

Автономные устройства с испарительно-конденсационным циклом для терморегулирования теплонагруженной аппаратуры

Л. Л. Васильев*, А. С. Журавлёв, М. А. Кузьмич,
Л. П. Гракович, М. И. Рабецкий, Л. А. Драгун

*Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова Национальной Академии Наук Беларуси,
г. Минск, 220072, Беларусь, *e-mail: lvasil@hmti.ac.by*

Поступила в редакцию 24.08.2023

После доработки 02.02.2024

Принята к публикации 09.02.2024

Представлены конструкция, принцип действия и результаты исследования двухфазных проводников тепла, предназначенных для терморегулирования теплонагруженной аппаратуры – кольцевых термосифонов с горизонтально расположенными испарителем и конденсатором и пористым покрытием в испарителе. Испытаны две модификации термосифонов: с цилиндрическим испарителем и жидкостным охлаждением конденсатора; с плоским испарителем и воздушным охлаждением конденсатора. Пористый фитиль способствует равномерному распределению жидкости и теплового потока в продольном и поперечном сечениях испарителя, выравниванию температурного поля по поверхности испарителя и, следовательно, охлаждаемого объекта. Термосифоны изготовлены из меди, рабочие жидкости – вода, фреон R245fa.

Ключевые слова: термосифон, тепловая труба, теплообмен, охлаждение электроники, терморегулирование

УДК 536.24

<https://doi.org/10.52577/eom.2024.60.1.089>

ВВЕДЕНИЕ

Технологические процессы различного назначения связаны с поглощением либо выделением тепла. Термическое воздействие требуется как для создания новых, так и для изменения либо сохранения свойств существующих материалов. Оборудование, способы обработки непрерывно совершенствуются с целью повышения качества продукта, уменьшения энергозатрат, снижения вредного воздействия на окружающую среду. Одним из прогрессивных направлений является внедрение электрических и электрохимических технологий. Исследованиям воздействия электрического поля на процессы тепло- и массообмена посвящен цикл работ под общим названием «Влияние электрогидродинамических течений на интенсификацию процессов тепло- и массообмена» [1–3]. Подтверждена высокая эффективность использования электрогидродинамических (ЭГД) методов в системах термостатирования элементов электроники, оптоэлектроники, электротехники. ЭГД технологии играют важную роль в технике, химии, микробиологии, медицине и фармацевтике [4–7]. Методы нетепловой обработки успешно применяются в сельском хозяйстве, пищевой промышленности [8–11].

Производительность процесса обработки, качество получаемого продукта в значительной степени зависят от условий эксплуатации технологического оборудования – поддержания оптимальных тепловых режимов, влажности и т.д. Как показывают исследования, увеличение температуры приводит к уменьшению минимального зарядного напряжения, прикладываемого к аноду в электродной системе, а при повышенных гидростатических давлениях – и к уменьшению напряжения пробоя, при котором осуществляется пробой межэлектродного промежутка, что связано с изменением величины удельной электропроводности рабочей жидкости при ее нагреве [12]. Уменьшается также длительность предпробойной стадии.

Терморегулирование электронной и электрической аппаратуры может осуществляться ЭГД методами [3], однофазными теплообменными системами, а также с помощью тепловых труб (ТТ) и термосифонов (ТС) [13, 14] – автономно работающих высокотеплопроводных двухфазных проводников тепла с испарительно-конденсационным циклом, в которых тепло передается путем переноса скрытой теплоты парообразования. В испарителе за счет подведения от внешнего источника тепла происходит парообразование, пар перемещается в конденсатор, где конденсируется с выделением

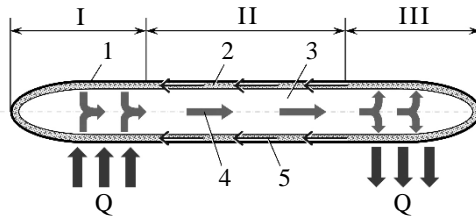


Рис. 1. Тепловая труба: I – испаритель; II – адиабатическая зона; III – конденсатор; 1 – корпус; 2 – капиллярный фитиль; 3 – паровой канал; 4 – пар; 5 – жидкость; Q – тепловой поток.

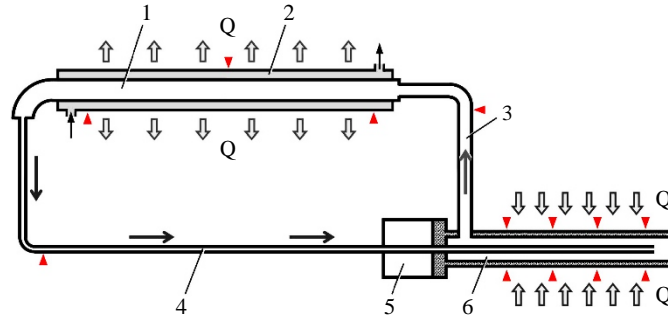


Рис. 2. Кольцевой термосифон с горизонтальным пористым испарителем: 1 – конденсатор; 2 – проточный теплообменник; 3 – паровой канал; 4 – жидкостный канал; 5 – компенсационная камера; 6 – испаритель; ▲ – места установки термомпар при экспериментальном исследовании устройства.

