

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)

ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН
POWER ENGINEERING, HEAT AND MASS TRANSFER

https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-4-320-335
УДК 536.24



Обзор

А. А. Гаспорович*, М. А. Кузьмич

*Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси,
ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь*

**АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
И СОЗДАНИЯ ДВУХФАЗНЫХ ТЕРМОСИФОНОВ ДЛЯ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ**

Аннотация. Выполнен краткий анализ актуальных разработок, исследований и применения двухфазных термосифонов в технике. Наиболее актуальным в данный момент является поиск перспективы применения термосифонов для охлаждения электроники (силовой и микроэлектроники). При этом рассмотрены и другие возможности использования данного теплообменного элемента: стабилизация температуры почвы, консервация вечной мерзлоты, охлаждение теплонагруженного оборудования, в составе систем кондиционирования теплообменников, а также в атомной промышленности. Особое внимание удалено выбору рабочей жидкости и поиску оптимального коэффициента наполнения устройства, способам интенсификации теплообмена и влиянию конструкции термосифона на его производительность.

Ключевые слова: системы охлаждения, термосифон, теплообмен, испаритель, рабочая жидкость

Благодарности: исследования выполнены при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № Т23РНФ-227).

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: Гаспорович Алёна Александровна – научный сотрудник Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, e-mail: a.gasporovich@hmti.ac.by; Кузьмич Максим Александрович – научный сотрудник Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, e-mail: KuzmichMA@hmti.ac.by

Вклад авторов: Гаспорович Алёна Александровна – сбор литературных данных написание текста рукописи; Кузьмич Максим Александрович – сбор, анализ и обобщение литературных данных.

Для цитирования: Гаспорович, А. А. Анализ технологий проектирования и создания двухфазных термосифонов для систем охлаждения / А. А. Гаспорович, М. А. Кузьмич // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных наукаў. – 2025. – Т. 70, № 4. – С. 320–335. https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-4-320-335

Поступила в редакцию: 22.04.2025

Доработанный вариант: 29.05.2025

Утверждена к публикации: 03.12.2025

Подписана в печать: 19.12.2025

Review

Aliona A. Gasporovich*, Maxim A. Kuzmich

*A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Science of Belarus,
15, P. Brovka St., 220072, Minsk, Republic of Belarus*

**ANALYSIS OF TWO-PHASE THERMOSYPHON DESIGN AND CREATION TECHNOLOGIES
FOR COOLING SYSTEM APPLICATIONS**

Abstract. A brief analysis of current developments, research, and applications of two-phase thermosyphons in engineering is provided. The most relevant application of thermosyphons today is electronic cooling. (power and microelectronics). Other possibilities for using this heat exchange element were also considered: soil temperature stabilization, permafrost preservation, cooling of heat-loaded equipment, heat exchanger for air conditioning systems, nuclear industry. Working fluid

© Гаспорович А. А., Кузьмич М. А., 2025

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

selection, optimal filling factor of the device, heat transfer intensifying methods, and the thermosyphon design influence on its performance were examined in detail.

Keywords: cooling systems, thermosyphon, heat transfer, evaporator, working fluid

Acknowledgements: the research was carried out with the support of the Belarusian Republican Foundation for Basic Research (grant no. T23РНФ-227).

Conflict of interest: the authors declare that there is no conflict of interest.

Information about authors: Aliona A. Gasporovich – Researcher at A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, e-mail: a.gasporovich@hmti.ac.by; Maxim A. Kuzmich – Researcher at A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, e-mail: KuzmichMA@hmti.ac.by

Contribution of the authors: Aliona A. Gasporovich – collection of literary data writing of the manuscript text; Maxim A. Kuzmich – collection, analysis and generalization of literary data.

For citation: Gasporovich A. A., Kuzmich M. A. Analysis of two-phase thermosyphon design and creation technologies for cooling system applications. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tehnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2025, vol. 70, no. 4, pp. 320–335 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-4-320-335>

Received: 22.04.2025

Modified: 29.05.2025

Approved for publication: 03.12.2025

Signed to the press: 19.12.2025

Введение. Применение двухфазных термосифонов и тепловых труб в современных системах охлаждения позволяет обеспечить быстрый и эффективный отвод тепла и передачу его в зону теплосъема. Двухфазные термосифоны широко используются для систем охлаждения теплонагруженных объектов благодаря способности передавать высокие тепловые потоки на протяженные дистанции без механической прокачки, большому сроку службы, низкой стоимости. Различные типы термосифонов широко используются в промышленности, например, для охлаждения электронных устройств [1–4], солнечных энергетических систем [5; 6] и систем рекуперации тепла [7; 8].

Одним из предпочтительных решений при разработке систем охлаждения электронных компонентов является использование двухфазных контурных термосифонов [9; 10]. В них реализуется принцип пространственного разделения потоков пара и возвращающейся в зону нагрева жидкости, что позволяет значительно уменьшить термическое сопротивление таких устройств. Термосифоны этого типа применяются в системах охлаждения наравне с контурными и пульсационными тепловыми трубами, классическими термосифонами и паровыми камерами.

Двухфазные контурные термосифоны успешно используются для охлаждения элементов силовой электроники. Данные по их работоспособности при различной геометрии и расположении в пространстве представляют практический и научный интерес для разработчиков новых устройств такого типа [11].

В [12] показано, что в стационарном режиме работы эффективность термосифона определяется мощностью источника тепла, площадью конденсатора, температурным напором между рабочим веществом термосифона и охлаждающей жидкостью, теплофизическими свойствами охлаждающей жидкости. Предложенная автором математическая модель позволяет прогнозировать реакцию термосифона, работающего в стационарном режиме, на кратковременное увеличение мощности источника тепла. Правильно спроектированный термосифон должен учитывать соотношение площадей поверхности конденсатора и испарителя, а выбор рабочей жидкости произведен с учетом скрытой теплоты парообразования, теплоемкости, теплопроводности, кинематической вязкости и т. д. Согласно проведенным численным расчетам устройство устойчиво работает в стационарном режиме и менее чем за 2 с возвращается в исходное состояние даже после больших возмущений. Кратковременное повышение тепловой нагрузки на испаритель на 10 % приводит к таким же кратковременным увеличению толщины пленки жидкой фазы на стенке конденсатора за счет возросшего массового расхода рабочей жидкости от испарителя к конденсатору и росту температуры пленки. После возвращения источника нагрева в стационарный режим толщина пленки менее чем за 2 с уменьшается за счет гравитационного гидродинамического стекания, при этом снижается и ее температура. Это важное качество термосифона, благодаря которому обеспечиваются надежные тепловые условия работы охлаждаемых объектов, чувствительных к перегревам.

Термосифоны применяются для охлаждения устройств с очень широким диапазоном сбрасываемых мощностей. Например, в [13] предложен контурный термосифон, спроектированный в контексте теплового управления большим преобразователем мощности среднего напряжения общей мощностью 5 МВт, что соответствует тепловой нагрузке 2,4 кВт на единицу площади охлаждаемой поверхности.

Двухфазные термосифоны для охлаждения электроники. В настоящее время востребованым является охлаждение миниатюрных электронных устройств, а также повышение их интеграции и мощности. Такие устройства могут выделять значительный объем тепловой энергии при высоких плотностях теплового потока [14; 15]. Способ эффективного рассеивания тепла в ограниченном пространстве имеет решающее значение для развития электронных устройств [16].

Растущий спрос на миниатюрные электронные устройства с высокой плотностью сбрасываемых тепловых потоков привел к необходимости создания более эффективных систем охлаждения, способных отводить такие потоки от зоны нагрева. В то время как традиционные методы однофазного охлаждения достигли своих пределов и не достаточны для удовлетворения растущих потребностей в охлаждении электронных устройств, современные двухфазные системы с процессом фазового перехода используют скрытое тепло во время испарения. Это позволяет эффективно рассеивать значительное количество тепла, сохраняя при этом относительно низкую температуру поверхности устройства. Тепловые трубы и термосифоны, использующие процесс фазового перехода, широко применяются в электронных устройствах в качестве распределителей тепла и представляют собой наиболее исследованные устройства для охлаждения электронных изделий.

По мере уменьшения размеров этих устройств растут и запросы на более компактные и эффективные теплоотводящие устройства. Длительное воздействие высоких температур на электронные устройства может привести к снижению производительности и возможному выходу их из строя, поэтому требуется поддерживать не только заданную температуру, но и изотермичность зоны нагрева, не допуская локальных перегревов. Например, современные процессоры имеют возможность сохранять работоспособность при температурах до 100–110 °C, но для продления их срока службы и меньшего износа рекомендуется поддерживать рабочую температуру в пределах 85–90 °C. Поскольку размеры электронных устройств с каждым годом уменьшаются и их мощность возрастает, эффективное рассеивание выделяемого ими тепла становится все более сложной задачей [17], что увеличивает потребность в инновационных решениях для охлаждения электронных устройств. Современные электронные платы содержат множество высокопроизводительных компонентов, таких как центральные процессоры (ЦП), графические процессоры (ГП) и модули памяти, которые во время работы выделяют значительное количество тепла. Эффективное рассеивание тепла имеет решающее значение не только для поддержания оптимальной работы этих компонентов, но также для предотвращения сбоев, связанных с перегревом, и продления срока службы электронных устройств [18].

