

УДК 536.24; 629.33.03-83

# Системы терморегулирования теплонагруженного оборудования электротранспорта

Л.Л. Васильев<sup>1</sup>, А.С. Журавлев<sup>1</sup>, С.Н. Поддубко<sup>2</sup>, А.В. Белевич<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, г. Минск, 220072, Беларусь

<sup>2</sup> Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, 220072, Беларусь  
e-mail: LVASIL@hmti.ac.by; bats@ncprmm.bas-net.by

DOI: 10.34759/tpt-2021-13-7-296-307

Поступила в редакцию 25.05.2021

После доработки 10.06.2021

Принята к публикации 12.06.2021

Представлен обзор способов охлаждения компонентов электрических и гибридных транспортных средств, отмечены достоинства и недостатки каждого из методов. Рассмотрены системы терморегулирования на базе двухфазных теплопередающих устройств (тепловых труб и термосифонов), обеспечивающие эффективный отвод избыточного тепла от охлаждаемых объектов. Проанализированы варианты использования тепловых труб и термосифонов для охлаждения и терморегулирования электрических компонентов электротранспорта. Отмечена привлекательность двухфазной пассивной теплопередачи для применения в электромобилях. Приведены схемы и подчеркнуты особенности разработанных двухфазных теплоотводящих устройств (пародинамический термосифон, кольцевые термосифоны с цилиндрическим и плоским испарителями, центробежная тепловая труба и др.). Предложены варианты их применения в системах терморегулирования транспортных средств с электроприводом.

**Ключевые слова:** электротранспорт, терморегулирование, система охлаждения, тепловая труба, термосифон.

## Введение

В большинстве промышленно развитых стран на транспорт приходится 30–35% от общего потребления топлива. При этом двигатели внутреннего сгорания (ДВС) выбрасывают в атмосферу углекислый газ CO<sub>2</sub>, окись углерода CO, оксиды азота NO и другие вредные вещества [1]. В связи с ростом требований к улучшению экологии в настоящее время в мире большое значение придается созданию и совершенствованию гибридных и электрических транспортных средств [2, 3]. Во всех вышеуказанных видах электротранспорта используется силовая электроника, нуждающаяся в интенсивном охлаждении и терморегулировании [4].

Электрические транспортные средства более требовательны к охлаждению из-за электрификации значительного количества компонентов (охлаждение силового привода, навигационных электронных устройств, аккумуляторной батареи, фар, подогрев всасываемого воздуха в кондиционерах и др.) по сравнению с автомобилями с ДВС, у которых в основном требуется охлаждение только двигателя.

Рассматриваемая нами система охлаждения и терморегулирования оборудования применима для всех известных видов электротранспорта, таких как Battery Electric Vehicle – батарейный электромобиль; Hybrid Electric Vehicle – гибридный электромобиль; Plug-in Hybrid

Electric Vehicle – электромобиль с подзарядкой; Fuel Cell Electric Vehicle – электромобиль на топливных элементах [2]. Инвертор, преобразующий постоянный ток высокого напряжения от батареи в переменный ток, подводимый к электродвигателям, является мощным источником тепловыделения наряду с электродвигателем. Транзисторы, выполняющие это преобразование, нагреваются и могут выйти из строя, если их не охлаждать теплообменниками. Выделенное тепло нужно рассеивать, чтобы обеспечить расчетные тепловые режимы эксплуатации компонентов электромобиля. Для современной электронной аппаратуры, используемой в электромобиле, характерны высокая плотность отводимых тепловых потоков, удаленность между источниками и стоками тепла, большая плотность расположения компонентов силовой электроники. В настоящее время существуют различные системы охлаждения электроники: воздушная, жидкостная, с использованием фазопеременных веществ. Воздушная система охлаждения недостаточно эффективна вследствие низкой теплоемкости и теплопроводности воздуха. Кроме того, для организации вынужденной конвекции при обдуве охлаждаемых объектов требуется дополнительный расход энергии на работу вентилятора. Жидкостное охлаждение более эффективно, чем воздушное, однако компоновка оборудования может создавать трудности для подвода жидкости к охлаждаемому объекту, приводящие к усложнению и удорожанию системы. Анализируется также жидкостное охлаждение как статора двигателя, так и его ротора. Постоянные магниты ротора нуждаются в интенсивном охлаждении, поскольку их магнитные свойства ухудшаются при перегреве. Фазопеременные материалы (ФПМ) могут поглощать большое количество тепла в процессе плавления, однако обладают низкой структурной прочностью и теплопроводностью, создают конструктивные проблемы, связанные с возможной утечкой в расплавленном состоянии. Кроме того, время работы системы с ФПМ ограничено: она прекращает работу, когда материал полностью расплавлен. Это создает проблемы при длительных поездках на большие расстояния [5, 6]. Проблема отвода избыточного тепла от

