

Тепловые процессы в технике. 2022. Т. 14. № 10. С. 434–446
Thermal processes in engineering, 2022, vol. 14, no. 10, pp. 434–446

Обзорная статья
УДК 536.248; 621.566
DOI: 10.34759/tpt-2022-14-10-434-446

Двухфазные теплопередающие контуры

Л.Л. Васильев¹, Ю.Ф. Майданик²✉

¹ *Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Беларусь*

² *Институт теплофизики Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия*
maidanik@itp.uran.ru✉

Аннотация. Двухфазные теплопередающие контуры являются эффективными теплопередающими устройствами, работающими по замкнутому испарительно-конденсационному циклу и использующими капиллярные, гравитационные и пародинамические силы для обеспечения циркуляции теплоносителя. Они разделяются на два основных типа: контурные термосифоны и контурные тепловые трубы. И те, и другие являются пассивными устройствами, поскольку для их работы не используются какие-либо дополнительные источники энергии, кроме тех, которые являются источниками передаваемого тепла. К числу преимуществ двухфазных теплопередающих контуров относятся также высокая теплопередающая способность в сочетании с низким термическим сопротивлением, высокая надежность и рабочий ресурс, связанные с отсутствием механически подвижных компонентов, способность легко конфигурироваться и адаптироваться к различным условиям размещения и эксплуатации. В статье представлены основные условия работоспособности, конструктивные варианты, рабочие характеристики и примеры применения этих устройств в различных областях техники.

Ключевые слова: теплопередающие устройства, контурные термосифоны, контурные тепловые трубы, системы терморегулирования, теплоноситель, испарение, конденсация, утилизация энергии

Для цитирования. Васильев Л.Л., Майданик Ю.Ф. Двухфазные теплопередающие контуры // Тепловые процессы в технике. 2022. Т. 14. № 10. С. 434–446. DOI: 10.34759/tpt-2022-14-10-434-446

Original article

Two-phase heat transfer loops

L.L. Vasiliev¹, Yu.F. Maydanik²✉

¹ *A.V. Luikov Institute of Heat and Mass Transfer of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

² *Institute of Thermal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia*
maidanik@itp.uran.ru✉

Abstract. Two-phase loop thermosyphons and heat pipes are efficient heat transfer devices with high thermodynamic efficiency. Two-phase loop thermosyphons are used for cooling long objects (solar energy, mechanical engineering, food industry, electric transport, etc.). Loop heat pipes are ideal devices for cooling and thermal management of powerful and compact heat sources in terrestrial and space conditions (power electronics, laser and optical technology, etc.). Thus, these heat

transfer devices complement each other well. The review considers original devices, first created in Russia and the Republic of Belarus and protected by patents. The paper presents the basic equations defining the operation conditions of two-phase heat transfer loops, their operating characteristics, some design variants and examples of practical application both in terrestrial and space conditions.

Keywords: heat transfer devices, loop thermosyphons, loop heat pipes, thermal control systems, working fluid, evaporation, condensation, energy recovery

For citation. Vasiliev L.L., Maydanik Yu.F. Two-phase heat transfer loops. *Teplovye protsessy v tekhnike = Thermal processes in engineering*, 2022, vol. 14, no. 10, pp. 434–446. (In Russ.). DOI: 10.34759/tpt-2022-14-10-434-446

Введение

Двухфазные теплопередающие контуры (ДПК) являются эффективными теплопередающими устройствами, работающими по замкнутому испарительно-конденсационному циклу и использующими капиллярные, гравитационные и пародинамические силы для обеспечения циркуляции теплоносителя. ДПК разделяются на два основных типа: контурные термосифоны (КТС) и контурные тепловые трубы (КТТ). И те, и другие являются пассивными устройствами, поскольку для их работы не используются какие-либо дополнительные источники энергии, кроме тех, которые являются источниками передаваемого тепла. К числу преимуществ ДПК относятся также высокая теплопередающая способность в сочетании с низким термическим сопротивлением, высокие надежность и рабочий ресурс, связанные с отсутствием механически подвижных компонентов, способность хорошо конфигурироваться и адаптироваться к различным условиям размещения и эксплуатации. Эти устройства нашли применение в системах охлаждения электроники, терморегулирования космических аппаратов, утилизации солнечной энергии, теплообменном оборудовании различного назначения, автомобилях с электрическими или гибридными двигателями и имеют большой потенциал для применения в других отраслях техники.

Общей конструктивной особенностью ДПК является организация движения паровой и жидкой фаз теплоносителя по отдельным гладкостенным трубопроводам (паропроводу и конденсаторопроводу), что исключает вредное вязкостное и тепловое взаимодействие между встречными потоками пара и жидкости. Диаметр паропровода и конденсаторопровода варьируется обычно в пределах от 2 до 10 мм, что

позволяет легко их конфигурировать или делать гибкими. Кроме того, эти устройства допускают широкую возможность для использования самых различных форм и размеров испарителей и конденсаторов, которые являются основными структурными компонентами этих устройств, служащими, соответственно, для приема и отвода тепла. В качестве теплоносителей могут использоваться различные жидкости, химически совместимые с конструктивными материалами ДПК и обладающие подходящими теплофизическими свойствами. Расстояние теплопередачи у ДПК может достигать нескольких десятков метров, а мощность – нескольких киловатт при работе в диапазоне температур от криогенных до 150–200 °С. Принципиальные схемы контурного термосифона и контурной тепловой трубы представлены на рис. 1.

Одно из первых сведений о разработке контурных термосифонов под названием «испарительно-конденсационная система» относится к 1967 году [1]. Устройство было предназначено для использования в системе охлаждения электроники. В дальнейшем наиболее активное развитие разработок и исследований КТС для различных областей применения получило в Институте тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси (ИТМО НАН Беларуси) [2–8].

Позднее в том же направлении начали проводиться работы и в Институте теплофизики Уральского отделения РАН (ИТФ УрО РАН) [9]. В контурных термосифонах капиллярно-пористая структура (фитиль) для формирования движущего капиллярного давления не используется. Однако в некоторых случаях капиллярная структура может размещаться в зоне испарения для повышения интенсивности теплообмена или для подавления пульсаций, которые возникают при кипении теплоносителя при пониженном давлении.

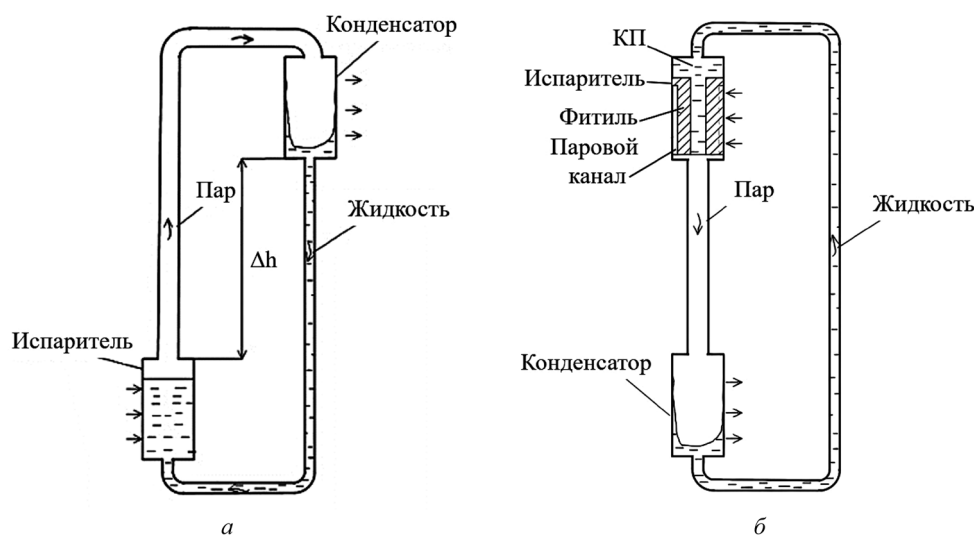


Рис. 1. Принципиальная схема контурного термосифона (а) и контурной тепловой трубы (б)

нии. Интенсификации теплообмена в КТС способствует также и использование наножидкостей, нанопокровов и нанокомпозитов [10]. Основной отличительной особенностью контурных тепловых труб является обязательное наличие в зоне испарения (испарителе) мелкопористого фитиля, имеющего специальную форму, и так называемой компенсационной полости (КП), которая, как правило, размещена в одном корпусе с испарителем. Первая в мире КТТ была разработана в СССР в 1972 году в Уральском политехническом институте им. С.М. Кирова в интересах аэрокосмической техники как устройство, способное эффективно передавать тепло на достаточно большое расстояние при любой ориентации в гравитационном поле [11, 12]. С 1979 года интенсивное развитие разработок и исследований в этой области, направленное на практическое применение КТТ в различных областях техники, было успешно продолжено в ИТФ УрО РАН [13–18]. На основе этих разработок также впервые в мире было создано серийное производство этих устройств. Достижения в разработке контурных тепловых труб имеются также и в ИТМО [19, 20].