Базовый принцип работы подобных устройств прост: тепловые трубы или термосифоны, которые зачастую используются в связках по несколько штук, забирают тепло от охлаждающей пластины, имеющей контактную площадку с тепловыделяющим устройством (ЦП/ГП), и переносят его к ребрам радиатора. Тепловыделение современных процессоров составляет 100–250 Вт, графических процессоров (видеокарты) – до 450 Вт, при этом контактная площадка довольно мала (для процессоров – 15–25 см²) и плотности потоков достигают десятков ватт на квадратный сантиметр. Рассеивание тепла происходит, как правило, с использованием воздушного охлаждения (вентилятора). Термосифоны могут отводить тепловую энергию на сравнительно большое расстояние, но не применимы, например, в мобильных электронных устройствах типа смартфонов, где используются тепловые трубы или паровые камеры. Термосифоны позволяют проявлять большую гибкость при проектировании конструкции испарителя и формы конденсатора.

За последние несколько десятилетий было проведено множество исследований тепловых характеристик термосифонов. Так, экспериментально изучены особенности фазового перехода при теплопередаче и работоспособность двухфазного термосифона с различными рабочими телами и рифленой поверхностью испарения [19]. Было обнаружено, что вода как рабочая жидкость превосходит этанол с точки зрения эффективности рассеивания тепла, а рифленая поверхность испарителя улучшает общую скорость теплопередачи. В более поздней работе [20] исследо-

дователи представили осесимметричную двумерную модель тепломассообмена для плоского двухфазного термосифона в форме диска.

Влияние рабочей жидкости и степени заполнения на работу термосифонов. Существует множество факторов, влияющих на эффективность теплопередачи термосифона, в частности коэффициент наполнения, тепловая нагрузка, перепад высот между конденсатором и испарителем, тип рабочей жидкости и конструкция испарителя и конденсатора. Коэффициент наполнения является одним из наиболее важных факторов, влияющих на эффективность теплопередачи. Слишком высокий или слишком низкий коэффициент наполнения ухудшает эффективность теплопередачи. В целом значение или диапазон коэффициентов наполнения, при которых достигается наилучшая эффективность теплопередачи, определяется как оптимальный коэффициент наполнения [21; 22].

Выбор рабочей жидкости играет значительную роль в работе термосифонов, так как напрямую влияет на характеристики теплопередачи и эффективность системы. Различные рабочие жидкости имеют разные теплофизические свойства, такие как плотность, удельная теплоемкость, вязкость и поверхностное натяжение, что обуславливает тепловое поведение системы. Некоторые жидкости могут иметь высокий коэффициент теплопередачи, но при этом не подходить по температуре кипения или вязкости, которые могут повлиять на запуск и циркуляцию в термосифоне. Следовательно, выбор рабочей жидкости имеет важное значение для достижения оптимальных тепловых характеристик и соответствия желаемым условиям применения.

Влияние рабочей жидкости на характеристики термосифона было экспериментально и численно изучено во многих исследованиях с целью определения наиболее подходящей жидкости для конкретного случая. Так, в [17] описана сложная динамика теплопередачи и фазовых изменений внутри термосифона плоской формы; изучается влияние различных рабочих жидкостей, коэффициентов наполнения и характеристик подводимых тепловых потоков на тепловые характеристики системы; проведено моделирование явлений фазового перехода в осесимметричной модели термосифонов дискообразной формы. В данной работе предлагается использовать в термосифонах плоской формы самосмачивающиеся наножидкости, которые улучшают тепловые характеристики и предотвращают пересыхание за счет снижения температуры горячей точки (на 16 °C ниже по сравнению с водой). Результаты исследования показали, что самосмачивающиеся наножидкости имеют улучшенные возможности теплопередачи и сниженный риск высыхания в сравнении с традиционными рабочими жидкостями. Примечательно, что самосмачивающиеся жидкости и самосмачивающиеся наножидкости изменяют поверхностное натяжение при повышении температуры, что эффективно предотвращает высыхание, притягивая жидкость к горячим областям. Кроме того, повышенная теплопроводность наножидкостей во время кипения дополнительно повышает их эффективность.

Авторы [23] исследовали рабочие характеристики двухфазного кольцевого термосифона в сосуде высокого давления для моделирования рабочего состояния термосифона в системе охлаждения с пассивной защитной оболочкой (рис. 1). В качестве рабочей жидкости использовалась вода (коэффициент заполнения 40–65 %), конденсатор был помещен в кипящий водяной бак при температуре 100 °C, а испаритель – в сосуд высокого давления, экспериментальный диапазон давления в котором составлял 0,32–0,46 МПа. При давлении в сосуде ниже 0,36 МПа наименьшее термическое сопротивление достигалось при более низких коэффициентах заполнения. По мере увеличения давления в сосуде более высокие коэффициенты заполнения приводят к лучшей теплопередаче. Однако чем выше коэффициент заполнения, тем выше давление, необходимое для циркуляции, и тем больше потеря давления по пути циркуляции. Поэтому при дальнейшем увеличении давления теплопередача перестает улучшаться, а при еще большем увеличении давления даже ухудшается. Показано, что по мере возрастания давления в сосуде и коэффициента заполнения увеличивается секция переохлаждения и уменьшается секция перегрева в испарителе. Поведение теплопередачи в трубке основано на конвективной теплопередаче и теплопередаче пузырькового кипения при низком тепловом потоке.

В [24] представлена гидродинамическая модель для изучения изменения температуры в закрытых кольцевых термосифонах с различными уровнями заправки рабочей жидкости – от 40 до 80 % от объема термосифона. Авторами рассчитан перепад давления, приведенная скорость, коэффи-

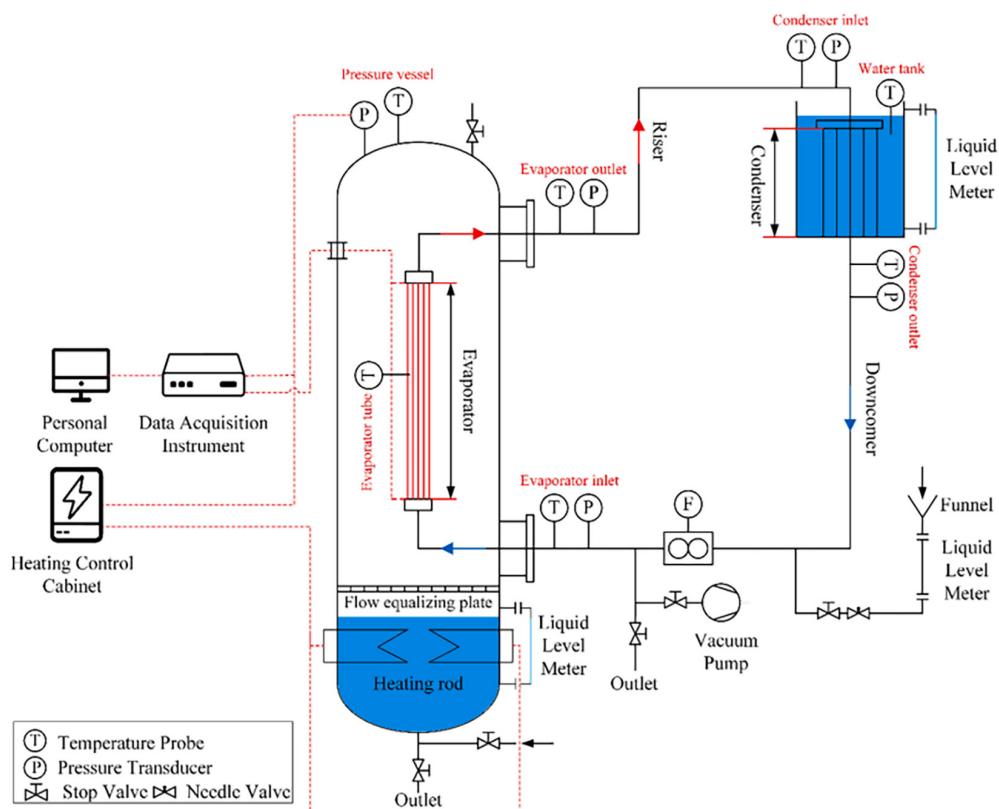


Рис. 1. Схема экспериментальной установки [23]

Fig. 1. Scheme of the experimental setup [23]

циент теплопередачи и теплопередача при различных условиях наполнения. Установлено, что коэффициент заполнения рабочей жидкостью напрямую влияет и на давление в системе, поскольку чем меньше жидкости в контуре, тем быстрее она испаряется и происходит возрастание давления. При этом высокая степень заполнения термосифона негативно влияет на его коэффициент теплоотдачи, а также на скорость пара и жидкости.

Сравнительно низкие характеристики теплопередачи традиционных жидкостей, используемых для регулирования или контроля рабочей температуры в обычных радиаторах, двигателях и других промышленных устройствах, обусловили необходимость поиска новых смесей или растворов жидкостей с улучшенными теплофизическими свойствами. Среди этих новых изучаемых классов есть наножидкости – смесь традиционных жидкостей, к которым добавлены наночастицы различных типов и концентраций. Возможность контролировать или проектировать различные теплофизические свойства таких жидкостей как по отдельности, так и в совокупности, может дать возможность значительно повысить общую производительность системы. Особый интерес представляет возможность добавления в жидкости наночастиц материалов с высокой теплопроводностью для улучшения общей теплопроводности теплоносителей. Этими наночастицами могут быть металлы, оксиды металлов, углеродные нанотрубки или графен, а базовыми жидкостями часто являются вода, этиленгликоль (ЭГ), полиальфаолефин (ПАО) или другие жидкости.