тепла, которое может быть полезно использовано. В ТТ конденсат возвращается в испаритель по фитилю под действием капиллярных сил (рис. 1). Термосифон представляет собой тепловую трубу, в которой отсутствует капиллярный фитиль. В этом случае жидкая фаза возвращается в испаритель под действием сил гравитации, поэтому простейший ТС может устойчиво функционировать только в вертикальном или наклонном положении, при котором конденсатор находится выше испарителя.

Тепловые трубы и термосифоны обладают эффективной теплопроводностью $5 \times 10^3 - 10^4$ Вт/(°С·м) и способны обеспечить передачу тепловых потоков с минимальными потерями. Важным достоинством ТТ и ТС является также отсутствие необходимости в затратах энергии и техническом обслуживании.

Цель работы – определение основных тепловых характеристик разработанных нами устройств: теплопередающая способность, поля температур вдоль корпуса, термические сопротивления термосифона и его частей при разных тепловых нагрузках и уровнях заправки рабочей жидкостью. Устройства обладают характеристиками, позволяющими использовать их в системах терморегулирования объектов с высокой интенсивностью тепловыделения: низкие термические сопротивления, стабильная работоспособность в широком диапазоне тепловых потоков, высокая теплопередающая способность (до 1,5–1,7 кВт), короткое время запуска, динамичный выход на стационарный режим при изменении тепловой нагрузки. Созданные устройства предназначены для

терморегулирования электронной, электрической и другой аппаратуры с интенсивным тепловыделением.

КОЛЬЦЕВОЙ ТЕРМОСИФОН С ГОРИЗОНТАЛЬНЫМИ ИСПАРИТЕЛЕМ И КОНДЕНСАТОРОМ

Конструкция и принцип действия кольцевого термосифона

В Институте тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси на протяжении многих лет активно ведутся исследования двухфазного теплообмена в пористых средах, разработка и исследование ТТ и ТС различного назначения. Созданные устройства нашли применение в системах терморегулирования аппаратуры космических аппаратов, наземного транспорта, малой энергетики, взрывозащищенного электрооборудования угольных шахт, литейного производства, медицины, пищевых технологий. Принцип действия и конструкция различных термосифонов (пародинамического, с винтовой вставкой, кольцевого) описаны в [15]. Продолжением тематики явились разработка и исследование серии кольцевых термосифонов с горизонтальными испарителем и конденсатором, снабженных пористым покрытием в испарителе (КТПИ). Схема устройства представлена на рис. 2.

Изготовлено и испытано несколько образцов КТПИ. Все детали термосифонов выполнены из меди, на внутреннюю поверхность испарителя нанесен тонкий пористый слой из спеченных

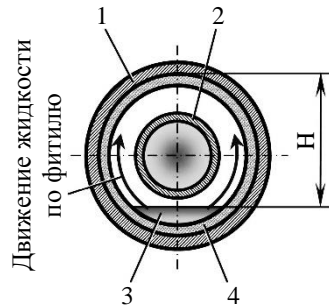


Рис. 3. Распределение жидкости по поверхности теплообмена за счет капиллярных сил в пористом фитиле: 1 – корпус испарителя; 2 – конденсатор; 3 – ручей рабочей жидкости; 4 – пористый фитиль.

частиц медного порошка дендритной формы. Пористое покрытие толщиной около 1 мм служит для интенсификации теплообмена при парообразовании, эффективного распределения жидкости по пористой поверхности и обильного смачивания фитиля. Испаритель и конденсатор связаны каналами для транспорта пара и жидкости. Корпус испарителя соединен с компенсационной камерой, которая выполняет функции аккумулятора жидкости, что повышает стабильность работы термосифона и ускоряет запуск его в работу, а также служит емкостью для неконденсирующихся газов в случае их образования. Как и в обычном термосифоне, подведенное к испарителю тепло используется на фазовый переход и в виде скрытой теплоты парообразования переносится с массой пара в конденсатор, где превращается в жидкость, которая возвращается в испаритель под действием силы гравитации. Выделяющееся при конденсации тепло отводится жидкостным теплообменником либо рассеивается в окружающее пространство вынужденной или свободной конвекцией воздуха. В случае воздушного охлаждения поверхность конденсатора оборудуется радиатором для развития поверхности теплосъема. Разделение потоков пара и конденсата снижает гидравлическое сопротивление контура. Как следствие, снижается и термическое сопротивление устройства.