1. Контурные термосифоны

Принципиальная схема контурного термосифона (рис. 1, а) является достаточно простой, но вместе с тем она допускает широкие возможности для различных конструктивных воплощений. Кроме того, КТС способны эффективно работать при различных положениях в поле сил тяжести при условии, что зона подвода тепла (зона испарения)

расположена ниже зоны отвода тепла (зоны конденсации). Это связано с тем, что движущим перепадом давлений в КТС, как правило, является гидростатическое давление столба жидкости, который формируется между поверхностями раздела пар-жидкость в зонах испарения и конденсации. Величина этого давления определяется простой формулой:

$$\Delta P_g = (\rho_l - \rho_v)g(h_2 - h_1), \quad (1)$$

где ρ_l , ρ_v – плотность жидкости и пара в КТС; g – ускорение свободного падения; h_1 и h_2 – высота уровня жидкости в зоне испарения и конденсации. Условием работоспособности КТС является баланс движущего напора и суммарной величины потерь давления на всех участках циркуляции теплоносителя в паровой и жидкой фазах, который в общем виде может быть записан в виде:

$$\Delta P_g = \Delta P_v + \Delta P_l, \quad (2)$$

где ΔP_v , ΔP_l – потери давления при движении паровой фазы и жидкой фазы теплоносителя, соответственно.

1.1. Контурный термосифон для охлаждения мощной электроники

КТС могут эффективно использоваться в системах охлаждения мощных электронных компонентов, в частности, центральных и графических процессоров, тиристоров, IGBT-модулей, светодиодов, максимальная рабочая температура которых находится в пределах 70–100 °С. На рис. 2, а в качестве примера представлена схема КТС

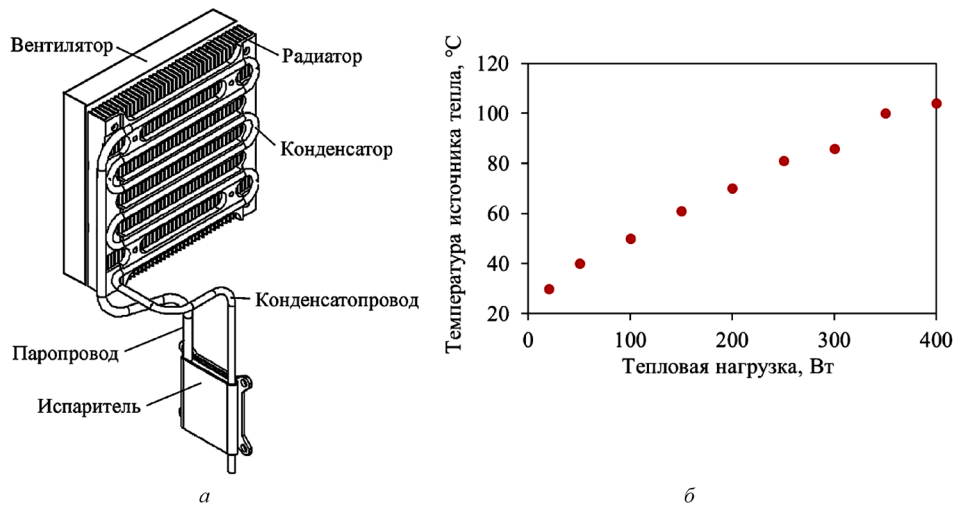


Рис. 2. Схема (а) и рабочая характеристика (б) КТС

с плоским испарителем толщиной 7 мм с размерами активной зоны 35×35 мм и змеевиковым конденсатором. Конденсатор сопряжен с радиатором, имеющим площадь оребрения 0.48 м^2 , и 120 мм вентилятором [21]. Здесь же представлена рабочая характеристика устройства (рис. 2, б), полученная при температуре окружающего воздуха 22 °С и скорости обдува радиатора 2 м/с .

Видно, что указанный выше температурный диапазон может быть обеспечен при тепловых нагрузках от 200 до 350 Вт. Соответствующие значения термического сопротивления устройства находятся в пределах $0.24\text{--}0.22 \text{ Вт/°С}$. При этом линейный характер зависимости свидетельствует о том, что максимальная тепловая нагрузка 400 Вт, достигнутая при испытаниях, не является предельной для такой системы охлаждения.

1.2. Контурный термосифон для охлаждения трансформаторов

Одной из первых разработок, направленных на промышленное применение КТС, была система охлаждения обмоток трансформатора ТИЗП-160/0.7УЗ, которая проводилась в ИТФ совместно с НИИ «Уралэлектромаш» [22]. Схема устройства представлена на рис. 3.

Испаритель КТС был выполнен в форме коаксиального цилиндра, установленного в зазоре между обмотками трансформатора. Испытания трансформаторов мощностью 100 и 160 кВА показали, что такая система охлаждения позволяет снизить их удельную материалоемкость на 50 %.

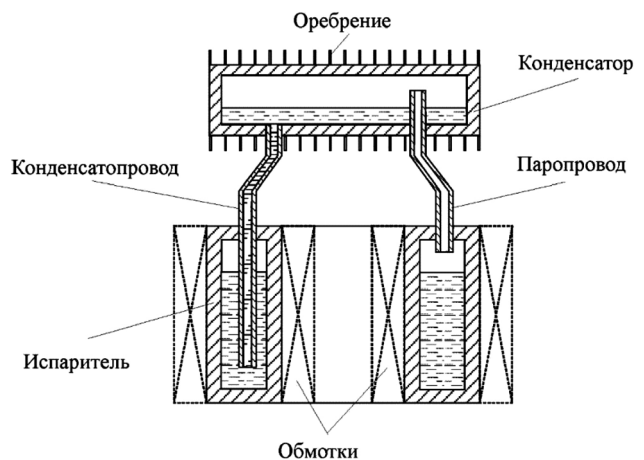


Рис. 3. Схема охлаждения трансформатора

1.3. Многоканальный контурный термосифон

Многоканальный контурный термосифон, разработанный в ИТМО НАН Беларуси, является одним из возможных конструктивных вариантов КТС. Весьма перспективным практическим применением таких устройств является система утилизации солнечного излучения – одного из основных возобновляемых источников энергии. Плотность теплового потока в солнечном излучении обычно невысока. Чтобы эффективно использовать его энергию, нужны теплообменники с большой поверхностью теплообмена. Для этой цели был специально разработан КТС с плоским многоканальным испарителем, имеющим прозрачное покрытие. Схема КТС представлена на рис. 4.

Применение в таких КТС наножидкостей, в качестве теплоносителя, которые обладают высокой поглощающей способностью, дает воз-

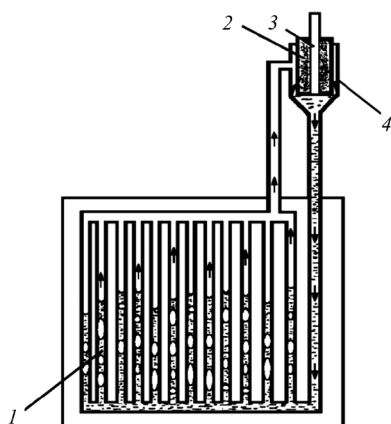


Рис. 4. Схема многоканального контурного термосифона: 1 – многоканальный испаритель, 2 – теплообменник, 3 – охлаждающая жидкость, 4 – конденсатор

возможность абсорбировать солнечную энергию одновременно во всем объеме жидкости. При достижении определенной плотности теплового потока на границе раздела «наночастица – жидкость» происходит фазовый переход с образованием микроскопических пузырей пара, которые создают дополнительный перепад давления, интенсифицирующий циркуляцию теплоносителя. Существенное повышение эффективности солнечных нагревателей достигается также при использовании пористых нанопокровов на теплообменных поверхностях коаксиальных испарителей с внешней прозрачной поверхностью. Такие покрытия значительно увеличивают площадь теплообменной поверхности, уменьшают угол смачивания, способствуют образованию тонких пленок испаряющейся жидкости внутри пористой структуры, обладающей открытой пористостью. Это позволяет в 2–3 раза интенсифицировать теплообмен по сравнению с кипением на гладкой поверхности. На рис. 5 показано образование минипузырей