тепловыделяющего электронного оборудования может быть успешно решена с помощью двухфазных теплопередающих устройств, таких как тепловые трубы (ТТ) и термосифоны (ТС). Эти устройства автономны, бесшумны, их работа не требует затрат энергии, что очень важно для беспроводного электротранспорта. Они могут воспринимать тепло от охлаждаемого объекта, отводить его за пределы объема, заполненного оборудованием, и затем передавать его охлаждающей жидкости или воздуху. Такая система эффективна, надежна и удобна в эксплуатации. Тепловые трубы благодаря наличию пористого фитиля работоспособны при различной ориентации в пространстве. При наличии гравитации теплопередающая способность тепловой трубы зависит от ее пространственного положения, однако в диапазоне возможных отклонений автомобиля от горизонтальной плоскости работа системы охлаждения на основе тепловых труб сохраняет стабильность. Классический термосифон намного чувствительнее к положению в пространстве. При его наклонах за пределы оптимальных углов существенно падает его теплопередающая способность, дальнейшее отклонение его оси от вертикали приводит к прекращению функционирования устройства. С помощью тепловых труб можно осуществлять более гибкую компоновку систем охлаждения, это облегчает задачу размещения радиатора или другого стока тепла, что очень важно, поскольку условия охлаждения радиатора зависят от его положения в пространстве. Упрощается также выполнение герметизации охлаждаемых объектов.

В связи с вышеуказанными доводами анализируемая в статье система охлаждения электродвигателей с тепловыми трубами и термосифонами является актуальной и позволяет обеспечить эффективную теплопередачу. Она более надежна в эксплуатации, поскольку отсутствуют движущие компоненты, обеспечены прочная конструкция и небольшой вес. Различные варианты использования тепловых труб и термосифонов для охлаждения и терморегулирования электрических компонентов электротранспорта детально рассмотрены в работе [7]. Теплонагруженные объекты электросилового установок электромобиля и коли-

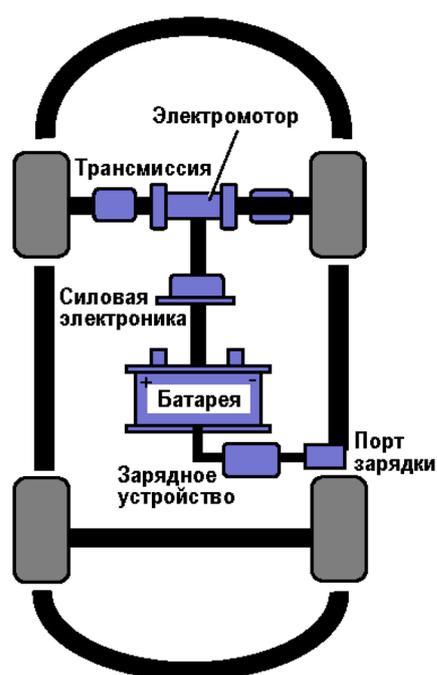


Рис. 1. Электросиловая установка автомобиля. Аккумулятор, двигатель, силовая электроника [7]

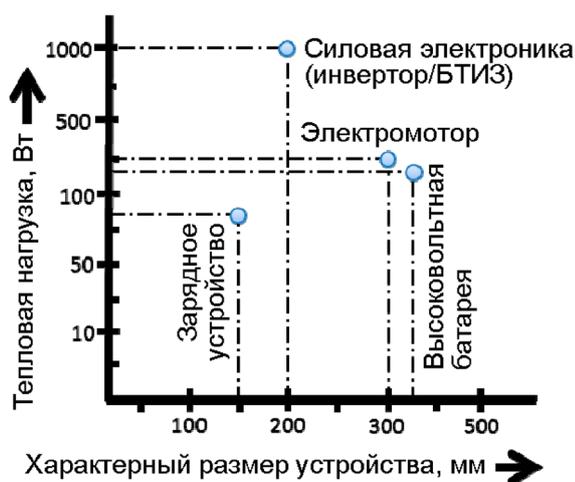


Рис. 2. Тепловая нагрузка от различных компонентов одного модуля силовой установки электромобиля [7]

чество отходящего тепла от различных компонентов одного модуля двигательной установки показаны на рис. 1 и 2.