Движущими силами, обеспечивающими циркуляцию рабочей жидкости по контуру КТПИ, являются гравитационный напор ΔP_{Γ} и давление $\Delta P_{\Gamma,п}$, возникающее вследствие генерации пара в кольцевом канале испарителя. Работоспособность термосифона поддерживается при условии превышения или равенства совокупности этих движущих сил по отношению к потерям давления в контуре:

$$\Delta P_{\Gamma} + \Delta P_{\Gamma,п} \geq \Delta P_{ж} + \Delta P_{п} + \Delta P_{и} + \Delta P_{к} \quad (1)$$

где $\Delta P_{ж}$, $\Delta P_{п}$ – потери давления в потоках жидкости и пара; $\Delta P_{и}$, $\Delta P_{к}$ – падение давления из-за испарения и конденсации на границе раздела жидкость–пар.

Для возможности запуска КТПИ в работу при низких тепловых потоках должны быть обеспечены условия, которые способствуют зарождению паровой фазы при малых перегревах поверхности. С этой целью на внутреннюю стенку испарителя нанесено пористое покрытие из спеченного медного порошка, которое увеличивает площадь поверхности испарения жидкости и изменяет механизм образования пара. За счет эффекта тепловых микротрубок возрастают скорость образования и частота отрыва паровых пузырьков от поверхности, что приводит к повышению теплопередачи при испарении. Благодаря наличию пористого слоя повышается критический тепловой поток, при котором устройство сохраняет работоспособность. Еще одно назначение пористого фитиля – эффективное распределение жидкости по поверхности и достаточное ее смачивание путем подсосывания жидкости из ручья в донной части кольцевого канала. Смачивание поверхности по всему периметру обеспечивает капиллярный перепад давления $\Delta P_{кап}$ в пористом покрытии:

$$\Delta P_{кап} = \frac{\mu_{ж} h}{K} \frac{dh}{dt} + \rho_{ж} g H, \quad (2)$$

где $\mu_{ж}$ – динамическая вязкость рабочей жидкости; H – высота капиллярного подъема (рис. 3), $\rho_{ж}$ – плотность рабочей жидкости; h – текущая координата; K – проницаемость пористого фитиля; t – время.

Внутри кольцевого мини-канала испарителя происходит двухфазный теплообмен (испарение и кипение), фильтрация и капиллярная прокачка рабочей жидкости через поры фитиля. Основные требования, предъявляемые к теплообменным поверхностям либо наносимым на них покрытиям, – наличие большого количества зон парообразования, обеспечение притока к ним рабочей жидкости и беспрепятственной эвакуации образующегося пара, а также технологичность их изготовления. Покрытия должны иметь хорошую механическую прочность и связь с подложкой (стенкой), противостоять эрозионным и вибрационным воздействиям,

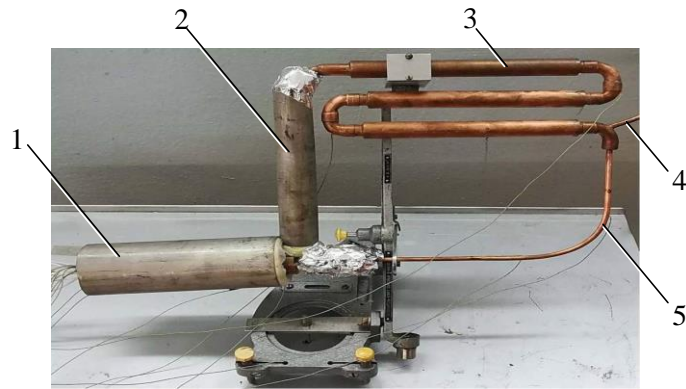


Рис. 4. Кольцевой термосифон кВт-класса с горизонтальным пористым испарителем: 1 – теплоизолированный испаритель с компенсационной камерой; 2 – теплоизолированный паровой канал; 3 – трехсекционный конденсатор с жидкостным охлаждением; 4 – заправочный штуцер; 5 – жидкостный канал (конденсатопровод).

Таблица. Размеры компонентов КТПИ, толщина стенки 1 мм

| Компонент | Длина, мм | Наружный диаметр, мм |
|------------------|--------------|----------------------|
| Испаритель | 200 | 18 |
| Конденсатор | 850 (полная) | 15 |
| Паропровод | 350 | 10 |
| Конденсатопровод | 400 | 6 |

сохранять эти свойства в течение длительного времени. Важным параметром, определяющим скорость движения жидкости при фильтрации, является проницаемость фитиля, зависящая от его пористости. Проницаемость фитиля испарителя КТПИ составляет более $1 \times 10^{-13} \text{ м}^2$ при пористости 60% и эффективном радиусе пор 60–100 мкм. Благодаря наличию мини- и макропор в фитиле сочетаются достаточная проницаемость и высокий капиллярный напор. Пористое покрытие на испарителе обеспечивает увеличение теплоотдачи в 2–2,5 раза по сравнению с парообразованием на гладкой поверхности, при этом процесс характеризуется значительно меньшими перепадами температур между теплоотдающей поверхностью и жидкостью. Это объясняется различиями в механизмах протекания процессов на гладкой и пористой стенках. Наиболее распространенными видами пористых покрытий и развитых (структурированных) поверхностей являются мелкие канавки, микроребра, металлические сетки, металловолоконистые и порошковые спеченные структуры, а также покрытия, изготавливаемые напылением. Фитиль из микроразмерных спеченных частиц дендритной формы может уменьшить критическую гидравлическую длину волны за счет изменения динамики движения пузырьков через пористую структуру, при этом критический тепловой поток увеличивается в 2 раза по сравнению с процессом на гладкой поверхности.

