагента движущегося к испарительной камере 5 (морозильнику). При вращении ТТ вокруг оси в пористых телах обеих вставок возникнет циркуляция бинарной смеси в соответствии с влиянием массовых сил от вращения ТТ (см. рис. 6). Циркуляция возникает между слоями по-разному удаленных от оси вращения. Поскольку каналы соединяются со сборником абсорбера испарителя, который нагревается тепловым источником, происходит завершение циркуляции хладагента. Так происходит цикл новой модернизированной ХМ — (ВТТХ).

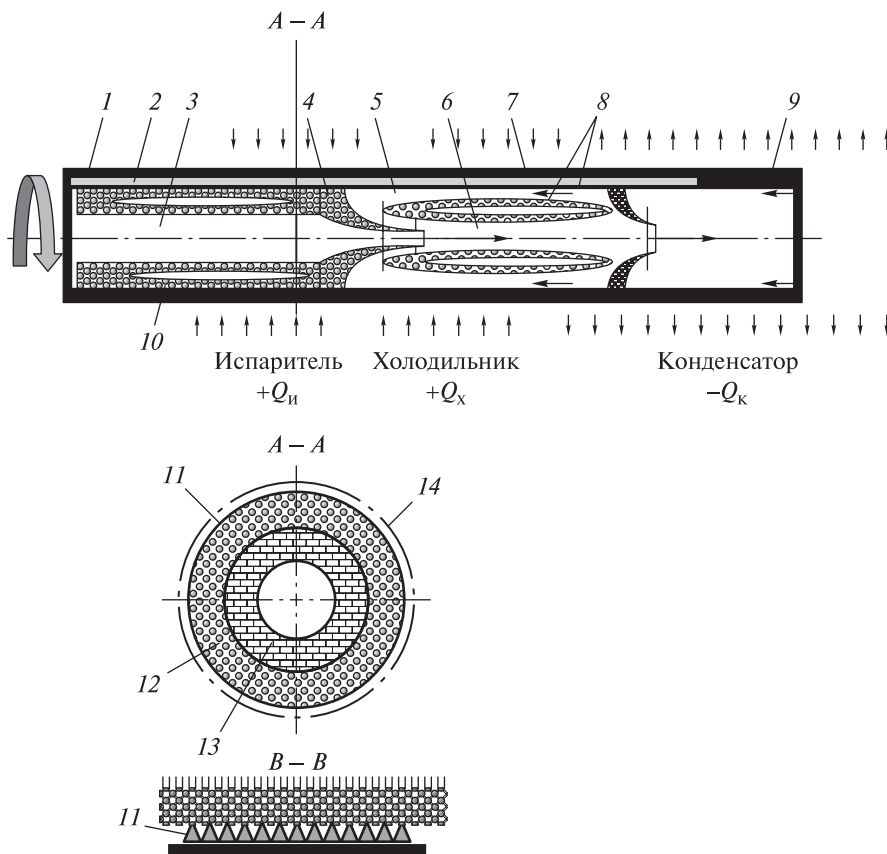


Рис. 6. Схема модифицированной тепловой трубы с холодильным эффектом: 1 — корпус; 2 — фитиль; 3 — испаритель; 4 — сопло эжектора; 5 — корпус морозильной камеры; 6 — камера смешения; 7 — испаритель холодильника; 8 — области циркуляции бинарной смеси; 9 — конденсатор; 10 — корпус испарителя; 11 — фитиль; 12 — пористое тело абсорбера; 13 — ребра теплообменника абсорбера; 14 — камера абсорбера; 15 — конструкция подложки фитиля

Fig. 6. Scheme of the modified heat pipe with refrigerating effect: 1 — body; 2 — wick; 3 — evaporator; 4 — ejector nozzle; 5 — freezer body; 6 — mixing chamber; 7 — refrigerator evaporator; 8 — binary mixture circulation areas; 9 — condenser; 10 — evaporator body; 11 — wick; 12 — absorber porous body; 13 — absorber heat exchanger ribs; 14 — absorber chamber; 15 — wick substrate construction

Результаты объединения схем вихревого теплообменника для производства тепла и холода.