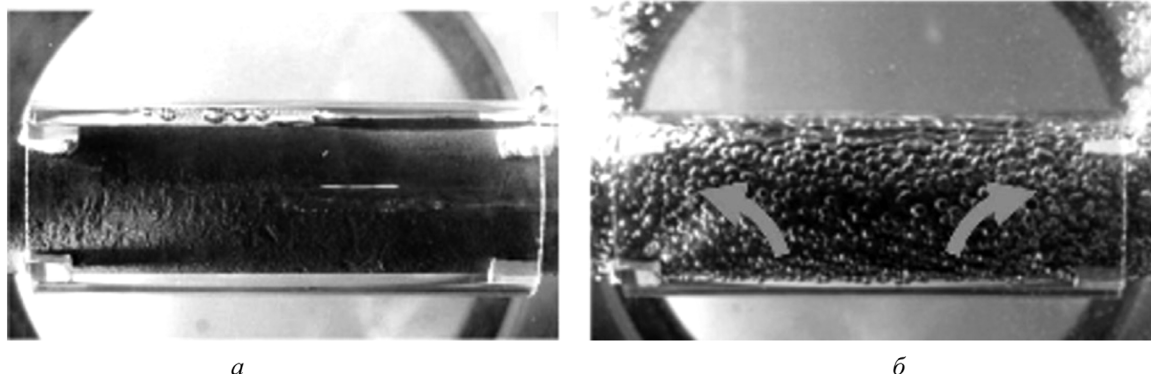


Рис. 5. Образование минипузырей пропана в кольцевом зазоре с нанопокровом: а – $q = 0.25 \text{ кВт/м}^2$, б – $q = 34 \text{ кВт/м}^2$

рей пропана в кольцевом зазоре с нанопокровом под воздействием солнечного излучения с различной плотностью теплового потока.

1.4. Пародинамические термосифоны

Оригинальным техническим решением, предложенным ИТМО НАН Беларуси, является использование в модифицированных КТС дополнительного «пассивного движущего механизма». Это устройство получило название «пародинамический термосифон» (ПДТ) [23, 24]. Принципиальная схема ПДТ представлена на рис. 6.

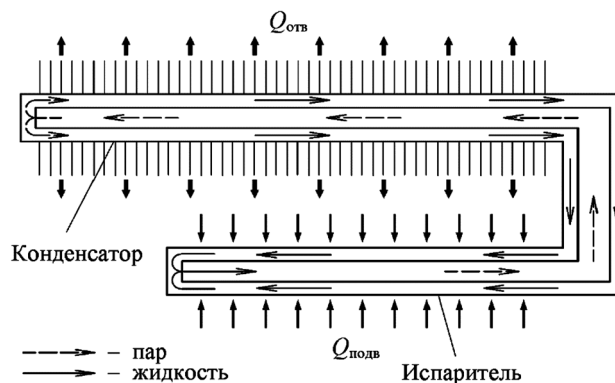


Рис. 6. Принципиальная схема пародинамического термосифона

ПДТ выполнен по принципу теплообменника «труба в трубе». Встречные потоки паровой и жидкой фаз теплоносителя в них разделены стенкой паропровода, коаксиально размещенного в трубопроводе большего диаметра, по которому движется парожидкостная смесь. Конденсирующаяся в кольцевом зазоре жидкость проталкивается из конденсатора в испаритель под воздействием давления, создаваемого потоком пара. Такие устройства даже в горизонтальном положении способны передавать тепло на большое расстояние. При этом их мощность

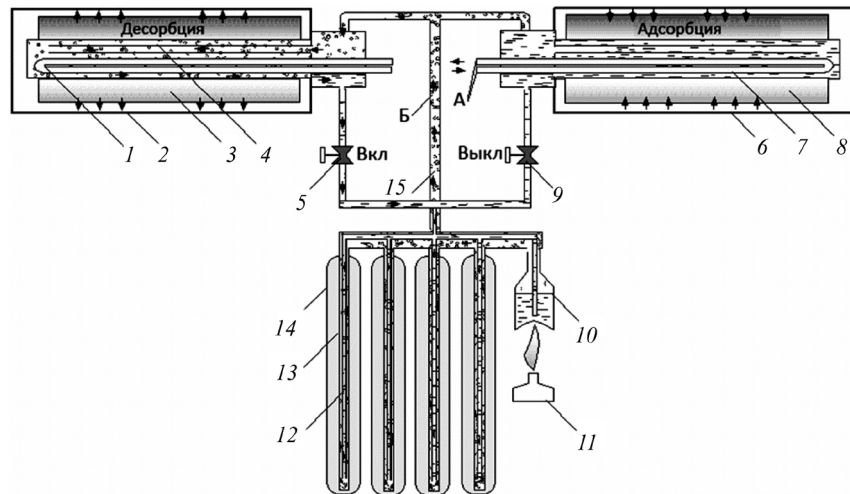


Рис. 7. Система терморегулирования солнечного холодильника: А – рекуперативный контур охлаждения сорбента; Б – пародинамический термосифон; 1 – теплообменник охлаждения сорбента; 2, 6 – адсорберы/десорберы; 3, 8 – сорбент; 4 – конденсатор ПДТ; 5, 9 – термоэлектрические клапаны; 7 – конденсатор высокотемпературного контура; 10 – бойлер; 11 – газовая горелка для нагрева в ночное время; 12, 13 – элементы испарителя ПДТ; 14 – корпус приемника солнечного излучения; 15 – паровой канал

может достигать десятка кВт. На основе ПДТ можно создавать устройства для утилизации солнечной энергии, терморегулирования компонентов электрического и гибридного автотранспорта, теплообменного оборудования в пищевой промышленности, а также других объектов. Одним из вариантов практического применения ПДТ является система терморегулирования солнечного адсорбционного холодильника, схема которого представлен на рис. 7.

На рис. 8 представлено еще одно успешное практическое применение пародинамических термосифонов для утилизации солнечной энергии, где они использованы в системе охлаждения фотоэлектрических преобразователей [25].

Другой вариант ПДТ, предназначенного для охлаждения зарядного устройства-инвертора

(IGBT-модуля) электромобиля с тепловой нагрузкой от 0.5 до 1 кВт, показан на рис. 9.

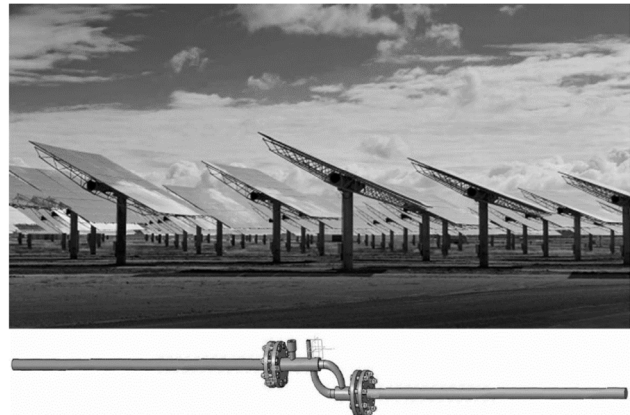


Рис. 8. Фотоэлектрические преобразователи солнечной энергии с системой охлаждения на основе ПДТ

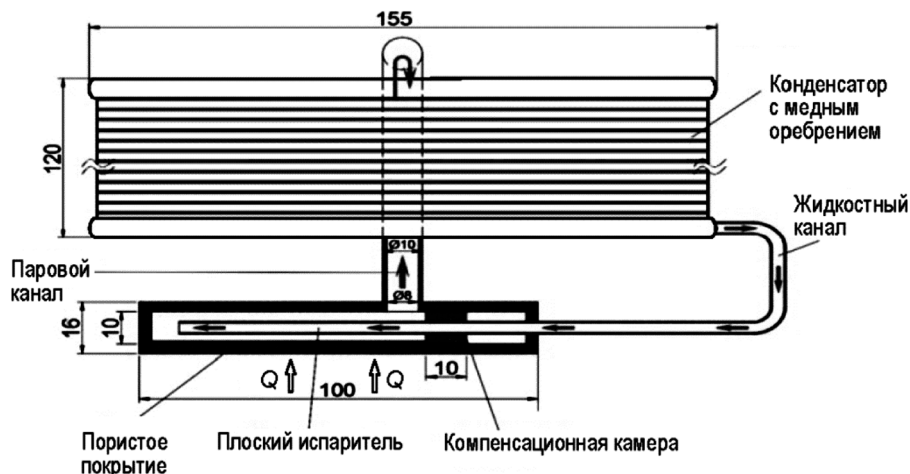


Рис. 9. ПДТ в системе охлаждения зарядного устройства электромобиля

ПДТ здесь имеет плоский горизонтальный испаритель, снабженный пористым покрытием, которое обеспечивает интенсификацию теплообмена и соответствующее снижение термического сопротивления. На рис. 10 представлена характерная зависимость термического сопротивления этого устройства от тепловой нагрузки.