В [25] кратко рассматриваются различные способы применения наножидкостей. Основное внимание уделяется различным параметрам, которые, существенно влияют на термическое поведение в целом и на теплопроводность этих наножидкостей в частности, включая такие параметры, как размер и форма частиц, pH жидкости, поверхностно-активное вещество, тип растворителя, водородные связи, температура, базовые жидкости и выравнивание используемых наночастиц (углеродные нанотрубки, графен и наночастицы оксидов металлов). Было обнаружено, что указанные параметры оказывают влияние на теплопроводность наножидкостей и могут как увеличивать ее, так и уменьшать.

Авторы [26] исследовали кольцевой термосифон, представляющий собой алюминиевую пластину с наножидкостью. В качестве рабочих жидкостей испытывались диэлектрическая жидкость на основе гидрофторэфиров HFE-7000 и графеновая наножидкость, коэффициент заполнения (30, 50 и 70 %) и концентрация графена (0,3, 0,5 и 1 мас.%) варьировались. Авторы определяли влияние однородного и неоднородного источника тепла на тепловое сопротивление, а также проводили визуализацию для понимания процесса кипения. Было установлено, что при подаваемой мощности 90 Вт и коэффициенте заполнения 70 % тепловое сопротивление снижается примерно на 4 % по сравнению с коэффициентом заполнения 30 % для той же подаваемой мощности 90 Вт. Термическое сопротивление снижается на 4 % при увеличении концентрации графена в наножидкости от 0 до 0,5 мас.%. Равномерный источник тепла имеет лучшую производительность теплопередачи, чем неоднородный. Из эксперимента по визуализации заметное количество графена было унесено из испарителя в конденсатор в процессе кипения, особенно при более высокой концентрации 1 %, что вызвало закупорку канала и повышение теплового сопротивления, поэтому концентрация графена должна поддерживаться ниже 0,5 %.

Исследование характеристик теплопередачи контурного и традиционных термосифонов с использованием наножидкости $\text{Fe}_x\text{O}_y/\text{вода}$ и $\text{Cu}_x\text{O}_y/\text{вода}$ в качестве теплоносителей описано в [27]. Авторы разработали методику получения наножидкостей с использованием нанопорошков, полученных лазерным распылением мишени. Экспериментальные исследования указывают, что наножидкости являются перспективными в качестве теплоносителя в двухфазных системах, эффективно повышая коэффициент теплопередачи до 25–50 %. Массовая концентрация наночастиц увеличивает коэффициент теплопередачи и, следовательно, снижает тепловое сопротивление кольцевого термосифона по сравнению с чистой водой. Также в работе показано, что наножидкости являются перспективными в качестве рабочей жидкости в двухфазных системах, эффективно повышая коэффициент теплопередачи до 20–25 %. Кроме того, величина критического теплового потока значительно возросла (на 30 %) по сравнению с чистой водой, что свидетельствует об эффективности использования наножидкостей в традиционных термосифонах.

Интенсификация теплообмена в термосифонах. Разработка новых конструкций термосифонов происходит одновременно с ростом спроса на эффективные пассивные и экологичные устройства рассеивания тепла. Секция испарителя является ключевой в теплообмене такого типа устройств. Среди различных методов изменения конструкции испарителя наиболее простым и эффективным является модификация внутренней поверхности стенок испарителя. В [28] выполнен анализ эффективности теплопередачи двухфазного контурного термосифона с внутренней стенкой испарителя, усиленной нанопористыми и микропористыми структурами. Были обнаружены три режима течения: пузырьковый поток с пузырьковым кипением, турбулентный поток пар-жидкость с обратным потоком и разделенный поток пар-жидкость при высоких тепловых потоках. В ходе исследований зафиксированы два основных типа нестабильности, вызванных неэффективной теплопередачей при кипении и испарении: 1) при малых тепловых потоках, где присутствовал обратный поток; 2) при высоких тепловых потоках, когда подавлялся режим пузырькового кипения и периодически образовывались локальные пересыхания. Добавление на внутренние стенки испарителяnano- и микроструктурированных поверхностей препятствовало возникновению колебаний, вызывающих нестабильность потока, во всем диапазоне и увеличило коэффициент теплопередачи в связи с более высокой плотностью зарождения и частоты отрыва пузырьков.

Чтобы решить проблему теплопередачи с высоким тепловым потоком, авторы работы [29] также сосредоточились на модификации испарителя, отметив при этом, что нельзя игнорировать влияние конденсатора на всю систему. Авторами разработан контурный термосифон с воздушным охлаждением и конденсатором, состоящим из змеевидной медной трубы и гофрированных алюминиевых ребер. Эксперимент подтвердил, что конденсатор такой конструкции обладает превосходными характеристиками и его можно использовать совместно с контурным термосифоном для реализации теплового потока $266,7 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$. Применение змеевидного трубчатого испарителя приводит к двум видам нестабильности потока, а степень заполнения является ключевым фактором, влияющим на присутствие нестабильности потока. По наблюдениям авторов, оптимальным выбором является высокая степень наполнения, которая позволяет избежать неста-

бильности потока и инициализирует более быстрый переходный процесс. При этом температура воздуха мало влияет на термическое сопротивление и максимальную разность температур контурного термосифона, поэтому данный термосифон можно использовать в различных погодных условиях. Однако экстремальные погодные условия (например, чрезвычайно высокая/низкая температура) могут повлиять на работу контурного термосифона. Такой контурный термосифон со змеевидным ребристым трубчатым конденсатором с оптимизированным высоким коэффициентом заполнения может использоваться в мощном электронном оборудовании с реализацией наружного отвода тепла.

Применение термосифонов в различных областях. Термосифоны используются во многих областях техники, включая, помимо прочего, космические системы, автомобильную промышленность, железнодорожную отрасль, охлаждение электрооборудования, электроники и лопаток турбин, теплообменники, системы контроля влажности в пищевой промышленности, фармокологии, солнечные энергетические системы и атомная промышленность.

Широкое распространение получили двухфазные термосифоны, использующиеся для стабилизации температур (сохранения почвы в замороженном состоянии) в регионах вечной мерзлоты [30]. Эти термосифоны, как правило, с одним закопанным в землю концом, а вторым – выведенным на поверхность и обдуваемым воздухом, работающие за счет подбора подходящих рабочих жидкостей с низкой температурой кипения. Они широко используются в условиях холодного климата для поддержания температуры автодорог, железных дорог, нефтепроводов в Америке, России и Китае. Наиболее приметным является Транс-Аляскинский трубопровод с примерно 120 тыс. установленных термосифонов, которые обеспечивают низкую температуру почвы под ним.

Рассматривается применение термосифонов даже в более нетрадиционных целях, таких как сохранение археологических памятников в Арктике или получение низкотемпературной энергии из отходов. В холодном климате термосифоны используются для консервации вечной мерзлоты и борьбы с обледенением дорог. Термосифоны успешно использовались для предотвращения миграции загрязняющих веществ из хвостохранилищ в Канаде и России.

В [31] приводится обзор российского опыта по термостабилизации грунта с помощью термосифонов. В частности, рассматриваются возможности размещения испарителя термосифона в корпусе сваи, а также решения для термостабилизации грунтов под сооружениями большой площади или под группами зданий.

С помощью добавления в конструкцию ветряной мельницы термосифон был использован для сохранения земляного полотна в зоне вечной мерзлоты [32]. Такое устройство (рис. 2) может применяться для пассивного охлаждения, а также может быть адаптировано для охлаждения насыпей, оснований взлетно-посадочных полос, трубчатых фундаментов и других сооружений. Результаты испытаний показали, что оно способно эффективно охлаждать земляное

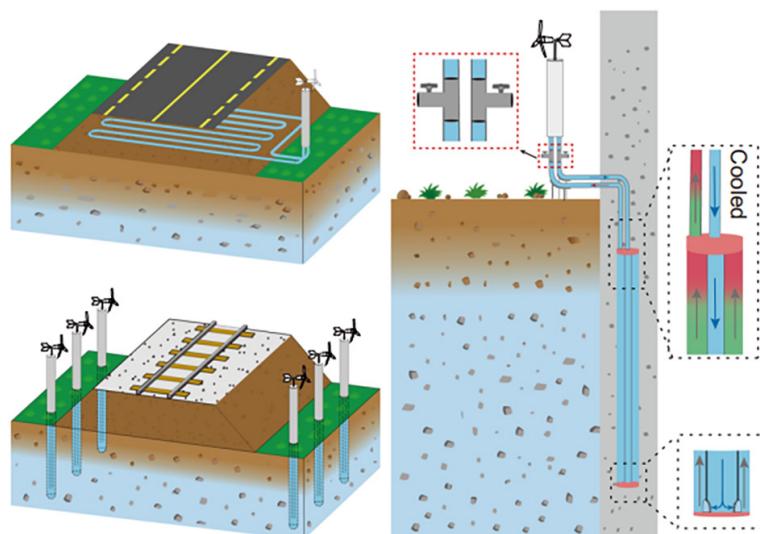


Рис. 2. Конструкция рабочего устройства и возможности его применения.