Кольцевой термосифон с повышенной теплопередающей способностью

Для охлаждения оборудования с высоким уровнем тепловыделения разработан и

исследован кольцевой КТПИ, способный передавать высокие тепловые потоки (рис. 4). Конденсатор выполнен трехсекционным с возможностью подключения одной, двух либо трех секций. Все детали термосифона изготовлены из меди, размеры компонентов представлены в таблице.

Кольцевой термосифон с плоским испарителем

Разработаны и испытаны образцы КТПИ для систем охлаждения объектов с тепловыделением средней мощности и аппаратуры с высоким уровнем тепловой нагрузки, отличающиеся геометрическими характеристиками, конструкцией конденсаторов. Для улучшения контакта с охлаждаемым объектом создана модификация КТПИ с плоским испарителем и вертикальным многотрубным ребристым конденсатором воздушного охлаждения (рис. 5).

Испаритель и конденсатор соединены трубками – каналами для транспорта паровой и жидкостной фаз. Все компоненты термосифона изготовлены из меди. Плоское дно испарителя внутри покрыто капиллярным слоем толщиной 1 мм из спеченных дендритных частиц медного порошка фракцией 63–100 мкм. Концевой участок жидкостной трубки вмонтирован в испаритель таким образом, чтобы между трубкой и оболочкой плоского испарителя образовался мини-зазор. Тепло от источника поглощается испарителем, в котором расходуется на образование пара и далее переносится образующимся паром в конденсатор в виде скрытой теплоты парообразования. Конденсатор представляет собой систему параллельно соединенных медных

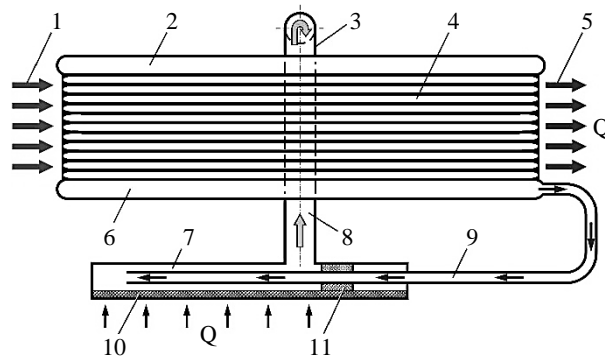


Рис. 5. КТПИ воздушного охлаждения с плоским испарителем: 1 – поток охлаждающего воздуха; 2 – верхний коллектор; 3 – конденсатор; 4 – радиатор; 5 – воздушный поток на выходе из радиатора; 6 – нижний коллектор; 7 – испаритель; 8 – паровая трубка; 9 – жидкостная трубка; 10 – пористый фитиль; 11 – компенсационная камера.

труб с гладкими стенками, объединенных верхним и нижним коллекторами. Конденсат собирается в его нижнем коллекторе и по жидкостному каналу стекает в испаритель. Рабочий цикл термосифона замыкается. Разность между плотностями жидкости и пара создает необходимый напор для движения рабочей жидкости по контуру термосифона. Рассеивание выделяющегося при конденсации тепла в окружающую среду производится потоком воздуха, возможен также вариант охлаждения конденсатора проточной жидкостью.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Стенд для исследования кольцевых термосифонов

Функциональные свойства разработанных термосифонов определялись на экспериментальном стенде, схема которого представлена на рис. 6. Основными составляющими частями стенда являются узел крепления термосифона, системы подвода тепла и охлаждения конденсатора, блок обработки данных.

Узел крепления оснащен поворотным устройством, обеспечивающим возможность поворота объекта исследования вокруг оси испарителя и проверки работоспособности исследуемого устройства при разных углах его наклона к горизонту. Тепловой поток к испарителю подводился с помощью омического нагревателя, получавшего электропитание от источника постоянного тока Mastech NY10010E с точностью установки напряжения 1 В и тока 0,1 А. Тепло от конденсатора отводилось с помощью жидкостного проточного теплообменника, температура охлаждающей жидкости в теплообменнике стабилизировалась криотермостатом жидкостным Carbolite Gero Limited с точностью поддержания температуры $\pm 0,1^\circ\text{C}$. В конструкции стенда предусмотрена возможность установки вентилятора обдува для воздушного охлаждения конденсатора.

Для измерения температуры элементов термосифона использовались хромель-алюмелевые термопары (тип К). Сигналы от термопар регистрировались автоматизированной многоканальной системой сбора данных и коммутации Agilent 34970A с основной погрешностью измерения постоянного напряжения 0,004%, затем данные обрабатывались в персональном компьютере.