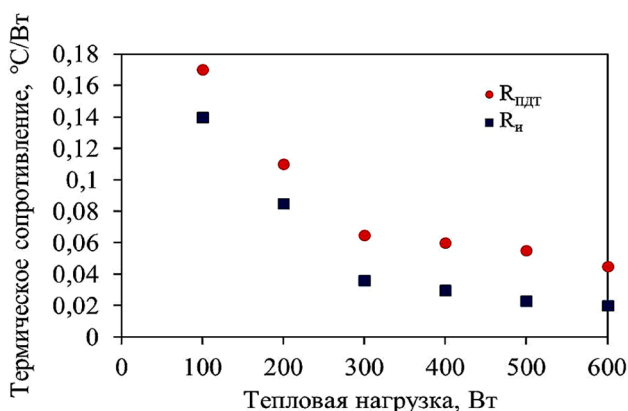


Рис. 10. Зависимость термического сопротивления от тепловой нагрузки

Весьма перспективным также является использование термосифонов в пищевой промышленности. На рис. 11 представлена схема использования ПДТ в печи для подогрева растительного масла в обжарочной печи для изготовления чипсов. Термосифоны позволяют

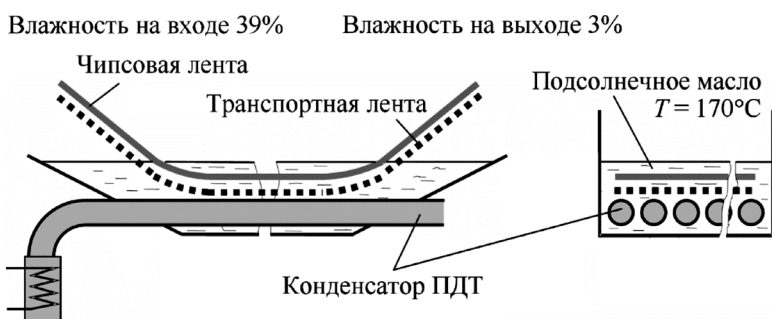


Рис. 11. Схема печи для обжарки продуктов питания

поддерживать равномерный нагрев масла при оптимальной температуре, что гарантированно обеспечивает надлежащее качество продукта, а также снижение расхода электроэнергии до 30 %. Вместе с этим снижаются массогабаритные характеристики оборудования.

2. Контурные тепловые трубы

Изначально КТТ создавались, как устройства, способные эффективно передавать тепло

как в невесомости, так и при любом положении в поле сил тяжести на расстояние до 1 м и более. Основная проблема здесь состояла в обеспечении работоспособности при наиболее неблагоприятном «антигравитационном» режиме, когда устройство располагалось в вертикальном или близком к нему положении, а тепло необходимо было передавать сверху вниз. При этом возврат жидкости в зону испарения, где размещался источник тепла, против действия силы гравитации должен был обеспечиваться без использования каких-либо дополнительных затрат энергии. Первым необходимым условием для реализации этой задачи было использование мелкопористого фитиля, способного создавать достаточно высокое капиллярное давление при минимальном собственном гидравлическом сопротивлении. Такие фитили с эффективным размером пор от 1 до 50 мкм и пористостью 40–70 % были специально разработаны на основе спеченных мелкодисперсных никелевых, титановых и медных порошков. Фитиль в КТТ выполняет одновременно четыре функции: капиллярного насоса, эффективного испарительного теплообменника, теплового и гидравлического затворов.

Основным условием работоспособности КТТ является баланс капиллярного давления, создаваемого в фитиле, и суммы потерь давления на всех участках циркуляции теплоносителя в паровой и жидкой фазах. Это условие принято называть гидродинамическим. Оно является общим для всех тепловых труб, где используется «капиллярный механизм», обеспечивающий работу устройства:

$$\Delta P_c \geq \Delta P_v + \Delta P_l + \Delta P_g, \quad (3)$$

где ΔP_c – капиллярное давление, создаваемое фитилем; ΔP_v , ΔP_l – потери давления при движении пара и жидкости; ΔP_g – гидростатическое сопротивление столба жидкости. Величина движущего капиллярного давления определяется формулой:

$$\Delta P_c = \frac{2\sigma}{r_c} \cos\theta, \quad (4)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения; r_c – эффективный радиус капилляров фитиля; θ – краевой угол смачивания теплоносителем стенок капилляров.

Величина ΔP_g здесь определяется формулой:

$$\Delta P_g = (\rho_l - \rho_v) g l \sin \varphi, \quad (5)$$

где ρ_l, ρ_v – плотность пара и жидкости; g – ускорение свободного падения; l – эффективная длина КТТ; φ – угол наклона КТТ к горизонтальной плоскости. Величина ΔP_g может иметь положительное или отрицательное значение. Знак (+) соответствует положению КТТ, когда испаритель расположен выше конденсатора. При вертикальном положении значение $\sin \varphi = 1$, и величина ΔP_g достигает максимума, и наоборот, при положении испарителя КТТ ниже конденсатора величина ΔP_g становится отрицательной, и суммарные потери давления в КТТ снижаются на величину давления, создаваемого столбом жидкости. С этой точки зрения такое положение КТТ считается благоприятным. Однако на теплопередающей способности устройства это сказывается не всегда, поскольку при таком его положении возникает дополнительное сопротивление в паропроводе из-за стекающей вниз пленки жидкости. Потери давления в паровом и жидкостном трактах КТТ определяются известными гидродинамическими уравнениями для ламинарного или турбулентного течения вязких сред.

Еще одно условие работоспособности, которое является специфическим для КТТ, является термодинамическим. Оно может быть записано так:

$$\left. \frac{dP}{dT} \right|_{T_v} \Delta T = \Delta P_{EX}, \quad (6)$$

где dP/dT – производная, характеризующая кривизну линии насыщения теплоносителя при температуре T_v ; ΔP_{EX} – сумма потерь давления на всех участках циркуляции теплоносителя за исключением фитиля.

Функции фитиля как теплового затвора определяются его способностью создавать некоторый перепад температуры и соответствующий ему перепад давления на линии насыщения между его испаряющей и впитывающей поверхностями, которые достигаются за счет термического сопротивления фитиля. Такой перепад необходим для вытеснения жидкости из паропровода и конденсатора при запуске КТТ. Функция гидравлического затвора определяется тем, что капил-

лярная структура, насыщенная жидкостью, препятствует проникновению пара от испаряющей к впитывающей поверхности фитиля и выравниванию давлений между ними.

2.1. Контурная тепловая труба, работающая при различном положении

Один из примеров, иллюстрирующих способность этих устройств эффективно работать при различном положении в поле сил тяжести, являются результаты испытаний КТТ длиной 4.5 м с аммиаком в качестве теплоносителя (рис. 12).

КТТ, изготовленная из нержавеющей стали, была снабжена цилиндрическим испарителем диаметром 12 мм с никелевым фитилем с эффективным радиусом пор 1.8 мкм, имела паропровод и конденсаторопровод диаметром 2 мм с тремя трубчатыми спиралями, обеспечивающими дополнительную гибкость и возможность изменять длину устройства. КТТ испытывалась при горизонтальном положении и положениях, когда испаритель располагался выше конденсатора на 1.1 м и 2 м. Максимальная передаваемая мощность составила, соответственно, 110 и 100 Вт при температуре источника тепла 54 °С. Термическое сопротивление системы «источник тепла – сток тепла» при этом находилось на уровне 0.27 °С/Вт. Еще один пример, показывающий способность КТТ работать при самом неблагоприятном вертикальном положении, содержится в работе [26], где представлены результаты испытаний КТТ длиной 1.82 м с водой в качестве теплоносителя. Здесь максимальная мощность 800 Вт была достигнута при темпера-