Длина подземной части в исследуемой работе составляла 8 м [32]

Fig. 2. The working device and its application possibilities.

The length of the underground part in the work under study was 8 m [32]

полотно в зоне вечной мерзлоты на глубине до 8,0 м и радиусом 1,5 м на 0,6–1,0 °C при средней мощности 68,03 Вт.

Обеспечение допустимого температурного режима теплонагруженного и энергонасыщенного оборудования стало основной целью работы [33]. Были рассмотрены теплофизические аспекты и эффективность системы в энергетическом теплонагруженном оборудовании термосифонов. Разработанный вспомогательный цилиндрический термосифон (рис. 3) в составе саморегулирующейся системы охлаждения способен отвести тепловой поток в диапазоне 0,18–2,60 кВт/м² в режиме с интенсивным испарением теплоносителя (без кипения) на его нижней крышке и воздушным охлаждением конденсатора за счет естественной конвекции.

Были исследованы различные рабочие жидкости и уровни заполнения (этанол показал лучшие результаты, чем дистиллированная вода), а также влияние теплоизоляции на эффективность зоны конденсации (теплоотдача ухудшилась, что заметно повлияло на характеристики устройства). Такие системы могут быть использованы на практике в качестве саморегулирующихся теплообменников, обеспечивающих допустимый температурный режим для теплонагруженного оборудования с умеренными тепловыми потоками.

В [34] приводится моделирование схемы отвода остаточных тепловыделений отработавших топливных сборок в шахте-хранилище с использованием термосифонов. Испаритель рассматриваемой термосифонной системы погружен в воду шахты-хранилища, а конденсатор выведен за пределы здания для теплового контакта с атмосферным воздухом. Была исследована эффективность теплоотвода с использованием различных геометрических форм вытяжных труб (рис. 4), а также зависимость теплоотвода от температуры окружающего воздуха. Из рассмотренных наиболее эффективной оказалась эллиптическая форма вытяжной трубы с расположением трубок конденсатора в нижней части (рис. 4, g).

Для охлаждения бассейна с отработанным ядерным топливом с температурой 45–80 °C в [35] авторами было предложено использовать двухфазный термосифон длиной 3 м (рис. 5). В ходе работ были определены: нижний предел с частичным пересыханием – 20 % заправки рабочей жидкостью, предел кипения – 75 % (когда кипение не возникает вследствие недостаточного нагрева для такого объема жидкости) и предел затопления – 100 %. При этом наивысшая эффективность охлаждения достигается с уровнем заполнения 30 %, что справедливо для всех рас-

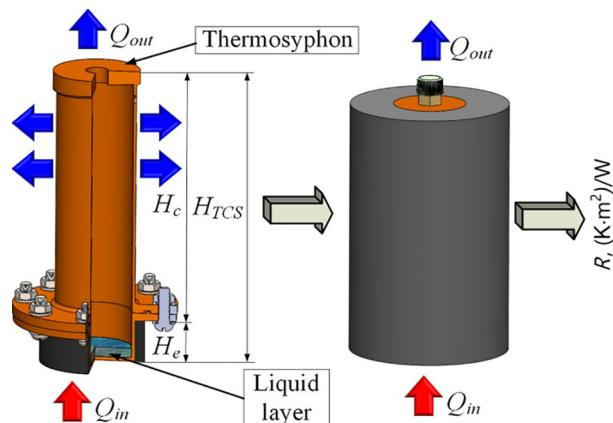


Рис. 3. Общий вид изучаемого устройства с и без теплоизоляции [33]

Fig. 3. General view of the studied device with and without thermal insulation [33]

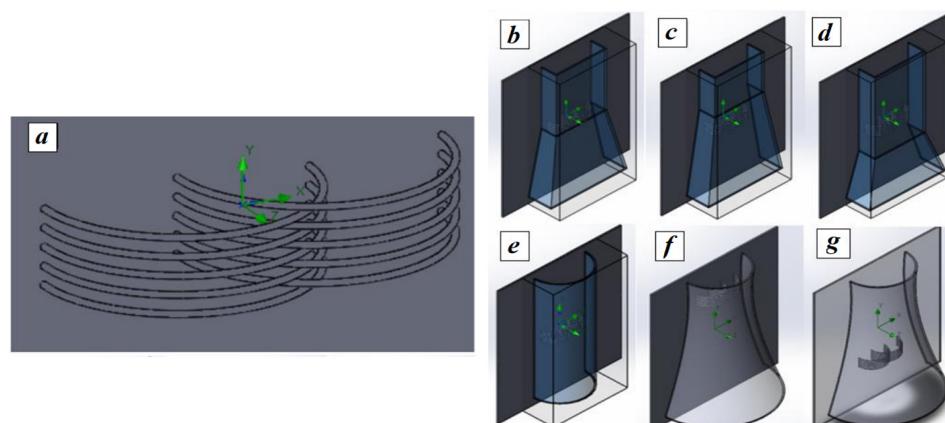


Рис 4. Конденсационная часть термосифона (a) и варианты геометрических форм вытяжной трубы (b–g) [34]

Fig. 4. Condensation part of the thermosyphon (a) and variants of geometric shapes of the exhaust pipe (b–g) [34]

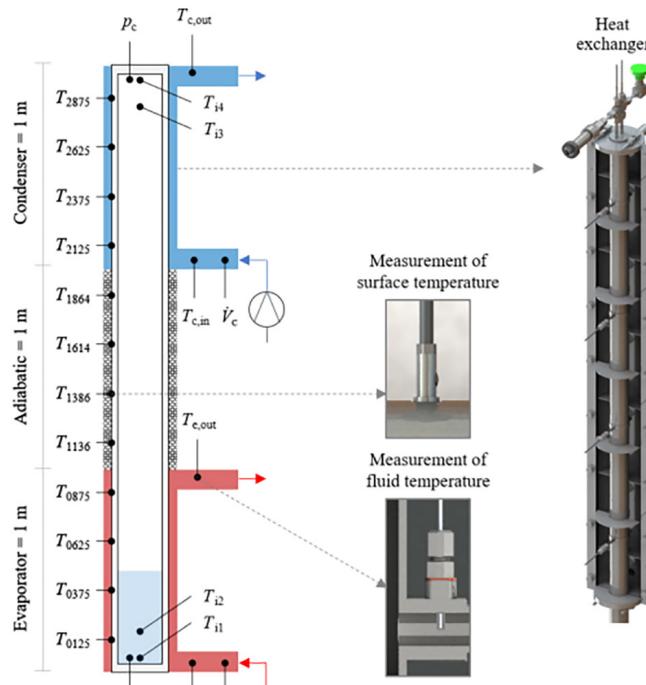


Рис. 5. Двухфазный термосифон для охлаждения бассейна с отработанным ядерным топливом [35]

Fig. 5. Two-phase thermosyphon for cooling a pool with spent nuclear fuel [35]

В [37] авторы предложили новый пластинчатый термосифон для охлаждения элементов телекоммуникационной системы. Были исследованы тепловые характеристики как свободного, так и принудительного конвективного охлаждения в вертикальном и горизонтальном направлениях. Экспериментальные результаты показали более низкое тепловое сопротивление при более

смотренных температур охлаждаемой жидкости.

Активное развитие и производство электромобилей – одна из наиболее актуальных на сегодняшний день тем. Для увеличения мощности электромотора необходимо прежде всего решить проблему его охлаждения. В [36] предложено использование вращающихся кольцевых термосифонов в роторе синхронного электродвигателя на постоянных магнитах. Приводится численное моделирование одно- и двухконцевых термосифонов (рис. 6). Такие термосифоны позволяют значительно уменьшить осевые градиенты температур и снизить общий температурный уровень в целом по сравнению с ротором без термосифонов. При частотах вращения ротора и электрических токах в диапазонах 1200–1500 об/мин и 1000–1200 А максимальные температуры в роторе с одно- и двухконцевыми вращающимися кольцевыми термосифонами соответственно снижаются на 8–14 °C и 10–22 °C относительно ротора без термосифонов.