Методика экспериментов

Перед экспериментом термосифоны вакуумировались и заправлялись рабочей жидкостью через заправочный штуцер с использованием вакуумированного ресивера.

Для оценки характера гидродинамических процессов в испарителе термосифона при использовании разных рабочих жидкостей применялся критерий Бонда:

$$Bo = \frac{g\delta_3^2\Delta\rho}{\sigma}, \quad (3)$$

где δ_3 – характеристическая длина (для испарителя термосифона типа «труба в трубе» – размер зазора), $\Delta\rho = |\rho_2 - \rho_1|$ – разность плотностей сплошной и диспергированной сред; σ – поверхностное натяжение, g – ускорение свободного падения.

Критерий Бонда Bo показывает отношение сил тяжести и гидростатического давления к силе поверхностного натяжения. Силы поверхностного натяжения играют существенную роль при $Bo \ll 1$, сила тяжести – при $Bo \gg 1$. Были рассчитаны критерии Bo для воды в качестве рабочей жидкости ($Bo_{\text{вода}} = 2,15$), ряда доступных фреонов ($Bo_{R22} = 17,31$; $Bo_{R134a} = 21,93$; $Bo_{R245fa} = 14,43$; $Bo_{R600a} = 8,16$), а также для ацетона ($Bo_{\text{ацетон}} = 5,30$) и этанола ($Bo_{\text{этанол}} = 5,57$). Для всех рассмотренных жидкостей число $Bo > 1$ (следовательно, во всех случаях приоритетным является влияние силы тяжести), наименьшим из них обладает вода.

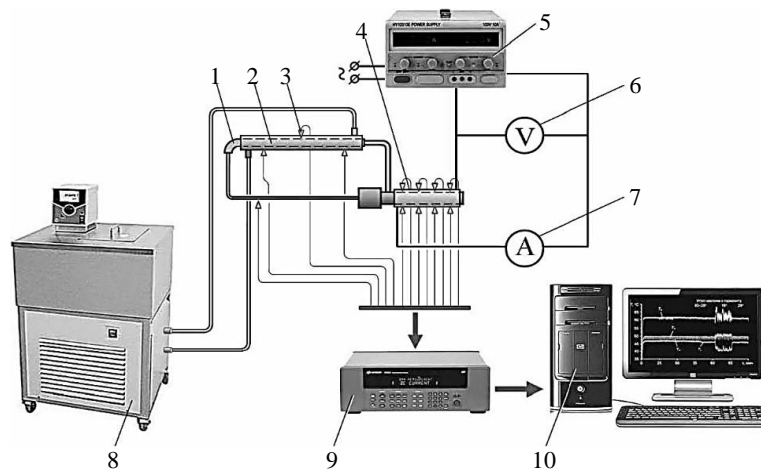


Рис. 6. Схема стенда для исследования кольцевых термосифонов: 1 – термосифон; 2 – проточный жидкостный теплообменник; 3 – термопара; 4 – электрический нагреватель; 5 – источник постоянного тока; 6 – вольтметр; 7 – амперметр; 8 – криотермостат; 9 – мультиметр Agilent; 10 – персональный компьютер.

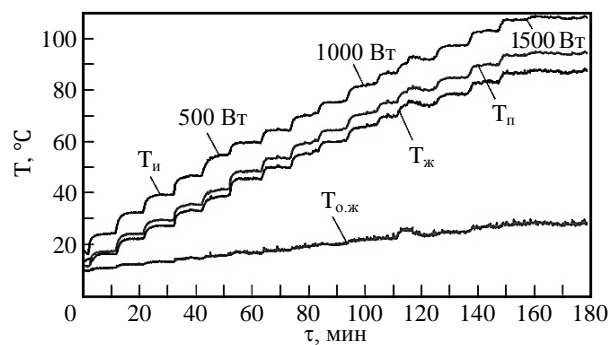


Рис. 7. График изменения температуры компонентов КТПИ с цилиндрическим испарителем в зависимости от тепловой нагрузки: $T_{и}$, $T_{п}$, $T_{к}$ и $T_{о,ж}$ – температуры испарителя, пара, конденсата и охлаждающей жидкости на входе в теплообменник.

Для фреона R245fa это показатель выше, чем у некоторых других рассмотренных жидкостей, однако, учитывая комплексно его теплофизические характеристики, безопасность для окружающей среды и рост использования в теплотехнике, для исследования тепловых свойств термосифона в качестве теплоносителей были выбраны вода и фреон R245fa.

Заправленный термосифон устанавливался в узел крепления. В целях минимизации тепловых потерь поверхности испарителя с электронагревателем и парового канала теплоизолировались.