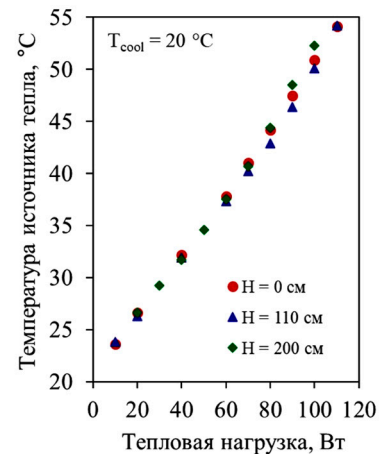
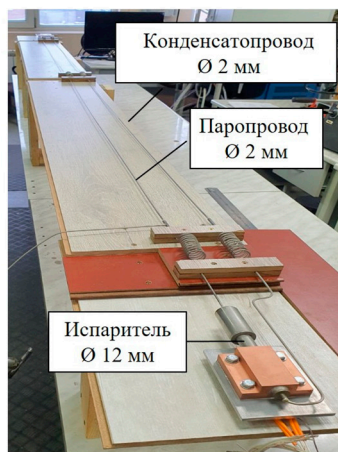


Рис. 12. Внешний вид (а) и рабочие характеристики (б) КТТ

туре испарителя 120 °С и термическом сопротивлении КТТ 0.06 °С/Вт. Высокое капиллярное давление, создаваемое мелкопористым фитилем, может быть использовано также для увеличения расстояния теплопереноса в горизонтальном или близком к нему положении. На рис. 13 показан внешний вид аммиачной КТТ длиной 21 м с паропроводом диаметром 8 мм и конденсаторопроводом диаметром 6 мм, которая в горизонтальном положении передавала 1700 Вт при рабочей температуре 61 °С. Термическое сопротивление устройства при этом находилось на уровне 0.023 °С/Вт [27].

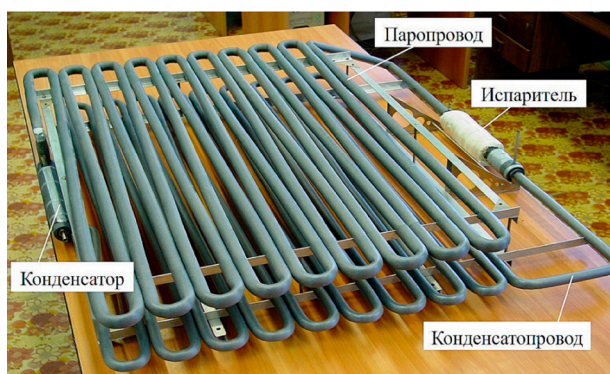


Рис. 13. Внешний вид КТТ длиной 21 м

Наряду с длинными и мощными устройствами были разработаны также миниатюрные КТТ длиной до 1 м, предназначенные для систем охлаждения электроники различного назначения. Такие устройства имеют трубопроводы диаметром от 2 до 6 мм, имеющими различную конфигурацию. Они могут быть снабжены цилиндрическими испарителями диаметром 5–10 мм или плоскими испарителями толщиной 3–10 мм. Максимальная мощность таких устройств может варьироваться от 50 до 1000 Вт [28–31]. Внешний вид некоторых из таких устройств показан на рис. 14.

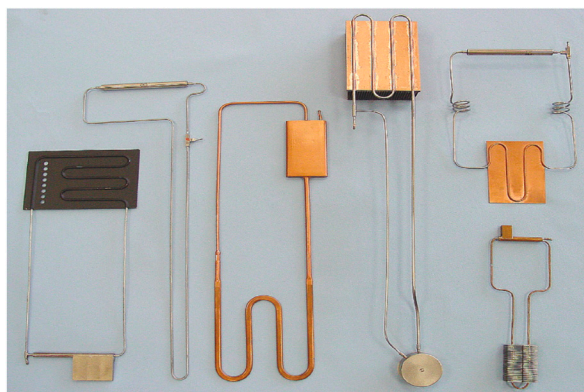


Рис. 14. Миниатюрные КТТ

2.2. КТТ в системах терморегулирования космических аппаратов

Первые летные испытания контурной тепловой трубы в условиях невесомости были проведены в 1989 году на борту советского космического аппарата (КА) «Гранат», созданного в НПО им. А.С. Лавочкина. КТТ длиной 4 м, снабженная 12.4 мм цилиндрическим испарителем и трубопроводами диаметром 3 мм, была заправлена пропиленом, низкая температура замерзания которого соответствовала условиям космического полета [32]. Схема экспериментального модуля с КТТ представлена на рис. 15. Телеметрическая информация, поступавшая с борта КА до 2001 года, подтвердила работоспособность и надежность устройства и открыла контурным тепловым трубам дорогу в космос.

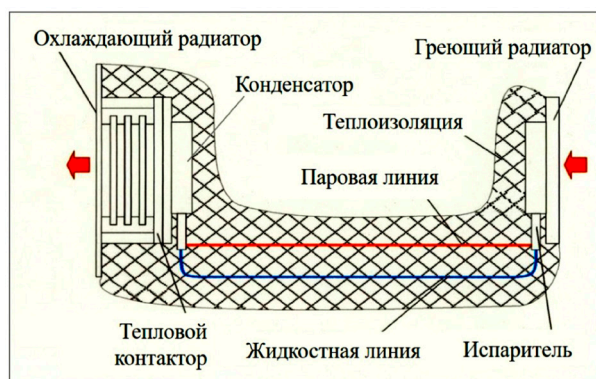


Рис. 15. Схема летного экспериментального модуля с контурной тепловой трубой

Первое реальное применение КТТ в космосе состоялось в 2003 году, где 8 таких устройств длиной 3.5 м и мощностью 130 Вт использовались в системе терморегулирования (СТР) никель-водородных аккумуляторных батарей на борту двух КА «Ямал-200» (рис. 16).

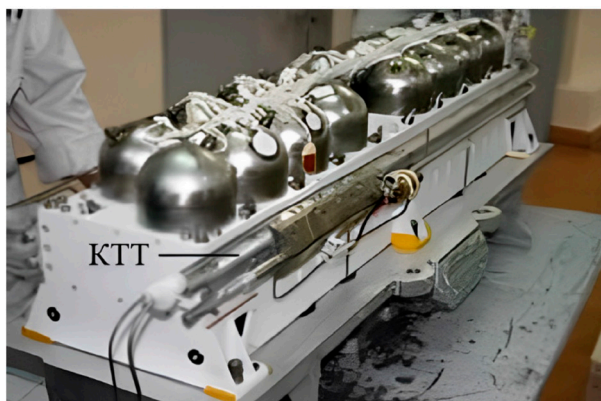


Рис. 16. КТТ в СТР аккумуляторной батареи КА «Ямал-200»

В настоящее время КТТ являются штатными компонентами СТР космических аппаратов, на борту которых установлено более 130 таких устройств, в том числе 7 из них на КА «Арктика-М», запущенном на высокоэллиптическую орбиту в феврале 2021 года для мониторинга ледовой обстановки на Севморпути. Контурные тепловые трубы позволяют существенно снизить массу, энергопотребление, рабочий ресурс и надежность систем терморегулирования, что является критически важным для использования на борту космических аппаратов.

2.3. КТТ в системах охлаждения электроники

Миниатюрные КТТ нашли широкое применение в системах охлаждения электроники различного назначения. Здесь они, в частности, используются для отвода тепла от теплонепригодных компонентов и равномерного распределения его по основанию радиаторов, которые рассеивают тепло путем естественной или вынужденной конвекции. Как правило, размещать КТТ в таких системах приходится в сильно стесненных условиях, и здесь очень востребованной является их способность к сложному конфигурированию. Типичным примером такого технического решения является система охлаждения универсальной вычислительной платформы – многофункционального контроллера, 3D-модель и внешний вид которого показан на рис. 17.

В этой системе использованы аммиачные КТТ, изготовленные из нержавеющей стали, снабженные 8 мм цилиндрическим испарителем и трубопроводами диаметром 2 мм, которые поддерживают температуру центрального процессора мощностью 60 Вт на уровне не выше 80 °С при температуре воздуха до 40 °С.

2.4. КТТ в системах охлаждения лазеров

Возможность сложного конфигурирования КТТ позволила использовать их также в системе охлаждения малогабаритных твердотельных лазеров с энергией излучения 120 мДж, где они служат для управляемого отвода тепла от матрицы лазерных светодиодов, обеспечивающих накачку кристалла. На рис. 18 представлены 3D-модель, внешний вид лазера и контурных тепловых труб, имеющих сложную конфигурацию.

Дальнейшее развитие работ в этом направлении привело к созданию серийного производства миниатюрных тепловых труб аналогичного назначения.