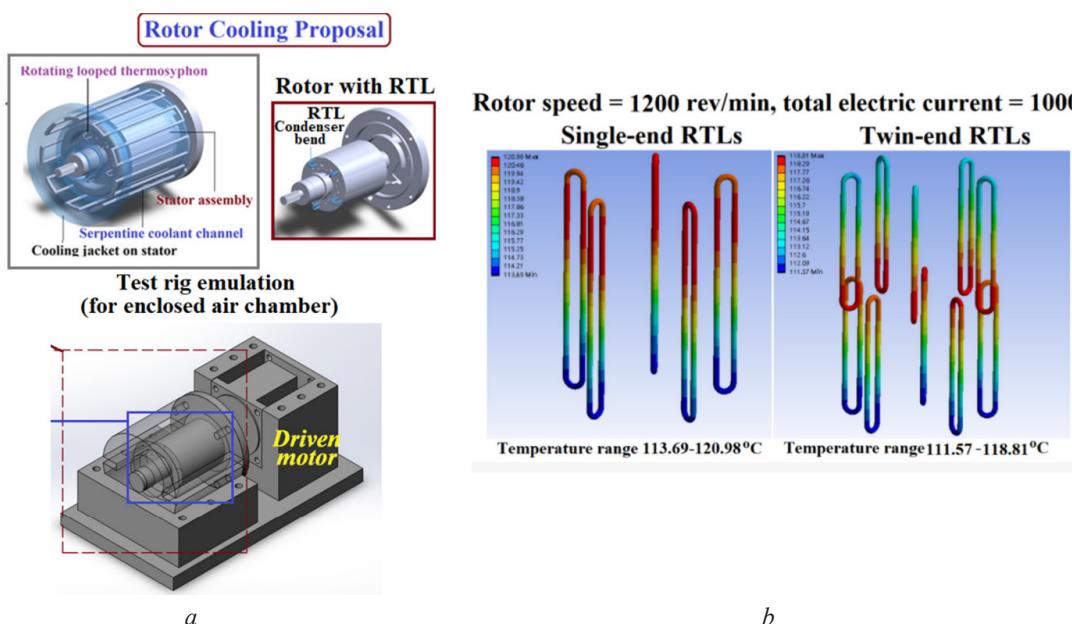


Рис. 6. Статор и ротор охлаждаемого электромотора и предлагаемый принцип охлаждения с помощью кольцевых термосифонов (а); одно- и двухконцевые термосифоны (пространственно расположенные в роторе)

и градиенты температур на них при скорости ротора 1200 об/мин и силе тока 1000 А (б) [36]

Fig. 6. Stator and rotor of a cooled electric motor and the proposed cooling principle using ring thermosyphons (a); Single- and double-ended thermosyphons (spatially located in the rotor) and temperature gradients on them at a rotor speed of 1200 rpm and a current of 1000 A (b) [36]

высоких коэффициентах наполнения и высоких тепловых потоках. Авторы также пришли к выводу, что благоприятная гравитационная ориентация увеличила интенсивность циркуляции жидкости в испытательном вертикальном пластинчатом термосифоне, что привело к лучшим по сравнению с горизонтальной ориентацией тепловым характеристикам. Также сделан вывод, что для охлаждения телекоммуникационного узла наиболее оптимальным является вертикальный термосифон.

В [38] описаны эксперименты с плоским термосифоном в вертикальной ориентации для управления температурой авионики (электронного оборудования на борту самолета). Авторами было предложено решение для повышения эффективности отвода тепла от электронных корпусов в авиационной промышленности (рис. 7). В качестве термически активной стенки шасси был спроектирован и изготовлен плоский термосифон, состоящий из девяти пластин из нержавеющей стали, сложенных друг на друга и соединенных диффузионной сваркой. Он был изготовлен и испытан при пяти различных условиях нагрева (меняя размер и положение нагревателя) и четырех коэффициентах заполнения, а также пустой (без рабочей жидкости) для сравнения. Тепловое сопротивление варьировалось от 0,047 до 0,327 °C/Вт для испытаний с оптимальным коэффициентом заполнения. Увеличение входной мощности улучшило тепловые характеристики плоского термосифона, тогда как уменьшение размера нагревателя отрицательно на них повлияло. Термическое сопротивление нового термосифона оказалось конкурентоспособным по сравнению с другими плоскими тепловыми трубками, приведенными авторами.

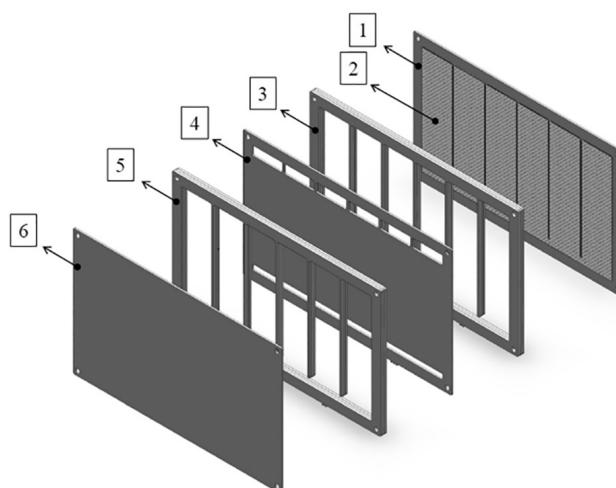
Авторы [39] изучали охлаждающие характеристики термосифонов в гибридных системах кондиционирования воздуха с радиационным охлаждением. С использованием программного обеспечения OpenModelica проводилось моделирование таких систем для анализа влияния структурных параметров на производительность. Также даны оценки потенциала энергосбережения при применении радиационного охладителя на основе термосифона в жилых домах в пяти климатических зонах Китая. Результаты показали, что годовое потребление электроэнергии на охлаждение может быть снижено на 41–56 %, а период окупаемости для одноэтажного семейного дома с оптимизированным радиационным охладителем на основе термосифона во всех пяти климатических зонах Китая составляет приблизительно от 8,4 до 10,5 лет.

В [40] исследуется интеграция термосифонов с радиационными охладителями в системах кондиционирования на основе CO₂. Выполнен анализ условий для повышения энергоэффективности и снижения тепловой нагрузки в зданиях. Максимальные приросты КПД и эксергетической эффективности составили 33,8 и 29,1 % соответственно, что сопоставимо с эффективностью интегрированной солнечной фотоэлектрической системы.

Авторы [41] рассмотрели принципы работы контурного термосифона и возможности его применения в системе охлаждения центра обработки данных. Отмечается влияние выбора хладагента и коэффициента заполнения, а также диаметра трубок на работу контурного термосифона. Рассмотрено применение контурного термосифона как в охлаждении на уровне комнаты, так и на более

Рис. 7. Схема пластин, из которых состоит плоский термосифон: 1 – замыкающая пластина испарителя; 2 – пять слоев сетчатого фитиля, приваренных точечной сваркой поверх пластины испарителя; 3 – набор из трех гребневидных пластин; 4 – промежуточная пластина; 5 – набор из трех гребневидных пластин; 6 – замыкающая пластина конденсатора

Fig. 7. Schematic of the plates that compose the flat thermosyphon: 1 – evaporator closing plate; 2 – five layers of screen mesh spot welded over the evaporator plate; 3 – set of three comb-like plates; 4 – intermediate plate; 5 – set of three comb-like plates; 6 – condenser closing plate



локальных уровнях: охлаждение стойки с охлаждаемой электроникой и отдельных чипов. Также представлена комбинированная система компрессора и контурного термосифона, которая может использоваться для охлаждения базовой станции телекоммуникаций. Указывается на заметное улучшение энергоэффективности таких устройств по сравнению с использованием только кондиционирования воздуха в качестве метода охлаждения, поскольку система может использовать холодный уличный воздух непосредственно в качестве теплоотвода. В зависимости от температуры воздуха возможны различные режимы работы такой системы.

Разработка пассивного охлаждения трехмерных многослойных интегрированных микросхем с использованием двухфазного миниатюрного термосифона приведена в [42]. Особенностью является то, что несколько нагревателей (чипов) пространственно разделены и охлаждаются одним устройством (рис. 8). Авторы рассматривали такие параметры, как угол наклона испарителя, вертикальное разделение между испарителем и конденсатором, а также режимы кипения на выходе из испарителя. Определено, что увеличение высоты стояка путем изменения угла наклона устройства заметно улучшает эффективность охлаждения. Однако большие углы наклона испарителя не всегда способствовали повышению эффективности охлаждения, особенно при большей высоте стояка. При более высокой скорости потока угол наклона 0° обеспечивал несколько лучшую эффективность охлаждения, чем другие углы наклона. В целом такая схема эффективно справляется с охлаждением нескольких различных электронных компонентов с разным уровнем тепловыделения и является достаточно компактной для применения в дата-центрах.

Двухфазный кольцевой термосифон обладает значительными преимуществами в высокоеффективной передаче тепла на большие расстояния для различных применений в тепловых машинах и энергетике и не требует дополнительного потребления энергии. В [43] экспериментально исследованы теплопередающие характеристики двухфазного кольцевого термосифона с микроканальным испарителем и проведено их сравнение с характеристиками двухфазного кольцевого термосифона с гладкотрубным испарителем. В качестве рабочей жидкости использовался 1,1,1,3,3-пентафтторпропан (R245fa) при объемном коэффициенте наполнения 50–80 %. Результаты показали, что дополнительные микроканавки позволили сократить время запуска и достигнуть более низкой максимальной температуры по сравнению с температурным перерегулированием. Контурный термосифон с микроканальным испарителем показал более низкие температуры испарителя и лучшую изотермичность по сравнению с термосифоном с гладкотрубным испарителем. Структуры с микроканалами могут смягчить локальное прерывистое пересыхание при умеренных и высоких уровнях потребляемой мощности для коэффициентов заполнения 50 и 60 %. Добавление структур с микроканавками улучшило параметры теплопередачи термосифона с гладкотрубным испарителем, обладающим более низким термическим сопротивлением.