Холодопроизводительность устройств зависит от расхода хладагента в испарительной камере (морозильнике). В парозежекторной ХМ (см. рис. 1) это обеспечивается работой эжектора, в абсорбционной машине — процессом поглощения паров хладагента (см. рис. 2).

В новой схеме (см. рис. 6) расход хладагента совмещается в одной испарительной камере. Эти процессы не являются антагонистами. Совместное протекание их увеличивает расход хладагента и, следовательно, холодопроизводительность ВТТХ.

Вращение тепловой трубы создает поле массовых сил. Профилирование канала изменением угла раскрытия каждой из камер и вращением создают циркуляционные зоны (см. рис. 6, 8) в пористых телах абсорбера. Обновление бинарной

смеси в пористых телах значительно повышает эффективность массообмена. Для повышения площади испарения (см. рис. 6, 13) или поглощения (см. рис. 6, 5) соответственно пористые тела абсорберов снабжены пластинками, изготовленными из того же материала (см. рис. 6). Фитиль абсорбера испарителя предлагается выполнить по принципу обратно-менискового испарения. Такой фитиль используется в тепловых трубах при высоких удельных тепловых нагрузках порядка 10^4 Вт/м². При таких нагрузках жидкость из каналов вытесняется в пористое тело и мениски переворачиваются в сторону падающего потока.

Обзор современных схем абсорбционных холодильных машин. Холодильная техника на основе процессов абсорбции имеет преимущества и недостатки. Рассмотрим их [18, 21–24, 28].

К преимуществам можно отнести полную бесшумность, поскольку нет вращающихся и

трущихся узлов, в 2 раза меньшее потребление электроэнергии (по сравнению с компрессорными), длительный срок службы, разнообразие моделей по габаритам, объему камер. При этом газовые (или керосиновые) версии абсорбционных холодильных машин еще более экономичны и пригодны для применения в полевых условиях. Тем не менее абсорбционная техника уступает компрессорной по холодопроизводительности на единицу объема. Эффективность охлаждения у них зависит от положения корпуса в пространстве. При наклоне ХМ может прекратить работу. Кроме того, эти машины отличаются высокой стоимостью при одинаковой вместительности холодильной камеры по сравнению с компрессорными аналогами.

Разработанные схемы вихревых тепловых труб для производства тепла и холода отличаются следующими преимуществами:

- компактностью;
- малой массой;
- малым потреблением электроэнергии (она требуется только на вращение);
- потреблением тепла от любых источников;
- сохранением работоспособности при посторонних воздействиях: вибрации, ориентации в пространстве, ускорениях;
- возможностью увеличения производительности холода путем сборки в одной холодильной машине нескольких тепловых труб (от двух и более);
- возможностью массового производства в связи с простотой комплектующих деталей.

В качестве недостатка отметим необходимость защиты от шума при вращении.

Утилизации тепла двигателя внутреннего сгорания. Современные двигатели внутреннего сгорания (ДВС) имеют КПД не более 37 %, поэтому ВТТХ целесообразно использовать для утилизации выхлопных газов ДВС на рефрижераторах. При вертикальном расположении ВТТХ легко «вписываются» в схему рефрижератора для выработки холода, охлаждения продуктов питания при перевозке на дальние расстояния. Использование элементов ВТТХ в этих целях практически совпадает с использованием современных рефрижераторов (рис. 7).