Создаваемые новые системы охлаждения и терморегулирования силовой электроники электрического и гибридного транспорта перспективны для внедрения в Республике Беларусь и РФ, в частности, в системах терморегулирования аппаратуры электрических и беспилотных транспортных средств, охлаждения батарей аккумуляторов электротранспорта,

оборудовании для утилизации сбросного тепла производственных процессов.

Электрическая схема питания электромобиля – аккумуляторная батарея и электродвигатель представлены в качестве основных компонентов привода, управляемых с помощью электроники, таких как бортовое зарядное устройство, система преобразования энергии (рис. 1) [7]. Тепловая нагрузка от различных компонентов, связанных с двигательной установкой показана на рис. 2. Тепловыделение от аккумулятора и двигателя меняются в диапазоне от 100 Вт до 10 кВт. Тепловыделение силовой электроники достигает 3 кВт и более.

При необходимости передачи теплового потока на большое расстояние традиционные капиллярные тепловые трубы, контурные тепловые трубы и пульсирующие тепловые трубы использовать затруднительно в силу ряда причин. В подобной ситуации целесообразно применять кольцевые термосифоны с горизонтальным расположением испарителя и конденсатора, позволяющие решить проблему передачи теплового потока на сравнительно большие расстояния [8].

В данной работе рассматривается возможность существенной интенсификации охлаждения силовой электроники транспортного средства при использовании кольцевых термосифонов новой конструкции. Они устойчиво и эффективно работают при угловых отклонениях от исходного вертикального положения до  $80\text{--}85^\circ$  за счет применения гетерогенных пористых покрытий с переменными по длине устройства теплофизическими и структурно-механическими свойствами, что улучшит условия охлаждения оборудования при движении электромобиля на участках дорог с уклоном (спуски и подъемы). Кольцевые термосифоны способны передавать тепловой поток на большие расстояния в горизонтальном направлении.

Стабильность работы предлагаемых кольцевых термосифонов, имеющих горизонтальное расположение длинного испарителя, обеспечивается путем разделения потоков пара и жидкости, интенсификацией теплообмена в кольцевых мини каналах с гетерогенным пористым покрытием и оснащением устройства специальной компенсационной камерой, заполненной пористым материалом, аккумулирующей жидкую фазу теплоносителя.

Эффективное охлаждение улучшает тепловые условия работы электронного оборудования, что благоприятно отражается на его работоспособности. В электромобилях с инновационной системой охлаждения контроль тяги может гарантировать очень быструю отдачу больших крутящих моментов по сравнению с традиционными двигателями внутреннего сгорания, улучшая ходовые качества и стабильность работы электромобиля [2, 9, 10]. Современная разработка новых изоляционных материалов на основе углеродных волокон (CF–MgO), слюдяно-эпоксидной смолы позволяет добиться лучшей температурной устойчивости и эффективности двигателя. Эти новые материалы перспективны для разработки двигателей с высокими эксплуатационными характеристиками и/или недорогих двигателей с инновационными подходами к их изготовлению [11].

### 1. Охлаждение силовой электроники электромобиля

Двухфазные кольцевые термосифоны – достаточно простые, надежные и в то же время эффективные теплопередающие устройства, способные работать в широком диапазоне изменения параметров и углов наклона к горизонту [7–9]. Особым видом термосифона является пародинамический термосифон (ПДТ), созданный в Институте тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, (рис. 3). Движущийся пар и двухфазное течение рабочей жидкости пространственно разделены (теплообменник «труба в трубе»), что позволяет избежать типичного для конвективных термосифонов негативного взаимодействия между противоположно направленными потоками пара и жидкости. Конденсирующаяся жидкость проталкивается из конденсатора в испаритель паром, в этом заключается принципиальное отличие ПДТ от других термосифонов и тепловых труб [9, 10].