Фирмой Thermacore (США) были разработаны две конструкции контурных термосифонов с капиллярными структурами для охлаждения электроники: мощный контурный термосифон

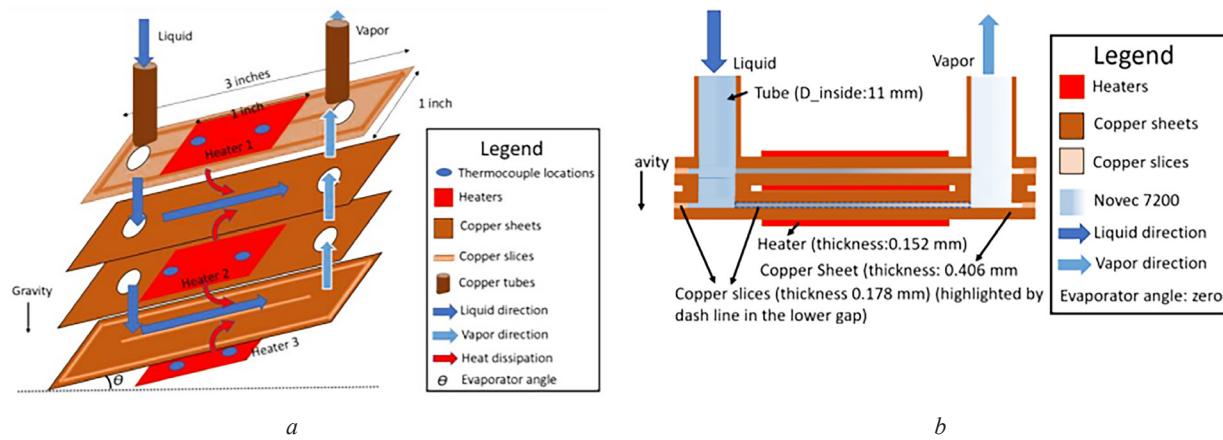


Рис. 8. Схема (a) и сечение (b) моделированного испарителя термосифона для охлаждения трехмерных многослойных интегрированных микросхем [42]

Fig. 8. Schematic (a) and cross-section (b) of a simulated thermosyphon evaporator for cooling three-dimensional multilayer integrated circuits [42]

с горизонтальным испарителем в виде U-образной трубы, и контурный термосифон с горизонтальными трубопроводами и плоским испарителем, нагреваемым с обеих сторон. Испарители в обоих случаях были разработаны с учетом совместимости с компонентами электроники [44]. Для того чтобы избежать замерзания (при температурах окружающей среды ниже 0 °C), в качестве рабочих жидкостей были предложены метanol и этиловый спирт. Результаты испытаний показали, что контурный термосифон с капиллярными структурами может работать с относительно высокими тепловыми потоками на стенке испарителя – до 70 Вт/см² (с метанолом в качестве рабочей жидкости).

Заключение. Данная работа представляет собой краткий обзор результатов последних разработок, исследований и практического применения в различных областях техники двухфазных теплопередающих устройств – двухфазных термосифонов. Рассмотрены возможности интенсификации теплообмена и влияние геометрии термосифона, в частности области испарителя, на его производительность. Приведены исследования влияния рабочей жидкости и объема заполнения. Выполнен анализ ряда работ, описывающих применения двухфазных термосифонов в разных областях, в частности, для термостабилизации грунта, охлаждения теплонаагруженного оборудования или объектов с зонами постоянного интенсивного тепловыделения, а также охлаждения электроники, в том числе миниатюрных чипов.

Список использованных источников

1. Experimental investigation on air-cooling type loop thermosyphon thermal characteristic with serpentine tube heat exchanger / Y. He, C. Hu, H. Li [et al.] // International Journal of Refrigeration. – 2022. – Vol. 138. – P. 52–60. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2022.03.009>
2. Liu, Q. Experimental Study on Thermosyphon for Shipboard High-Power Electronics Cooling System / Q. Liu, K. Fukuda, P. F. Sutopo // Heat Transfer Engineering. – 2014. – Vol. 35. – P. 1077–1083. <https://doi.org/10.1080/01457632.2013.863096>
3. Experimental study on the effect of filling ratio on an R141b two-phase thermosyphon loop with a horizontal parallel tube evaporator / M. Yao, Y. Gan, Q. Luo [et al.] // International Journal of Refrigeration. – 2022. – Vol. 137. – P. 230–243. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2022.02.013>
4. Zamanifard, A. An experimental evaluation of the performance of a remote 2U loop thermosyphon / A. Zamanifard, C.-C. Wang // Applied Thermal Engineering. – 2024. – Vol. 248, part B. – Art. ID 123243. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123243>
5. A novel thermosyphon cooling applied to concentrated photovoltaic-thermoelectric system for passive and efficient heat dissipation / H. Yao, W. Pu, J. Wang [et al.] // Applied Thermal Engineering. – 2024. – Vol. 236, part A. – Art. ID 121460. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121460>
6. Experimental optimization on the volume-filling ratio of a loop thermosyphon photovoltaic/thermal system / T. Zhang, Z. Yan, G. Pei [et al.] // Renewable Energy. – 2019. – Vol. 143. – P. 233–242. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.014>
7. Panse, S. S. A thermosiphon loop for high heat flux removal using flow boiling of ethanol in OMM with taper / S. S. Panse, S. G. Kandlikar // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2017. – Vol. 106. – P. 546–557. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.09.020>
8. Matsubara, K. Thermosiphon loop thermal collector for low-temperature waste heat recovery / K. Matsubara, Y. Matsudaira, I. Kourakata // Applied Thermal Engineering. – 2016. – Vol. 92. – P. 261–270. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.09.004>
9. Long horizontal vapordynamic thermosyphons for renewable energy sources / L. L. Vasiliev, L. L. Vassiliev Jr., M. I. Rabetsky [et al.] // Heat Transfer Engineering. – 2019. – Vol. 40, iss. 3–4. – P. 258–266. <https://doi.org/10.1080/01457632.2018.1426252>
10. Development and testing of a novel horizontal loop thermosyphon as a kW-class heat transfer device / L. Vasiliev, A. Zhuravlyov, M. Kuzmich, V. Kulikouski // Applied Thermal Engineering. – 2022. – Vol. 200. – Art. ID 117682. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117682>
11. Кольцевой термосифон для охлаждения теплонаагруженных компонентов электроники / Л. Л. Васильев, А. С. Журавлёв, М. А. Кузьмич [и др.] // Инженерно-физический журнал. – 2023. – Т. 96, № 7. – С. 1740–1747.
12. Фисенко, С. Пленочное течение теплоагента в замкнутом термосифоне / С. Фисенко // Инженерно-физический журнал. – 2022. – Т. 95, № 6. – С. 1148–1152.
13. Modeling and test of a thermosyphon loop for the cooling of a megawatt-range power electronics converter / M. Moustaid, V. Platel, M. Guillet [et al.] // International Journal of Thermofluids. – 2022. – Vol. 13. – Art. ID 100129. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2021.100129>
14. Air-Cooled Loop Thermosyphon Cooling System for High Heat Load CPUs–Part I: Design and Performance Simulation / J. B. Marcinichen, G. S. R. B Armas, G. Rouaze [et al.] // IEEE Transaction Components, Packaging Manufacturing Technology. – 2021. – Vol. 11, iss. 10. – P. 1679–1686. <https://doi.org/10.1109/TCPT.2021.3112080>