Оценка теплофизических качеств разработанного вихревого теплообменника для производства тепла и холода. Теплообменники на основе испарительно-конденсационного цикла тепловой трубы представляют собой термодинамически неравновесную систему. Рост удельных тепловых нагрузок сопровождается вторжением рабочего тела вглубь области метастабильного состояния. При этом повышается значение процессов гомогенной нуклеации флуктуационного

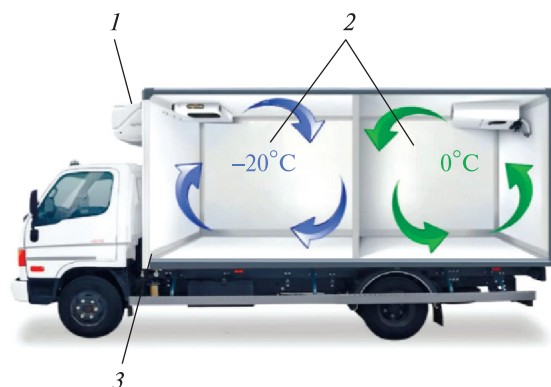


Рис. 7. Схема расположения теплообменников в современных рефрижераторах: 1 — конденсатор; 2 — испаритель; 3 — абсорбер

Fig. 7. Scheme of heat exchangers arrangement in modern refrigerators: 1 — condenser; 2 — evaporator; 3 — absorber

происхождения. Они обеспечивают протекание таких динамических явлений, как взрывообразное вскипание теплоносителя, неустойчивость межфазных границ, спонтанную гомогенно-гетерогенную объемную конденсацию в паровом потоке. Влияние этих процессов можно значительно ослабить изменением схемы парожидкостного тракта и конструкции фитилей, а также воздействием на рабочую среду полями различной физической природы.

Концепция построения новых принципиальных схем устройств для утилизации низкопотенциальных тепловых ресурсов заключается в выполнении следующих условий:

- 1) в организации спутных струй пара и жидкого теплоносителя во всех зонах теплообмена;
- 2) использовании эксергетических ресурсов парового потока в конденсаторе для преобразования кинетической энергии пара в дополнительный (к капиллярному) движущийся перепад давления в жидкости в результате влияния касательных напряжений на межфазной поверхности в открытых капиллярных канавках;
- 3) использовании полей массовых сил от гравитации и вращения устройства вокруг оси для получения дополнительного (к капиллярному) движущего перепада давления в жидкости;
- 4) введении в паровой тракт бинарных смесей для получения цикла абсорбционной холодильной машины;
- 5) использовании влияния электрических полей на интенсификацию процессов тепло- и массообмена в конденсаторе;
- 6) применении конструкции фитиля по принципу обратно-менискового испарения.

Перечислим основные преимущества разработанного ВТТХ:

- 1) отсутствие зависимости от направления вектора гравитационного поля;

2) отсутствие существенных ограничений по габариту и массе;

3) отсутствие зависимости режима работы от влияния электромагнитных полей, радиации, вибрации;

4) зависимость производительности холода только от внешних тепловых источников;

5) малое потребление электроэнергии, так как она, в основном, требуется только на вращение;

6) теплоподведение от внешнего источника, например от излучения солнца, сгорания топлива, геотермальных источников и т. д.;

7) возможность изготовления малогабаритных изделий для нужд бытовой техники: холодильников, систем кондиционирования, туристического оборудования, микроэлектроники и др.;

8) использование в труднодоступных удаленных местах при отсутствии источников электричества в качестве термосифона для замораживания грунта [29, 30];

9) возможность использования в качестве теплового насоса для обогрева бассейнов, зданий, а также в качестве кондиционеров для охлаждения помещений.

Выводы

Доказана возможность создания холодильной машины на основе испарительно-конденсационного цикла тепловой трубы. В данном устройстве в одном парожидкостном тракте совмещены процессы, происходящие в цикле работы холодильной машины. Благодаря этому устройство имеет небольшие габариты и массу, высокие теплофизические и потребительские качества. Использование ВТТХ целесообразно в различных технологических процессах, а также для утилизации тепловых ресурсов.

Список литературы

[1] Васильев Л.Л. Тепловые трубы для нагрева и охлаждения грунта // Инженерно-физический журнал, 1987. Т. 52. № 4. С. 676–687.

[2] Патент № 2031347 Российская Федерация, 6F 28 D 1502. Тепловая труба / В.Н. Харченко и др. № 4949383/06; опубл. 20.03.95, Бюл. № 8. 5 с.