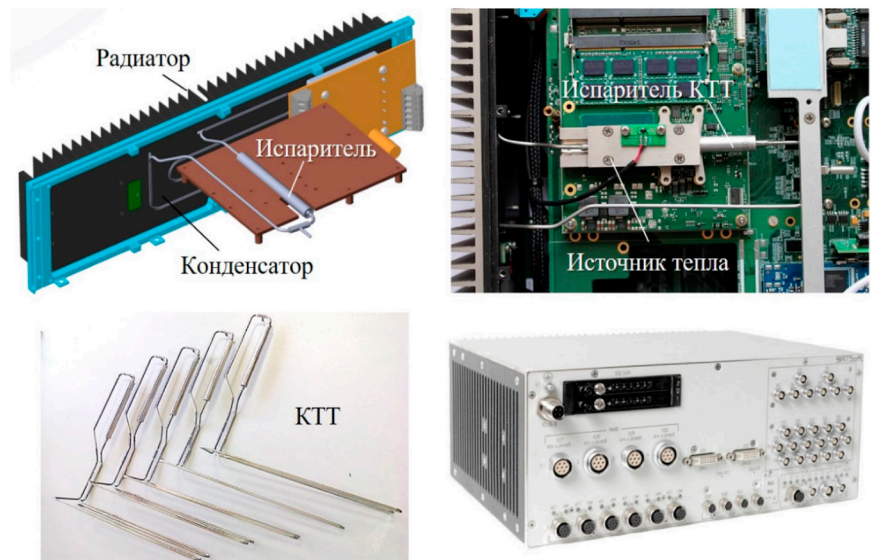


Рис. 17. Система охлаждения универсального вычислительного модуля

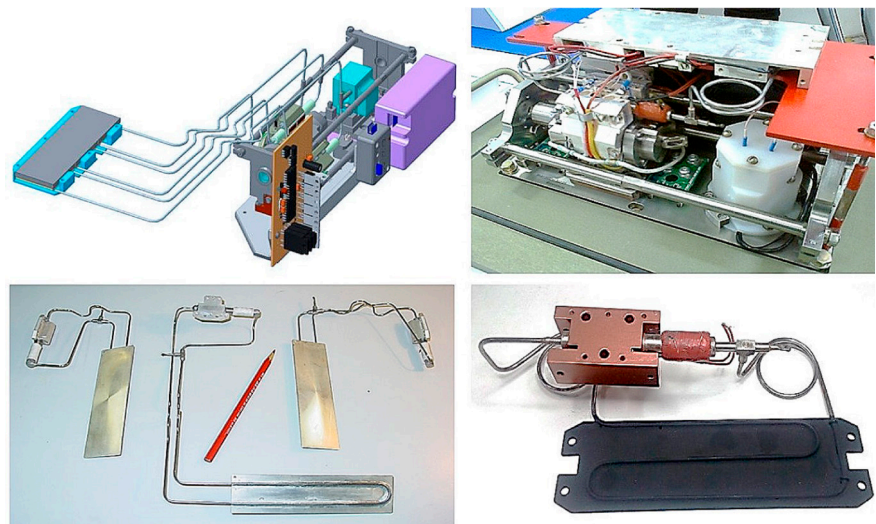


Рис. 18. Система охлаждения твердотельного лазера

2.5. КТТ в системах охлаждения компьютерных серверов

Весьма перспективной и востребованной областью применения КТТ являются системы охлаждения компьютерных серверов, размещаемых в стойках, которые устанавливаются в вычислительных центрах. Электроэнергия, потребляемая обычными системами охлаждения в этих центрах, может достигать 40 % от всех затрат энергии. Поэтому разработка энергоэффективных систем охлаждения для них является чрезвычайно актуальной задачей. Использование КТТ как пассивных теплопередающих устройств, отводящих тепло от центральных процессоров, которые способны рассеивать мощность до 300 Вт и более, позволяет достичь существенной экономии электроэнергии. Здесь

могут быть использованы как аммиачные КТТ с цилиндрическими испарителями, так и медь-водяные КТТ с плоскими испарителями [30, 33]. Конденсаторы КТТ в таких системах могут находиться за пределами системных плат или даже за пределами серверного шасси, где есть больше свободного места для их размещения и организации теплового контакта со стоками тепла. Последние, в свою очередь, могут сбрасывать отводимое тепло с помощью специально организованной воздушной или жидкостной конвекции. Варианты компьютерных серверов с системой охлаждения на основе КТТ представлены на рис. 19.

Необходимо также отметить, что реализация такой системы охлаждения позволяет существенно повысить плотность компоновки серверов в стойках и тем самым достичь более экономного использования дорогостоящей площади вычислительных центров.

На рис. 20 представлена серверная стойка с системой охлаждения на основе КТТ.

Заключение

Данная работа представляет собой краткий обзор результатов многолетних разработок, исследований и практического применения в самых различных областях техники двухфазных теплопередающих устройств – контурных термосифонов и контурных тепловых труб, выполненных в ИТМО НАН Беларуси и ИТФ УрО РАН. Хотя специальной координации этих работ между коллективами указанных организаций не было, тем не менее, происходил постоянный обмен информацией и плодотворное использование взаимного уникального опыта. Авторы данной статьи являются членами постоянного Международного комитета по тепловым трубам, действующего с 1973 года, координирующего организацию и проведение международных конференций и симпозиумов по данной тематике, награждены Международной медалью им. Джорджа Гровера за выдающийся вклад в науку и технологию тепловых труб, являются лауреатами государственных премий.

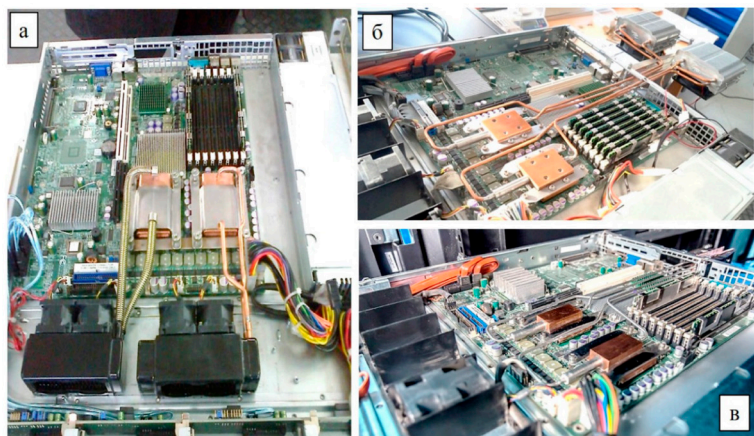


Рис. 19. КТТ в системах охлаждения компьютерных серверов: а – водяные КТТ с плоскими испарителями и воздушными теплообменниками; б – аммиачные КТТ с цилиндрическими испарителями и воздушными теплообменниками; в – аммиачные КТТ с цилиндрическими испарителями и жидкостными теплообменниками

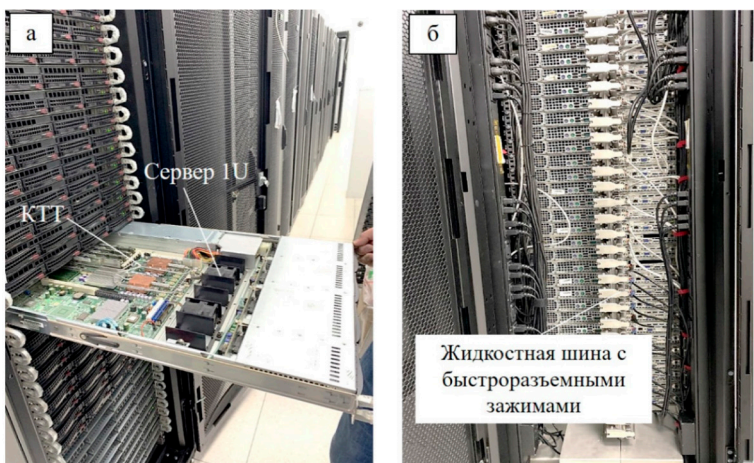


Рис. 20. Общий вид серверной стойки: а – лицевая сторона; б – обратная сторона с жидкостной шиной – стоком тепла