Мощность электрического нагревателя переключалась ступенчато, измерения температуры поверхности элементов термосифона в точках, показанных на рис. 2, выполнялись в установившемся режиме. Точность измерения теплового потока составляла $\pm 5\%$. Также контролировалась температура циркулирующей охлаждающей жидкости в проточном теплообменнике, соединенном с криотермостатом Carbolite Gero Limited. Температура циркулирующей охлаждающей жидкости регулировалась в диапазоне 20–80 °C и поддерживалась с точностью $\pm 0,1$ °C, объемный расход жидкости составлял 10 л/мин.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Целью экспериментов было определение полей температур вдоль корпуса КТПИ, термических сопротивлений испарителя $R_{и} = (\bar{T}_{и} - T_{п})/Q$, конденсатора $R_{к} = (T_{п} - \bar{T}_{к})/Q$ и полного сопротивления термосифона $R_{ТС} = (\bar{T}_{и} - \bar{T}_{к})/Q$ при различных тепловых нагрузках, а также теплопередающей способности устройства (величины критического теплового потока). Средняя разность температур между испарителем и конденсатором $\Delta \bar{T} = \bar{T}_{и} - \bar{T}_{к}$ находилась как разность между средними значениями температур испарителя $\bar{T}_{и} = (T_1 + T_2 + T_3)/3$ и конденсатора $\bar{T}_{к} = (T_5 + T_6 + T_7)/3$. Анализ неопределенности для экспериментов был выполнен в соответствии с методологиями, предложенными в [16, 17]. Наличие погрешностей в определении термических сопротивлений $R_{и}$, $R_{к}$ и $R_{ТС}$ составляет менее 6,8%.

На рис. 7 приведены данные по температуре элементов КТПИ с цилиндрическим испари-

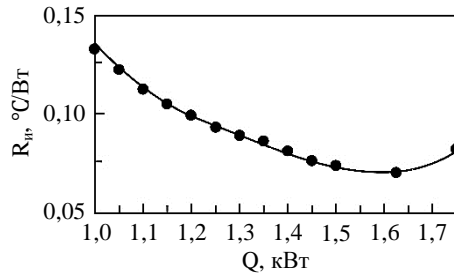


Рис. 8. Термическое сопротивление испарителя.

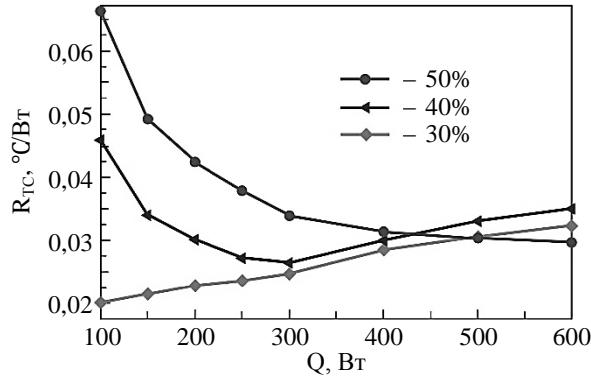


Рис. 9. Зависимость полного термического сопротивления КТПИ от тепловой нагрузки Q для различных объемов заправки рабочей жидкостью R245fa. Рабочая длина трехсекционного конденсатора – 600 мм.

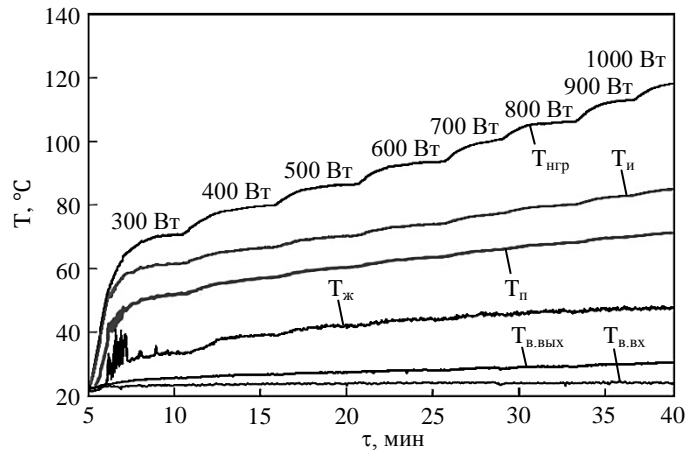


Рис. 10. Зависимость температуры компонентов КТПИ с плоским испарителем от тепловой нагрузки: $T_{нгр}$, $T_{и}$, $T_{п}$, $T_{ж}$ – температуры нагревателя, испарителя, пара и жидкости; $T_{в,вх}$ и $T_{в,вых}$ – температуры воздуха на входе и выходе.

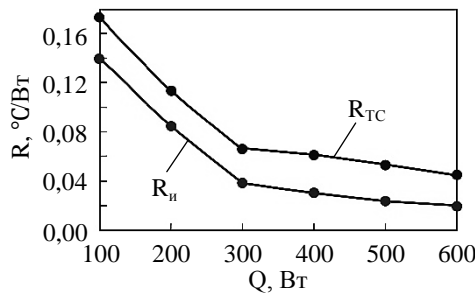


Рис. 11. Термические сопротивления КТПИ с плоским испарителем: $R_{и}$ – термическое сопротивление испарителя; $R_{ТС}$ – полное термическое сопротивление.