[3] Афанасьев А.С., Полушкин В.М., Соболев В.А., Суслов В.М., Котов Ю.Т., Знаменская Т.Д. Влияние внешней воздействующей вибрации на микроэлектромеханические системы-акселерометры // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2019. Т. 23. № 5. С. 138–143.

[4] Ван Ойен Х., Хогендорн К.Дж. Расчеты течения пара в плоской тепловой трубе // Ракетная техника и космонавтика, 1979. Т. 17. № 11. С. 122–132.

[5] Шифрин К.С., Голиков В.И. Определение спектра капель методом малых углов // Труды 6-й межведомственной конференции по исследованию облаков, осадков и грозового электричества АН СССР, 1960. С. 2–33

[6] Hannes H. Inerferometrische Messung der thermischen Energie von elektrischen Funken // Forschung auf dem Gebiet des Ingenieurwesens A, 1963, no. 29, pp. 169-175.

[7] Варапаев В.Н., Ягодкин В.И. Об устойчивости течения в каналах с проницаемыми стенками // Механика жидкости и газа, 1969. № 5. С. 91–95.

[8] Варапаев В.Н. Течение вязкой жидкости в начальном участке плоского канала с пористыми стенками // Механика жидкости и газа, 1969. № 4. С. 179–181.

[9] Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1969. С. 31–32.

[10] Шульц А.Н. Определение энтальпии неравновесного парового потока // Труды 4-й Рос. нац. конф. по теплообмену. Москва, 23–27 октября 2006 г. Т. 5. М.: Изд-во МЭИ, 2006. С. 329–332.

[11] Павлов П.А. Динамика вскипания сильно перегретых жидкостей / под ред. В.П. Скрипова. Свердловск: Изд-во АН СССР, 1988. 243 с.

[12] Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкости. М.: Изд-во АН СССР, 1945. С. 4–29

[13] Хуфшмидт В., Бурк Е., Кола Г., Хофман Г. Влияние касательных напряжений, возникающих при движении пара, на ламинарный поток жидкости в капиллярах тепловых труб // Тепловые трубы. М.: Мир, 1972. 203 с.

[14] Воропаев В.Н., Ягодкин В.И. Об устойчивости некоторых непараллельных течений вязкой несжимаемой жидкости в канале // Механика жидкости и газа, 1970. Вып. № 4. С. 125–129.

[15] Дейч М.Е., Филиппов Г.А. Газодинамика двухфазных сред. М.: Энергия, 1968. 423 с.

[16] Пожилов А.А., Зайцев Д.К., Смирнов Е.М., Смирновский А.А. Численное моделирование тепломассопереноса в трехмерной модели испарителя контурной тепловой трубы // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки, 2017. Т. 10. № 3. С. 52–63. DOI: 10.18721/JPM/10305

[17] Ponapan R., Leland J.E. Rotating heat pipe for cooling of rotor in advanced generators // 6th Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference, 1994, no. 6, pp. 1–10. DOI:10.2514/6.1994-2033

[18] Бараненко А.В., Бухарин Н.Н., Пекарев В.И., Сакур И.А. Холодильные машины / под ред. Л.С. Тимофеевского. СПб.: Политехника, 1997. 992 с.

[19] Геннадий Соловьев «Наша центрифуга нужна американцам» // Атомная энергия, 11 июня 2011. URL: <https://www.atomic-energy.ru/interviews/2015/05/06/23342> (дата обращения 02.10. 2022).

[20] Мастеров В.Б., Глебов А.А., Краснородько А.Б., Батеев С.В. Концептуальный подход к анализу риска использования ядерных материалов в неэнергетических целях // Эффективное антикризисное управление, 2012. № 5 (74). С. 92

[21] Саткевич А.А. Абсорбционная холодильная установка. Л.: Транспечать, 1930. 112с.

[22] Бадилькес И.С. Рабочие вещества холодильных машин. М.: Пищепромиздат, 1952. С. 228.