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Капитанчук И.И. Разработка испарительной охлаждающей системы // Вопросы электроники. Серия ТРТО. 1967. № 2. С. 69–74.
- Васильев Л.Л., Богданов В.М., Иванцов О.М., Чирсков В.Г., Постников В.В., Двойрис А.Д., Кривошеин Б.Л. Термосифон. Авторское свидетельство СССР № 676848. Бюл. № 28. 1979.
- Богданов В.М., Васильев Л.Л., Киселев В.Г. Тепловая труба. Авторское свидетельство СССР № 1104350. Бюл. № 27. 1984.
- Vasiliev L.L., Kiselev V.G., Morgun V.A., Bogdanov V.M., Rabetsky M.I., Marchenko A.M. Heat Transfer Device. Patent U.S. 4,554,966 (1985).
- Васильев Л.Л., Киселев В.Г., Рабецкий М.И. Тепловая труба. Авторское свидетельство СССР № 1111014. Бюл. № 32. 1984.
- Васильев Л.Л. Обзор. Тепловые трубы для нагрева и охлаждения грунта // Инженерно-физический журнал. 1987. Т. 52. С. 676–687.
- Vasiliev L.L. Heat pipe research and development in the U.S.S.R. Heat Recovery Systems and CHP. 1989, vol. 9, no. 4, pp. 313–333. URL: [https://doi.org/10.1016/0890-4332\(89\)90085-9](https://doi.org/10.1016/0890-4332(89)90085-9)
- Vasiliev L.L. State-of-the art on heat pipe technology in the former Soviet Union. *Applied Thermal Engineering*, 1998, vol. 18, no. 7, pp. 507–551.
- Майданик Ю.Ф., Дмитрин В.И., Пастухов В.Г., Вершинин С.В., Чернышева М.А. Двухфазные контурные термосифоны // Тепловые процессы в технике. 2010. Т. 2. № 5. С. 218–226.
- Vasiliev L.L., Grakovich L.P., Rabetskii M.I., Vasiliev L.L. Jr. Heat transfer enhancement in heat pipes and thermosyphons using nanotechnologies (nanofluids, nanocoating and nanocomposites) as an HP envelope. *Heat pipe Science and Technology, an International Journal*, 2013, vol. 4, no. 4, pp. 251–275. URL: <https://doi.org/10.1615/HEATPIPESCIE-TECH.2014011995>
- Герасимов Ю.Ф., Щеголев Г.Т., Майданик Ю.Ф., Семихатов Н.А., Стариков Л.Г., Филиппов Г.А. Тепловая труба. Авторское свидетельство СССР № 449213. Бюл. № 41. 1974.
- Герасимов Ю.Ф., Майданик Ю.Ф., Долгирев Ю.Е., Кисеев В.М., Филиппов Г.А., Стариков Л.Г. Некоторые результаты исследования низкотемпературных тепловых труб, работающих против поля тяжести // Инженерно-физический журнал. 1976. Т. 30. № 4. С. 581–586.
- Maidanik Ju.F., Vershinin S.V., Kholodov V.F., Dolgirev Ju.E. Heat Transfer Apparatus. Patent U.S. 4,515,209 (1985).
- Майданик Ю.Ф., Ферштатер Ю.Г., Пастухов В.Г. Контурные тепловые трубы: разработка, исследование, элементы инженерного расчета // Научные доклады Уральского отделения РАН. Свердловск, 1989. 52 с.
- Maidanik Yu.F., Pastukhov V.G. Loop heat pipes – recent developments, test results and applications. SAE Technical Paper Series Number 1999-01-2530. 1999. URL: <https://doi.org/10.4271/1999-01-2530>
- Майданик Ю.Ф. Контурные тепловые трубы – высокоэффективные теплопередающие устройства // Инновации. 2003. № 5 (62). С. 83–86.
- Maydanik Yu.F. Loop heat pipes. *Applied Thermal Engineering*, 2005, vol. 25, no. 5–6, pp. 635–657. URL: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2004.07.010>
- Maydanik Y.F., Vershinin S.V., Chernysheva M.A. Investigation of thermal characteristics of a loop heat pipe in a wide range of external conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, vol. 147. 118967. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118967>
- Vasiliev L., Lossouarn D., Romestant C., Alexandre A., Bertin Y., Piatsiushyk Ya., Romanenkov V. Loop heat pipe for cooling of high-power electronic components. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, vol. 52, no. 1–2, pp. 301–308. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.06.016>
- Vasiliev L.L., Vasiliev L.L. Jr. Heat pipes to increase the efficiency of fuel cells. *International Journal of low-carbon technologies*, 2009, vol. 4, no. 2, pp. 96–103. URL: <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctp011>
- Maydanik Yu.F., Dmitrin V.I., Pastukhov V.G. Two-Phase Loop Thermosyphons. *Proceedings of the 8th International Seminar "Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators, Power Sources"*. Minsk, September 12–15, 2011, pp. 144–154.
- Амромин А.Л., Левин А.А., Выходцев Б.А., Майданик Ю.Ф., Рудюк С.В. Индукционное устройство. Авторское свидетельство СССР № 1690003. Бюл. № 41. 1991.
- Zhuravlyov A.S., Vasiliev L.L., Vasiliev L.L. Jr. Horizontal vapordynamic thermosyphons, fundamentals and practical applications. *Heat Pipe Science and Technology, An International Journal*, 2013, vol. 4, no. 1–2, pp. 39–52. DOI: 10.1615/HeatPipeScieTech.2013007414
- Vasiliev L., Zhuravlyov A., Shapovalov A., Rodin A. Vapordynamic thermosyphon – heat transfer two-phase device for wide applications. *Archives of Thermodynamics*, 2015, vol. 36, no. 4, pp. 65–76. URL: <https://doi.org/10.1515/AOTER-2015-0033>
- Vasiliev L.L. Heat pipes with nanocomposites for renewable sources of energy application // Наноструктуры в конденсированных средах: сборник научных статей. Минск: ИТМО имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, 2018. С. 293–303.
- Maydanik Yu.F., Chernysheva M.A., Pastukhov V.G. Investigation of thermal characteristics of high-capacity loop heat pipe after a long-term storage. *Energy*. 2014, vol. 74, pp. 804–809. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.07.053>
- Maydanik Y., Pastukhov V., Chernysheva M. Development and investigation of a loop heat pipe with a high heat-transfer capacity. *Applied Thermal Engineering*, 2018, vol. 130, pp. 1052–1061. URL: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.11.084>
- Pastukhov V.G., Maydanik Yu.F., Vershinin S.V., Korukov M.A. Miniature loop heat pipes for electronics cooling. *Applied Thermal Engineering*, 2003, vol. 23, no. 9, pp. 1125–1135. URL: [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(03\)00046-2](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(03)00046-2)
- Майданик Ю. Контурные тепловые трубы – высокоэффективные теплопередающие устройства для систем охлаждения электроники. *Электроника*. 2017. № 6. С. 122–130.
- Maydanik Y., Chernysheva M., Vershinin S. High-capacity loop heat pipe with flat evaporator for efficient cooling systems. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2020, vol. 34, no. 3, pp. 465–475. URL: <https://doi.org/10.2514/1.T5845>
- Майданик Ю.Ф., Вершинин С.В., Чернышева М.А. Исследование рабочих характеристик медь-водяной контурной тепловой трубы // Тепловые процессы в технике. 2010. Т. 2. № 12. С. 536–545.
- Maidanik Yu.F., Fershtater Yu.G., Pastukhov V.G., Vershinin S.V., Goncharov K.A. Some results of loop heat pipes development, tests and applications. *Proceedings of the 5th International Heat Pipe Symposium*. Melbourne, November 17–20, 1996, pp. 406–412.
- Дмитрин В.И., Майданик Ю.Ф. Разработка и экспериментальное исследование контурной тепловой трубы для охлаждения мощных серверных процессоров // Тепловые процессы в технике. 2019. Т. 11. № 9. С. 410–416.

References

- Капитанчук И.И. Разработка испарительной охлаждающей системы. [Development of an evaporative cooling system]. *Voprosy elektroniki. Seriya TRTO*, 1967, no. 2, pp. 69–74. (In Russ.)
- Vasiliev L.L., Bogdanov V.M., Ivancov O.M., Chirskov V.G., Postnikov V.V., Dvojris A.D., Krivoshein B.L. Термосифон [Thermosyphon]. *Avtorskoe svidetel'stvo SSSR No. 676848. Bjulleten' no. 28*, 1979. (In Russ.)