темом, заправленным водой в диапазоне передаваемых тепловых потоков 100–1500 Вт. Испытания показали, что при использовании воды в качестве рабочей жидкости термосифон способен устойчиво передавать тепловые потоки до 1700 Вт, при этом термическое сопротивление

испарителя монотонно снижается до 0,07 °C/Вт из-за увеличения скорости циркулирующей жидкости, затем с увеличением тепловой нагрузки начинается его рост (рис. 8). Критический тепловой поток для данного термосифона

с водой в качестве рабочей жидкости составляет 1750 Вт.

На рис. 9 представлены значения полного термического сопротивления R_{TC} КТПИ с рабочей жидкостью (фреон R245fa) в диапазоне передаваемых тепловых потоков $Q = 100\text{--}600$ Вт при разных уровнях заправки. Графики показывают, что влияние количества теплоносителя в термосифоне на его общее термическое сопротивление наиболее существенно сказывается при малых тепловых нагрузках (100–300 Вт).

Для тепловых потоков от 100 до 400 Вт оптимальным объемом R245fa является 30% (50 мл). Суммарное термическое сопротивление термосифона составляет 0,020–0,027 °C/Вт. В интервале тепловых нагрузок 400–600 Вт величина заправки жидкостью R245fa не столь важна, так как в пределах 30–50% (для данного образца – 50–90 мл) рабочей жидкости термическое сопротивление КТПИ практически не зависит от уровня заправки.

Образец КТПИ с плоским испарителем (рис. 4) был исследован по такой же методике, но конденсатор охлаждался потоком воздуха, создаваемым вентилятором. На рис. 10 и 11 представлены зависимости температур в разных зонах термосифона и термических сопротивлений от передаваемого теплового потока. В качестве рабочей жидкости была использована вода.

ВЫВОДЫ

Разработаны кольцевой термосифон с горизонтальными испарителем и конденсатором и с пористым покрытием испарителя, экспериментально исследованы образцы термосифона с цилиндрическим и плоским испарителями. В первом случае тепло от конденсатора отводилось охлаждающей жидкостью, во втором – потоком воздуха, обдувающим ребрение радиатора, которым снабжен конденсатор.

Эксперименты показали, что теплонагруженная поверхность испарителя обоих образцов КТПИ стабильно снабжается достаточным количеством жидкой фазы, что гарантирует надежную работу устройства при высоких тепловых потоках при низком термическом сопротивлении. Быстрому запуску, выходу на устойчивый стационарный режим работы термосифона способствуют конструкция испарителя с кольцевым зазором между жидкостной трубкой и пористым покрытием поверхности фазового перехода, наличие этого покрытия и компенсационной камеры, аккумулирующей жидкость. Пористый фитиль способствует равномерному распределению жидкости и теплового потока в продольном и поперечном сечениях испарителя, выравниванию температурного поля по поверх-

ности испарителя и, следовательно, охлаждаемого объекта.

Как жидкостное, так и воздушное охлаждение термосифона обеспечивало необходимый уровень теплосъема с поверхности конденсатора.

Исследованные термосифоны стабильно функционируют в широком диапазоне тепловых нагрузок и способны передавать тепловые потоки большой величины (до 1,7 кВт образец КТПИ с цилиндрическим испарителем и до 1,5 кВт – с плоским испарителем), имеют хорошую динамику выхода на рабочий режим работы. Разработанные конструкции термосифонов могут успешно применяться в системах терморегулирования различной аппаратуры с интенсивным тепловыделением, в том числе технологического оборудования для электронной обработки материалов.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кожевников, И.В., Болога, М.К., Влияние электрогидродинамических течений на интенсификацию процессов тепло- и массообмена. Часть 1. Электрогидродинамические течения и характеристики одноступенчатых электрогидродинамических насосов, *ЭОМ*, 2022, т. 58, № 1, с. 58. <https://doi.org/10.52577/eom.2022.58.1.58>.
2. Кожевников, И.В., Болога, М.К., Влияние электрогидродинамических течений на интенсификацию процессов тепло- и массообмена. Часть 2. Одно- и многоступенчатые электрогидродинамические насосы, *ЭОМ*, 2022, т. 58, № 2, с. 31. <https://doi.org/10.52577/eom.2022.58.2.31>.
3. Кожевников, И.В., Болога, М.К., Гроссу, Ф.П., Влияние электрогидродинамических течений на интенсификацию процессов тепло- и массообмена. Часть 3. Электроконвекция и электрогидродинамические насосы в системах охлаждения и термостатирования, *ЭОМ*, 2022, т. 58, № 3, с. 34. <https://doi.org/10.52577/eom.2022.58.3.34>.
4. Боровков, В.А., Юленец, Ю.П., Электрофизический метод в технологии получения биодизельного топлива в микрореакторе, *Известия СПб гос. технол. ин-та (техн. ун-та)*, 2021, № 56 (82), с. 38.
5. Ляшок, И.А., Ищенко, Е.В., Электроформование волокон из растворов полимеров на основе лекарственных трав, *Современные электрохимические материалы и оборудование. Материалы междунар. науч.-техн. конф., Минск, Беларусь, 2021*. Минск: БГТУ, 2021, с. 234.
6. Бошняга, Ю., Болога, М., Агарвал, Е., О прогрессе в области нетепловой микробиологической