[23] Бадилькес И.С. Рабочие вещества и процессы холодильных машин. М.: Госторгиздат, 1962. С. 30–184.

[24] Бошнякович Ф. Техническая термодинамика, Ч. II. М.; Л.: Госэнергонздат, 1956. С. 20–42.

[25] Смирнов А.Ю., Гусев В.Е., Сулаберидзе Г.А., Невиница В.А., Фомиченко П.А. Анализ влияния ограничений по изотопам ²³², ²³⁴, ²³⁶U в товарном НОУ на выбор способов обогащения регенерата урана в каскадах центрифуг // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов, 2020. № 1. С. 87–96.

[26] Галка Г.А., Стрельцов А.В. Теоретический обзор авторефрижераторов и режимов их работы // Молодой ученый, 2018. № 31 (217). С. 7–11.

[27] Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 1971. 22 с.

- [28] Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. Авт. Свидетельство № 124063 от 24.08.1969. С. 4–8.
- [29] Fukuda M., Tsuchiya F., Ryokai K., Mochizuki M., Mashiko K. Development of artificial permafrost storage using heat pipes // The 3rd International Heat Pipe Symposium. Tsukuba, 1988, pp. 285–289.
- [30] Шульц А.Н. Мониторинг низкопотенциальных тепловых ресурсов и решение проблем их утилизации // Труды III РНКТ. М.: Изд-во МЭИ, 2002. С. 131–133.

Сведения об авторе

Шульц Александр Николаевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Высшая математика и физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), shults@mail.ac.ru

Поступила в редакцию 18.07.2023.

Одобрено после рецензирования 13.09.2023.

Принята к публикации 20.10.2023.

VORTEX HEAT EXCHANGER FOR HEAT AND COLD GENERATION

A.N. Shults

BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

shultslek@mail.ru

The possibility of creating a refrigerating machine based on the evaporation-condensation cycle, which uses the physical processes of an absorption refrigerating machine and a heat pipe, is considered. The experience gained in the field of heat and mass transfer research when starting TT from the frozen state of the coolant is used in the work. Vortex structures in the steam channel are revealed, creating real boundaries within which the formation of a non-stationary vapor-droplet flow occurs. The flow of wet steam occurs under the influence of vortex structures that vary in intensity and direction of rotation. The design scheme of the hydrodynamic flow pattern should use a two-phase flow model and real boundaries created by vortex structures.

Keywords: evaporation, condensation, refrigerator, heat pipe, absorption, vortex

Suggested citation: Shults A.N. *Vikhreвой teploobmennik dlya proizvodstva tepla i kholoda* [Vortex heat exchanger for heat and cold generation]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 6, pp. 189–198. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-6-189-198