3. Bogdanov V.M., Vasiliev L.L., Kiselev V.G. Teplovaja truba [Heat pipe]. Avtorskoe svidetel'stvo SSSR No. 1104350. Bjul'teten' no. 27, 1984. (In Russ.)
4. Vasiliev L.L., Kiselev V.G., Morgun V.A., Bogdanov V.M., Rabetsky M.I., Marchenko A.M. Heat Transfer Device. Patent U.S. 4,554,966 (1985).
5. Vasiliev L.L., Kiselev V.G., Rabeckij M.I. Teplovaja truba [Heat pipe]. Avtorskoe svidetel'stvo SSSR No. 1111014. Bjul'teten' no. 32, 1984. (In Russ.)
6. Vasiliev L.L. Obzor. Teplovye trubyy dlja nagreva i ohlazhdenija grunta [Review. Heat pipes for heating and cooling the ground.]. *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal*, 1987, vol. 52, pp. 676–687. (In Russ.)
7. Vasiliev L.L. Heat pipe research and development in the U.S.S.R. *Heat Recovery Systems and CHP*, 1989, vol. 9, no. 4, pp. 313–333. URL: [https://doi.org/10.1016/0890-4332\(89\)90085-9](https://doi.org/10.1016/0890-4332(89)90085-9)
8. Vasiliev L.L. State-of-the art on heat pipe technology in the former Soviet Union. *Applied Thermal Engineering*, 1998, vol. 18, no. 7, pp. 507–551.
9. Maydanik Yu.F., Dmitrin V.I., Pastukhov V.G., Vershinin S.V., Chernysheva M.A. Dvuhfaznye konturnye termosifony [Two-phase loop thermosiphons]. *Thermal processes in engineering*, 2010, vol. 2, no. 5, pp. 218–226. (In Russ.)
10. Vasiliev L.L., Grakovich L.P., Rabetskij M.I., Vasiliev L.L. Jr. Heat transfer enhancement in heat pipes and thermosiphons using nanotechnologies (nanofluids, nanocoating and nanocomposites) as an HP envelope. *Heat pipe Science and Technology, an International Journal*, 2013, vol. 4, no. 4, pp. 251–275. URL: <https://doi.org/10.1615/HEATPIPESCIETECH.2014011995>
11. Gerasimov Ju.F., Shhegolev G.T., Majdanik Ju.F., Semihatov N.A., Starikov L.G., Filippov G.A. Teplovaja truba [Heat pipe]. Avtorskoe svidetel'stvo SSSR No. 449213. Bjul'teten' no. 41, 1974. (In Russ.)
12. Gerasimov Ju.F., Majdanik Ju.F., Dolgirev Ju.E., Kiselev V.M., Filippov G.A., Starikov L.G. Nekotorye rezul'taty issledovaniya nizkotemperaturnykh teplovykh trub, rabotajushchih protiv polja tjazhesti [Some results of a study of low-temperature heat pipes operating against a gravity field.]. *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal*, 1976, vol. 30, no. 4, pp. 581–586. (In Russ.)
13. Maidanik Ju.F., Vershinin S.V., Kholodov V.F., Dolgirev Ju.E. Heat Transfer Apparatus. US Patent Number 4,515,209. 1985.
14. Majdanik Ju.F., Fershtater Yu.G., Pastuhov V.G. Konturnye teplovye trubyy: razrabotka, issledovanie, jelementy inzhenernogo rascheta [Loop heat pipes: development, research, elements of engineering calculation]. *Nauchnye doklady Ural'skogo otdelenija Rossijskoj akademii nauk. Sverdlovsk*, 1989. 52 p. (In Russ.)
15. Maidanik Yu.F., Pastukhov V.G. Loop heat pipes – recent developments, test results and applications. SAE Technical Paper Series, 2 August, 1999. Number 2530. URL: <https://doi.org/10.4271/1999-01-2530>
16. Majdanik Ju.F. Konturnye teplovye trubyy – vysokojeffektivnye teploperedajushhie ustrojstva [Loop heat pipes – highly efficient heat transfer devices]. *Innovacii*, 2003, no. 5 (62), pp. 83–86. (In Russ.)
17. Maydanik Yu.F. Loop heat pipes. *Applied Thermal Engineering*, 2005, vol. 25, no. 5–6, pp. 635–657. URL: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2004.07.010>
18. Maydanik Y.F., Vershinin S.V., Chernysheva M.A. Investigation of thermal characteristics of a loop heat pipe in a wide range of external conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, vol. 147. 118967. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118967>
19. Vasiliev L., Lossouarn D., Romestant C., Alexandre A., Bertin Y., Piatsiushyk Ya., Romanenkov V. Loop heat pipe for cooling of high-power electronic components. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, 52, no. 1–2. pp. 301–308. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.06.016>
20. Vasiliev L.L., Vasiliev L.L. Jr. Heat pipes to increase the efficiency of fuel cells. *International Journal of low-carbon technologies*, 2009, vol. 4, no. 2, pp. 96–103. URL: <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctp011>
21. Maydanik Y.F., Dmitrin V.I., Pastukhov V.G. Two-Phase Loop Thermosiphons. *Proceedings of the 8th International Seminar “Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators, Power Sources”*. Minsk, September 12–15, 2011, pp. 144–154.
22. Amromin A.L., Levin A.A., Vyhodcev B.A., Majdanik Ju.F., Rudjuk S.V. Indukcionnoe ustrojstvo [Induction device]. Avtorskoe svidetel'stvo SSSR № 1690003. Bjul'teten' No. 41, 1991. (In Russ.)
23. Zhuravlyov A.S., Vasiliev L.L., Vasiliev L.L. Jr. Horizontal vapordynamic thermosiphons, fundamentals and practical applications. *Heat Pipe Science and Technology, An International Journal*, 2013, vol. 4, no. 1–2, pp. 39–52. DOI: 10.1615/HeatPipeSciTech.2013007414
24. Vasiliev L., Vasiliev L., Zhuravlyov A., Shapovalov A., Rodin A. Vapordynamic thermosiphon – heat transfer two-phase device for wide application. *Archives of Thermodynamics*, 2015, vol. 36, no. 4, pp. 65–76. URL: <https://doi.org/10.1515/AOTER-2015-0033>
25. Vasiliev L.L. Heat pipes with nanocomposites for renewable sources of energy application. *Nanostruktury v kondensirovannykh sredah: sbornik nauchnykh statej*. Minsk, ITMO imeni A.V. Lykova NAN Belarusi, 2018. pp. 293–303.
26. Maydanik Yu.F., Chernysheva M.A., Pastukhov V.G. Investigation of thermal characteristics of high-capacity loop heat pipe after a long-term storage. *Energy*, 2014, vol. 74, pp. 804–809. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.07.053>
27. Maydanik Y., Pastukhov V., Chernysheva M. Development and investigation of a loop heat pipe with a high heat-transfer capacity. *Applied Thermal Engineering*, 2018, vol. 130, pp. 1052–1061. URL: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.11.084>
28. Pastukhov V.G., Maydanik Yu.F., Vershinin S.V., Korukov M.A. Miniature loop heat pipes for electronics cooling. *Applied Thermal Engineering*, 2003, vol. 23, no. 9, pp. 1125–1135. URL: [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(03\)00046-2](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(03)00046-2)
29. Majdanik Yu. Konturnye teplovye trubyy – vysokojeffektivnye teploperedajushhie ustrojstva dlja sistem ohlazhdenija jelektroniki [Loop heat pipes – highly efficient heat transfer devices for electronics cooling systems]. *Jelektronika*, 2017, no. 6, pp. 122–130. (In Russ.)
30. Maydanik Y., Chernysheva M., Vershinin S. High-capacity loop heat pipe with flat evaporator for efficient cooling systems. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2020, vol. 34, no. 3, pp. 465–475. URL: <https://doi.org/10.2514/1.T5845>
31. Majdanik Ju.F., Vershinin S.V., Chernysheva M.A. Issledovanie rabochih harakteristik med'-vodjanoj konturnoj teplovoj trubyy [Investigation of the operating characteristics of a copper-water loop heat pipe]. *Thermal processes in engineering*, 2010, vol. 2, no. 12, pp. 536–545. (In Russ.)
32. Maidanik Yu.F., Fershtater Yu.G., Pastukhov V.G., Vershinin S.V., Goncharov K.A. Some results of loop heat pipes development, tests and applications. *Proceedings of the 5th International Heat Pipe Symposium*. Melbourne, November 17–20, 1996, pp. 406–412.
33. Dmitrin V.I., Majdanik Ju.F. Razrabotka i jeksperimental'noe issledovanie konturnoj teplovoj trubyy dlja ohlazhdenija moshnykh servernykh processorov [Development and experimental study of a loop heat pipe for cooling powerful server processors]. *Thermal processes in engineering*, 2019, vol. 11, no. 9, pp. 410–416. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 26.09.2022; одобрена после рецензирования 29.09.2022; принята к публикации 02.10.2022.

The article was submitted on 26.09.2022; approved after reviewing on 29.09.2022; accepted for publication on 02.10.2022.