15. Review of applications and developments of ultra-thin micro heat pipes for electronic cooling / H. Tang, Y. Tang, Z. Wan [et al.] // Applied Energy. – 2018. – Vol. 223. – P. 383–400. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.072>
16. Impact of working fluid properties on heat transfer and flow characteristics of two-phase loop thermosyphon with high filling ratios / Y. Cai, X. Hu, J. Lu [et al.] // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2025. – Vol. 238. – Art. ID 126482. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4813552>
17. Kalantarpour, R. Enhancing heat transfer in thermosyphons: The role of self-rewetting nanofluids, and filling ratios for improved performance / R. Kalantarpour, K. Vafai // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2024. – Vol. 223. – Art. ID 125284. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125284>
18. Gupta, S. Computational fluid dynamics: innovations in numerical techniques, multi-phase flow modeling, and prospects for sustainable energy applications / S. Gupta, M. Kumar // Journal of Sustainable Urban Futures. – 2023. – Vol. 13, iss. 9. – P. 1–20.
19. Zhang, M. The experimental investigation on thermal performance of a flat two-phase thermosyphon / M. Zhang, Z. Liu, G. Ma // International Journal of Thermal Sciences. – 2008. – Vol. 47, iss. 9. – P. 1195–1203. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2007.10.004>
20. Zhang, M. Numerical simulation and experimental verification of a flat two-phase thermosyphon / M. Zhang, Z. Liu, G. Ma // Energy Conversion and Management. – 2009. – Vol. 50. – P. 1095–1100. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.12.001>
21. Experimental study on the thermal characteristics of micro channel separate heat pipe respect to different filling ratio / L. Ling, Q. Zhang, Y. Yu [et al.] // Applied Thermal Engineering. – 2016. – Vol. 102. – P. 375–382. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.03.016>
22. Experimental study on the influence of initial state parameters on the start-up and heat transfer characteristics of separated heat pipe system / Z. Xinyu, J. Lv, H. Cheng [et al.] // Annals of Nuclear Energy. – 2024. – Vol. 208. – Art. ID 110810. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2024.110810>
23. Experimental investigation of two-phase thermosyphon loop for passive containment cooling / Y. Xuan, J. Hu, X. Chi [et al.] // Applied Thermal Engineering. – 2021. – Vol. 184. – Art. ID 116403. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116403>
24. Sandeep, K. S. Design and thermodynamic analysis of single-loop thermosyphon / K. S. Sandeep, G. Narendra // Proceedings of the Second International Conference on Emerging Trends in Engineering (ICETE 2023). – 2023. – P. 1197–1207. – (Advances in Engineering Research). https://doi.org/10.2991/978-94-6463-252-1_120
25. Nanofluids: key parameters to enhance thermal conductivity and its applications / H. Younes, M. Mao, S. M. Sohel Murshed [et al.] // Applied Thermal Engineering. – 2022. – Vol. 207. – Art. ID 118202. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118202>
26. Fulpagare, Y. Performance of two-phase loop thermosiphon with graphene nanofluid / Y. Fulpagare, D.-Y. Tsai, C.-C. Wang // Applied Thermal Engineering. – 2022. – Vol. 200. – Art. ID 117714. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117714>
27. Кисеев, В. М. Экспериментальное исследование кипения наножидкостей в термосифонах / В. М. Кисеев, О. В. Сажин // Журнал технической физики. – 2023. – Т. 93, вып. 10. – С. 1410–1422. <https://doi.org/10.61011/JTF.2023.10.56278.134-23>
28. Khodabandeh, R. Heat transfer, flow regime and instability of a nano- and micro-porous structure evaporator in a two-phase thermosyphon loop / R. Khodabandeh, R. Furberg // International Journal of Thermal Sciences. – 2010. – Vol. 49, iss. 7. – P. 1183–1192. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2010.01.016>
29. Experimental investigation on air-cooling type loop thermosyphon thermal characteristic with serpentine tube heat exchanger / Y. He, C. Hu, H. Li [et al.] // International Journal of Refrigeration. – 2022. – Vol. 138. – P. 52–60. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2022.03.009>
30. Wagner, A. M. Review of Thermosyphon Applications. Final report ERDC/CRREL TR-14-1 / A. M. Wagner. – Cold Regions Research and Engineering Laboratory (CRREL), 2014. – URL: <https://dot.alaska.gov/stwddes/research/assets/pdf/erdc-crrel-tr-14-1.pdf>.
31. Системы термостабилизации грунта: опыт и перспективы / Д. А. Сидоров, А. А. Куншин, Г. В. Буслаев [и др.] // Neftegaz.RU. – 2022. – № 12. – С. 88–92. – URL: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/arktika/761024-sistemy-termostabilizatsii-grunta-opyt-i-perspektivy/>
32. Qin, Y. Wind-driven device for cooling permafrost / Y. Qin, T. Wang, W. Yuan // Nature Communications. – 2023. – Vol. 14. – Art. ID 7558. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-43375-z>
33. Thermosyphon-assisted cooling system working in the moderate heat flux range / K. O. Ponomarev, G. V. Kuznetsov, E. G. Orlova, D. V. Feoktistov // Thermal Science and Engineering Progress. – 2022. – Vol. 32. – Art. ID 101330. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2022.101330>
34. Моделирование системы пассивного отвода тепла от шахты-хранилища исследовательского ядерного реактора ИВВ-2М при помощи термосифонов / С. М. Глухов, А. Д. Лёзов, Д. Е. Шумков [и др.] // Физика. Технологии. Инновации: сб. ст. VIII Междунар. молодеж. науч. конф. (Екатеринбург, 17–21 мая 2021 г.). – Екатеринбург: УрФУ, 2021. – С. 113–122.
35. Experimental investigation of the heat transfer characteristics, operating limits, and temperature distribution of a prototypically 3 m long two-phase closed thermosyphon for spent fuel pool passive cooling / S. I. C. Castro, M. Kirsch, R. Kulenovic, J. Starflinger // Experimental and Computational Multiphase Flow. – 2024. – Vol. 6. – P. 229–241. <https://doi.org/10.1007/s42757-024-0193-2>
36. Thermal performance improvement by rotating thermosyphon loop in rotor of an interior permanent magnet synchronous electric motor / P. S. Wu, M.-F. Hsieh, Y. E. Lu [et al.] // Inventions. – 2022. – Vol. 7, iss. 2. – P. 37. <https://doi.org/10.3390/inventions7020037>

37. Thermal performance of plate-type loop thermosyphon at sub-atmospheric pressures / V. Tsoi, S. W. Chang, K. F. Chiang, C. C. Huang // Applied Thermal Engineering. – 2011. – Vol. 31, iss. 14–15. – P. 2556–2567. <https://doi.org/10.1016/j.aplthermaleng.2011.04.021>
38. Junior, A. Thermal performance of a novel flat thermosyphon for avionics thermal management / A. Junior, M. Mantelli // Energy Conversion and Management. – 2019. – Vol. 202. – Art. ID 112219. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112219>
39. Optimization study on the performance of a thermosyphon-based radiative cooler / B. Yao, K. Zhang, J. Zhu, S. Wu // Indoor and Built Environment. – 2023. – Vol. 32, iss. 2. – P. 425–439. <https://doi.org/10.1177/1420326X221117758>
40. Bijarniya, J. P. Performance improvement of CO₂ air conditioner by integrating photonic radiative cooler as sub-cooler or/and roof envelope / J. P. Bijarniya, J. Sarkar, P. Maiti // Energy Conversion and Management. – 2022. – Vol. 251, iss. 2. – Art. ID 115019. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115019>
41. Principles of loop thermosyphon and its application in data center cooling systems: A review / D. Tao, X. Chen, H. Cao [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2021. – Vol. 150. – Art. ID 111389. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111389>
42. Hu, Y. Thermosyphon-cooled three-dimensional stacked heat sources / Y. Hu, Y. Joshi // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. – 2021. – Vol. 11, iss. 10. – P. 1695–1702. <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2021.3078758>
43. Thermal characteristics of a two-phase loop thermosyphon with micro-grooved structures inside the evaporator / Y. Hua, J. Qu, W. Yang [et al.] // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2024. – Vol. 224. – Art. ID 125357. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125357>
44. Khrustalev, D. Loop thermosyphons for cooling of electronics / D. Khrustalev // Eighteenth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium. Proceedings 2002 (Cat.No.02CH37311). – IEEE, 2002. – P. 145–150. <https://doi.org/10.1109/STHERM.2002.991360>

References

1. He Y., Hu C., Li H., Hu X., Tang D. Experimental investigation on air-cooling type loop thermosyphon thermal characteristic with serpentine tube heat exchanger. *International Journal of Refrigeration*, 2022, vol. 138, pp. 52–60. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2022.03.009>
2. Liu Q., Fukuda K., Sutopo P. F. Experimental Study on Thermosyphon for Shipboard High-Power Electronics Cooling System. *Heat Transfer Engineering*, 2014, vol. 35, pp. 1077–1083. <https://doi.org/10.1080/01457632.2013.863096>
3. Yao M., Gan Y., Luo Q., Li R., Liu R., Feng J., Mao Y., Li Y. Experimental study on the effect of filling ratio on an R141b two-phase thermosyphon loop with a horizontal parallel tube evaporator. *International Journal of Refrigeration*, 2022, vol. 137, pp. 230–243. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2022.02.013>
4. Zamanifard A., Wang C.-C. An experimental evaluation of the performance of a remote 2U loop thermosyphon. *Applied Thermal Engineering*, 2024, vol. 248, part B, art. ID 123243. <https://doi.org/10.1016/j.aplthermaleng.2024.123243>
5. Yao H., Pu W., Wang J., Qin Y., Qiao L., Song N. A novel thermosyphon cooling applied to concentrated photovoltaic-thermoelectric system for passive and efficient heat dissipation. *Applied Thermal Engineering*, 2024, vol. 236, part A, art. ID 121460. <https://doi.org/10.1016/j.aplthermaleng.2023.121460>
6. Zhang T., Yan Z., Pei G., Zhu Q., Ji J. Experimental optimization on the volume-filling ratio of a loop thermosyphon photovoltaic/thermal system. *Renewable Energy*, 2019, vol. 143, pp. 233–242. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.014>
7. Panse S. S., Kandlikar S. G. A thermosiphon loop for high heat flux removal using flow boiling of ethanol in OMM with taper. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, vol. 106, pp. 546–557. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.09.020>
8. Matsubara K., Matsudaira Y., Kourakata I. Thermosiphon loop thermal collector for low-temperature waste heat recovery. *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 92, pp. 261–270. <https://doi.org/10.1016/j.aplthermaleng.2015.09.004>
9. Vasiliev L. L., Vassiliev L. L., Jr., Rabetsky M. I., Grakovitch L. P., Zhuravlyov A. S., Shapovalov A. V., Rodin A. V. Long horizontal vapordynamic thermosyphons for renewable energy sources. *Heat Transfer Engineering*, 2019, vol. 40, iss. 3–4, pp. 258–266. <https://doi.org/10.1080/01457632.2018.1426252>
10. Vasiliev L., Zhuravlyov A., Kuzmich M., Kulikouski V. Development and testing of a novel horizontal loop thermosyphon as a kW-class heat transfer device. *Applied Thermal Engineering*, 2022, vol. 200, art. ID 117682. <https://doi.org/10.1016/j.aplthermaleng.2021.117682>
11. Vasiliev L. L., Zhuravlyov A. S., Kuzmich M. A., Kulikovskii V. K., Olekhovich V. A. Loop thermosyphon for cooling heat-loaded electronics components. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2023, vol. 96, no. 7, pp. 1708–1715. <https://doi.org/10.1007/s10891-023-02840-8>
12. Fisenko S. P. Film flow of the heat-transfer agent in a closed thermosyphon. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2022, vol. 95, no. 6, pp. 1421–1425. <https://doi.org/10.1007/s10891-022-02610-y>
13. Moustaid M., Platel V., Guillet M., Reynes H., Buttay C. Modeling and test of a thermosyphon loop for the cooling of a megawatt-range power electronics converter. *International Journal of Thermofluids*, 2022, vol. 13, art. ID 100129. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2021.100129>
14. Marcinichen J. B., Armas G. S. R. B., Rouaze G., Thome J. R., Winston Zhang L. Air-Cooled Loop Thermosyphon Cooling System for High Heat Load CPUs—Part I: Design and Performance Simulation. *IEEE Transaction Components, Packaging Manufacturing Technology*, 2021, vol. 11, iss. 10, pp. 1679–1686. <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2021.3112080>