References

- [1] Vasil'ev L.L. *Teplovye trubyy dlya nagreva i okhlazhdeniya grunta* [Heat pipes for heating and cooling the soil]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal* [Engineering and Physical J.], 1987, t. 52, no. 4, pp. 676–687.
- [2] Patent № 2031347 RF, 6F 28 D 1502. *Teplovaya truba* [Heat pipe]. V.N. Kharchenko et al. RF no. 4949383 06, publ. 20.03.95, bull. no. 8, 5 p.
- [3] Afanasev A.S., Polushkin V.M., Sobolev V.A., Suslov V.M., Kotov Y.T., Znamenskaya T.D. *Vliyaniye vneshney vozdeystviyushchey vibratsii na mikroelektromekhanicheskie sistemy-akselerometriy* [Influence of external vibration on microelectromechanical converters of linear acceleration]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2019, vol. 23, no. 5, pp. 138–143. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-5-138-143
- [4] Van Oyen X., Khogendorff K.Dzh. *Raschety techeniya para v ploskoy teplovoy trube* [Calculations of steam flow in a flat heat pipe]. *Raketnaya tekhnika i kosmonavtika* [Rocket technology and cosmonautics], 1979, v. 17, no. 11, pp. 122–132.
- [5] Shifrin K.S., Golikov V.I. *Opredeleniye spektra kapel' metodom malyykh uglov* [Determination of the spectrum of droplets by the small angle method]. *Trudy 6-y mezhvedomstvennoy konferentsii po issledovaniyu oblakov, osadkov i grozovogo elektrichestva AN SSSR* [Proceedings of the 6th Interdepartmental Conference on the Cloud Research, Precipitation and Thunderstorm Electricity of the USSR Academy of Sciences], 1960, pp. 2–33.
- [6] Hannes H. *Inferometrische Messung der thermischen Energie von elektrischen Funken*. *Forschung auf dem Gebiet des Ingenieurwesens A*, 1963, no. 29, pp. 169–175.
- [7] Varapaev V.N., Yagodkin V.I. *Ob ustoychivosti techeniya v kanalakh s pronitsaemymi stenkami* [On the stability of flow in channels with permeable walls]. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Mechanics of liquid and gas], 1969, no. 5, pp. 91–95.
- [8] Varapaev V.N. *Techeniye вязкой жидкости в начальной части плоского канала с пористыми стенками* [Flow of a viscous fluid in the initial section of a flat channel with porous walls]. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Mechanics of liquid and gas], 1969, no. 4, pp. 179–181.
- [9] Abramovich G.N. *Prikladnaya gazovaya dinamika* [Applied gas dynamics]. Moscow: Nauka, 1969, pp. 31–32.
- [10] Shul'ts A.N. *Opredeleniye ental'pii neravnovesnogo parovogo potoka* [Determination of the enthalpy of a nonequilibrium steam flow]. *Trudy 4-y Ros. nats. konf. po teploobmenu* [Proceedings of the 4th Ros. national conf. on heat exchange]. Moscow, October 23–27, 2006. Moscow: MPEI, 2006, t. 5, pp. 329–332.