- стерилизации с использованием импульсных электрических полей высокой интенсивности, *Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики: Сб. докл. XII Межд. научн. конф., Петергоф, Россия, 2019*. Санкт-Петербург: Свое издательство, 2019, с. 189.
7. Gomez-Gomez, A., Brito-de la Fuente, E., Gallegos, C., Garcia-Perez, G.V., et al., Combined pulsed electric field and high-power ultrasound treatments for microbial inactivation in oil-in-water emulsions, *Food Control*, 2021, vol. 130, art ID 108348. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108348>.
 8. Бурдо, О.Г., Тришин, Ф.А., Терзиев, С.Г., Гаврилов, А.В., и др., Электродинамические технологии – эффективное решение проблем пищевой индустрии, *ЭОМ*, 2020, т. 56, № 4, с. 74. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3970438>.
 9. Han, Z., Cai, M.-J., Cheng, J.-H. and Sun, D.-W., Effects of electric fields and electromagnetic wave on food protein structure and functionality: A review, *Trends Food Sci. Technol.* 2018, v. 75, p. 1. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.02.017>.
 10. Jadhav, H.B., Annappure, U.S. and Deshmukh, R.R., Non-thermal technologies for food processing, *Front. Nutr.*, 2021, vol. 8, art ID 657090. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.657090>.
 11. Корко, В.С., Челомбитько, М.А., Исследование влияния энергетических факторов на изменение свойств и активацию воды в технологических процессах сельского хозяйства, *Промышленность и сельское хозяйство*, 2021, № 12, с. 19.
 12. Смирнов, А.П., Хвощан, О.В., Исследование влияния технологических условий эксплуатации электроразрядных установок на предпробойные характеристики электрического разряда, *ЭОМ*, 2022, т. 58, № 5, с. 71.
 13. Singh, R., Lapp, G., Velardo, J., Long, P.T., et al., Battery cooling options in electric vehicles with heat pipes, *Front. Heat Mass Transf.*, 2021, vol. 16, no. 2, p. 1. <https://doi.org/10.5098/hmt.16.2>.
 14. Zhang, Z., Wang, X. and Yan, Y., A review of the state-of-the-art in electronic cooling, *e-Prime – Adv. Electric. Eng. Electron. Energy*, 2021, vol. 1, art ID 100009. <https://doi.org/10.1016/j.prime.2021.100009>.
 15. Васильев, Л.Л., Журавлёв, А.С., Гракович, Л.П., Рабецкий М.И. и др., Термосифоны с различной организацией движения теплоносителя, *Тепло- и массоперенос*. Сб. научн. трудов. Минск: ИТМО им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, 2019, с. 14.
 16. Holman, J.P., *Experimental Methods for Engineers*. Stenquist, B. (Ed.). New York: McGraw-Hill, 2012. 739 p.
 17. Kee, Y.Y., Asako, Y., Ken, T.L. and Sidik, N.A.C., Uncertainty of temperature measured by thermocouple, *J. Adv. Res. Fluid Mech. Therm. Sci.*, 2020, vol. 68, no. 1, p. 54. <https://doi.org/10.37934/arfmts.68.1.5462>

Summary

The design, principle of operation and results of the study of two-phase heat conductors, specifically loop thermosyphons with a horizontally located evaporator and condenser and a porous coating in the evaporator, intended for the thermal control of heat-loaded equipment are presented. Two modifications of thermosyphons were tested: 1) with a cylindrical evaporator and liquid cooling of the condenser; 2) with a flat evaporator and an air-cooled condenser. The porous wick contributes to the uniform distribution of the liquid as well as of the heat flow in the longitudinal and cross sections of the evaporator, the alignment of the temperature field over the surface of the evaporator and, consequently, of the cooled object. Thermosyphons are made of copper, working fluids were water and freon R245fa. The aim of the work was to determine the main thermal characteristics of the developed devices: heat transfer capacity, temperature fields along the body, thermal resistance of the thermosyphon and its parts at different thermal loads and filling levels with working fluids. Experimental equipment and research methods are described. The studied devices also have characteristics that allow them to be used in thermal control systems for objects with a high heat release intensity: low thermal resistances, stable operation in a wide range of heat flows, high heat transfer capacity (up to 1.5–1.7 kW), short start-up time, dynamic exit to a stationary mode when the heat load changes. The created devices are designed for the thermal control of electronic, electrical and other equipment with intense heat release.

Keywords: thermosyphon, heat pipe, heat transfer, cooling of electronics, thermal control