15. Tang H., Tang Y., Wan Z., Li J., Yuan W., Lu L., Li Y., Tang K. Review of applications and developments of ultra-thin micro heat pipes for electronic cooling. *Applied Energy*, 2018, vol. 223, pp. 383–400. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.072>
16. Cai Y., Hu X., Lu J., Li Y., Tang D., Hu C. Impact of working fluid properties on heat transfer and flow characteristics of two-phase loop thermosyphon with high filling ratios. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2025, vol. 238, p. 126482. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4813552>
17. Kalantarpour R., Vafai K. Enhancing heat transfer in thermosyphons: The role of self-rewetting nanofluids, and filling ratios for improved performance. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2024, vol. 223, art. ID 125284. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125284>
18. Gupta S., Kumar M. Computational fluid dynamics: innovations in numerical techniques, multi-phase flow modeling, and prospects for sustainable energy applications. *Journal of Sustainable Urban Futures*, 2023, vol. 13, iss. 9, pp. 1–20.
19. Zhang M., Liu Z., Ma G. The experimental investigation on thermal performance of a flat two-phase thermosyphon. *International Journal of Thermal Sciences*, 2008, vol. 47, iss. 9, pp. 1195–1203. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2007.10.004>
20. Zhang M., Liu Z., Ma G. Numerical simulation and experimental verification of a flat two-phase thermosyphon. *Energy Conversion and Management*, 2009, vol. 50, pp. 1095–1100. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.12.001>
21. Ling L., Zhang Q., Yu Y., Liao S., Sha Z. Experimental study on the thermal characteristics of micro channel separate heat pipe respect to different filling ratio. *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 102, pp. 375–382. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.03.016>
22. Zhou X., Lv J., Cheng H., Fan G., Liu J. Experimental study on the influence of initial state parameters on the start-up and heat transfer characteristics of separated heat pipe system. *Annals of Nuclear Energy*, 2024, vol. 208, art. ID 110810. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2024.110810>
23. Yin X., Hu J., Chi X., Li Y., Nan Z., Wang N. Experimental investigation of two-phase thermosyphon loop for passive containment cooling. *Applied Thermal Engineering*, 2021, vol. 184, art. ID 116403. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116403>
24. Sandeep K. S., Narendra G. Design and thermodynamic analysis of single-loop thermosyphon. *Proceedings of the Second International Conference on Emerging Trends in Engineering (ICETE 2023). Advances in Engineering Research*, 2023, pp. 1197–1207. https://doi.org/10.2991/978-94-6463-252-1_120
25. Younes H., Mao M., Sohel Murshed S. M., Lou D., Hong H., Peterson G. P. Nanofluids: key parameters to enhance thermal conductivity and its applications. *Applied Thermal Engineering*, 2022, vol. 207, art. ID 118202. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118202>
26. Fulpagare Y., Tsai D.-Y., Wang C.-C. Performance of two-phase loop thermosiphon with graphene nanofluid. *Applied Thermal Engineering*, 2022, vol. 200, art. ID 117714. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117714>
27. Kiseev V. M., Sazhin O. V. Experimental investigation of nanofluid boiling in thermosyphons. *Technical Physics*, 2023, vol. 93, iss. 10, pp. 1311–1322. <https://doi.org/10.61011/TP.2023.10.57446.134-23>
28. Khodabandeh R., Furberg R. Heat transfer, flow regime and instability of a nano- and micro-porous structure evaporator in a two-phase thermosyphon loop. *International Journal of Thermal Sciences*, 2010, vol. 49, iss. 7, pp. 1183–1192. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2010.01.016>
29. He Y., Hu C., Li H., Hu X., Tang D. Experimental investigation on air-cooling type loop thermosyphon thermal characteristic with serpentine tube heat exchanger. *International Journal of Refrigeration*, 2022, vol. 138, pp. 52–60. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2022.03.009>
30. Wagner A. M. *Review of Thermosyphon Applications*. Final report ERDC/CRREL TR-14-1. Cold Regions Research and Engineering Laboratory (US), 2014. Available at: <https://dot.alaska.gov/stwddes/research/assets/pdf/erdc-crrel-tr-14-1.pdf>.
31. Sidorov D. A., Kunshin A. A., Buslaev G. V., Lavrik A. Ju., Lavrik A. Ju. Soil thermal stabilization systems: experience and prospects. *Neftegaz.RU*, 2022, no. 12, pp. 88–92. Available at: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/arktika/761024-sistemy-termostabilizatsii-grunta-opyt-i-perspektivy> (in Russian).
32. Qin Y., Wang T., Yuan W. Wind-driven device for cooling permafrost. *Nature Communications*, 2023, vol. 14, art. ID 7558. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-43375-z>
33. Ponomarev K. O., Kuznetsov G. V., Orlova E. G., Feoktistov D. V. Thermosyphon-assisted cooling system working in the moderate heat flux range. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2022, vol. 32, art. ID 101330. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2022.101330>
34. Glukhov S. M., Lezov A. D., Shumkov D. E., Klimova V. A., Tashlykov O. L. Simulation of the passive heat removal system from the storage shaft of the IVV-2M research nuclear reactor using thermosiphons. *Fizika. Tekhnologii. Innovatsii: sbornik statei VIII Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii (Ekaterinburg, 17–21 maya 2021 g.)* [Physics. Technologies. Innovations: Collection of articles of the VIII International Youth Scientific Conference (Yekaterinburg, May 17–21, 2021]. Yekaterinburg, 2021, pp. 113–122 (in Russian).
35. Castro S. I. C., Kirsch M., Kulenovic R., Starflinger J. Experimental investigation of the heat transfer characteristics, operating limits, and temperature distribution of a prototypically 3 m long two-phase closed thermosyphon for spent fuel pool passive cooling. *Experimental and Computational Multiphase Flow*, 2024, vol. 6, pp. 229–241. <https://doi.org/10.1007/s42757-024-0193-2>
36. Wu P. S., Hsieh M.-F., Lu Y. E., Cai W. L., Chang S. W. Thermal performance improvement by rotating thermosyphon loop in rotor of an interior permanent magnet synchronous electric motor. *Inventions*, 2022, vol. 7, iss. 2, p. 37. <https://doi.org/10.3390/inventions7020037>

37. Tsoi V., Chang S. W., Chiang K. F., Huang C. C. Thermal performance of plate-type loop thermosyphon at sub-atmospheric pressures. *Applied Thermal Engineering*, 2011, vol. 31, iss. 14–15, pp. 2556–2567. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.04.021>
38. Junior A., Mantelli M. Thermal performance of a novel flat thermosyphon for avionics thermal management. *Energy Conversion and Management*, 2019, vol. 202, art. ID 112219. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112219>
39. Yao B., Zhang K., Zhu J., Wu S. Optimization study on the performance of a thermosyphon-based radiative cooler. *Indoor and Built Environment*, 2023, vol. 32, iss. 2, pp. 425–439. <https://doi.org/10.1177/1420326X221117758>
40. Prakash Bijarniya J., Sarkar J., Maiti P. Performance improvement of CO₂ air conditioner by integrating photonic radiative cooler as sub-cooler or/and roof envelope. *Energy Conversion and Management*, 2022, vol. 251, iss. 2, art. ID 115019. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115019>
41. Ding T., Chen X., Cao H., He Z., Wang J., Li Z. Principles of loop thermosyphon and its application in data center cooling systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, vol. 150, art. ID 111389. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111389>
42. Hu Y., Joshi Y. Thermosyphon-cooled three-dimensional stacked heat sources. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2021, vol. 11, iss. 10, pp. 1695–1702. <https://doi.org/10.1109/TCMT.2021.3078758>
43. Hua Y., Qu J., Yang W., Zhang T., Zhao Y. Thermal characteristics of a two-phase loop thermosyphon with micro-grooved structures inside the evaporator. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2024, vol. 224, art. ID 125357. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125357>
44. Khrustalev D. Loop thermosyphons for cooling of electronics. *Eighteenth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium. Proceedings 2002 (Cat.No.02CH3731I)*. IEEE, 2002, pp. 145–150. <https://doi.org/10.1109/STHERM.2002.991360>