- [11] Pavlov P.A. *Dinamika vskipaniya sil'no peregretykh zhidkostey* [Dynamics of boiling of highly superheated liquids]. Ed. V.P. Skripova. Sverdlovsk: USSR Academy of Sciences, 1988, 243 p.
- [12] Frenkel' Y.I. *Kineticheskaya teoriya zhidkosti* [Kinetic theory of liquid]. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1945, pp. 4–29.
- [13] Khufshmidt V., Burk E., Kola G., Khofman G. *Vliyaniye kasatel'nykh napryazheniy, vznikayushchikh pri dvizhenii para, na laminarnyy potok zhidkosti v kapillyarakh teplovykh trub* [The influence of tangential stresses arising during the movement of steam on the laminar flow of liquid in the capillaries of heat pipes]. *Teplovye trubyy* [Heat Pipes]. Moscow: Mir, 1972, 203 p.
- [14] Voropaev V.N., Yagodkin V.I. *Ob ustoychivosti nekotorykh neparallelnykh techeniy vyazkoy neszhimaemoy zhidkosti v kanale* [On the stability of some non-parallel flows of a viscous incompressible fluid in a channel]. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Mechanics of Liquid and Gas], 1970, no. 4, pp. 125–129.
- [15] Deych M.E., Filippov G.A. *Gazodinamika dvukhfaznykh sred* [Gas dynamics of two-phase media]. Moscow: Energy, 1968, 423 p.
- [16] Pozhilov A.A., Zaytsev D.K., Smirnov E.M., Smirnovskiy A.A. *Chislennoe modelirovaniye teplomassoperenosa v trekhmernoy modeli isparitelya konturnoy teplovoy trubyy* [Numerical modeling of heat and mass transfer in a three-dimensional model of a loop heat pipe evaporator]. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPBGPU. Fiziko-matematicheskie nauki* [Scientific and Technical Journal of St. Petersburg State Polytechnic University. Physics and Mathematics], 2017, v. 10, no. 3, pp. 52–63. DOI: 10.18721/JPM/10305
- [17] Ponapan R., Leland J.E. Rotating heat pipe for cooling of rotor in advanced generators. 6th Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference, 1994, no. 6, pp. 1–10. DOI:10.2514/6.1994-2033
- [18] Baranenko A.V., Bukharin N.N., Pekarev V.I., Sakun I.A. *Kholodil'nye mashiny* [Refrigerating machines]. Ed. L.S. Timofeevsky. St. Petersburg: Politekhnik, 1997, 992 p.
- [19] Solov'ev G. *Nasha tsentrifuga nuzhna amerikantsam* [Americans need our centrifuge]. *Atomnaya energiya* [Atomic Energy], June 11, 2011. Available at: <https://www.atomic-energy.ru/interviews/2015/05/06/23342> (accessed 02.10.2022).
- [20] Masterov V.B., Glebov A.A., Krasnoborod'ko A.B., Bateev S.V. *Kontseptual'nyy podkhod k analizu riska ispol'zovaniya yadernykh materialov v neenergeticheskikh tselyakh* [Conceptual approach to analyzing the risk of using nuclear materials for non-energy purposes]. *Effektivnoe antikrizisnoe upravlenie* [Effective anti-crisis management], 2012, no. 5 (74), p. 92
- [21] Satkevich A.A. *Absorbtsionnaya kholodil'naya ustanovka* [Absorption refrigeration unit]. Leningrad: Transpechat, 1930, 112 p.
- [22] Badyl'kes I.S. *Rabochie veshchestva kholodil'nykh mashin* [Working substances of refrigeration machines]. Moscow: Pishchepromizdat, 1952, p. 228.
- [23] Badyl'kes I.S. *Rabochie veshchestva i protsessy kholodil'nykh mashin* [Working substances and processes of refrigeration machines]. Moscow: Gostorgizdat, 1962, pp. 30–184.
- [24] Boshnyakovich F. *Tekhnicheskaya termodinamika* [Technical thermodynamics], Part II. Moscow–Leningrad: Gosenergonzdat, 1956, pp. 20–42.
- [25] Smirnov A.Yu., Gusev V.E., Sulaberidze G.A., Nevinita V.A., Fomichenko P.A. *Analiz vliyaniya ogranicheniy po izotopam 232, 234, 236U v tovarnom NOU na vybor sposobov obogashcheniya regenerata urana v kaskadakh tsentrifug* [Analysis of the influence of restrictions on 232, 234, 236U isotopes in commercial LEU on the choice of methods for enriching uranium reclaim in centrifuge cascades]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Fizika yadernykh reaktorov* [Questions of Atomic Science and Technology. Series: Physics of Nuclear Reactors], 2020, no. 1, pp. 87–96.
- [26] Galka G.A., Strel'tsov A.V. *Teoreticheskiy obzor avtorefrizheratorov i rezhimov ikh raboty* [Theoretical review of refrigerated trucks and their operating modes]. *Molodoy uchenyy* [Young scientist], 2018, no. 31 (217), pp. 7–11.
- [27] Kasatkin A.G. *Osnovnye protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii* [Basic processes and apparatuses of chemical technology]. Moscow: Chemistry, 1971, 22 p.
- [28] Kasatkin A.G. *Osnovnye protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii* [Basic processes and apparatuses of chemical technology]. Auto. Certificate no. 124063 dated 08/24/1969, pp. 4–8.
- [29] Fukuda M., Tsuchiya F., Ryokai K., Mochizuki M., Mashiko K. Development of artificial permafrost storage using heat pipes. The 3rd International Heat Pipe Symposium. Tsukuba, 1988, pp. 285–289.
- [30] Shults A.N. *Monitoring nizko-potentsial'nykh teplovykh resursov i reshenie problem ikh utilizatsii* [Monitoring of low-potential thermal resources and solving problems of their utilization]. *Tudy III RNKT* [Tudy III RNKT]. Moscow: Publishing house MPEI, 2002, pp. 131–133.

Author's information

Shul'ts Aleksandr Nikolaevich — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), shultsalek@mail.ru

Received 18.07.2023.

Approved after review 13.09.2023.

Accepted for publication 20.10.2023.