Пародинамические термосифоны обладают высокой тепло-

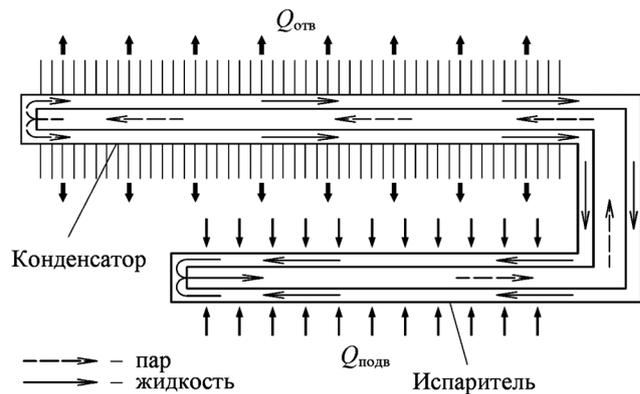


Рис. 3. Пародинамический термосифон.  
 $Q$  – тепловой поток

передающей способностью (десятки кВт), обеспечивают возможность разнообразного конструктивного исполнения, в том числе в виде изогнутых, гибких либо сборных элементов. Используя принцип передачи тепла, реализуемый в ПДТ, можно создавать оборудование для охлаждения и нагрева компонентов электрического и гибридного транспорта, нагрева и охлаждения воздуха, грунта и дорожного покрытия (асфальта, бетонных плит). Теплопередающие способности термосифона существенно зависят от эффективности работы испарителя. При разработке устройства учитывалась необходимость создания условий, чтобы при низких тепловых потоках и, соответственно, минимальных перегревах поверхности в испарителе генерировались пузырьки, которые инициируют активное кипение и способствуют интенсификации теплообмена. На рис. 4 пред-

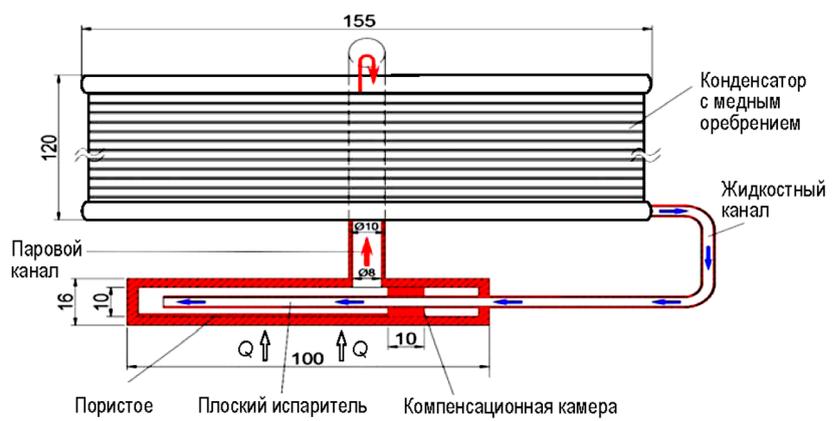
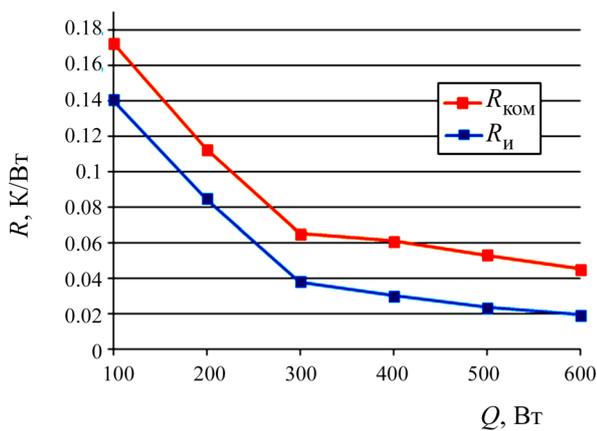


Рис. 4. Кольцевой термосифон с плоским горизонтальным испарителем и пористым фитилем внутри его для охлаждения силовой электроники электротранспорта



**Рис. 5.** Термическое сопротивление термосифона:  $R_{и}$  – термическое сопротивление испарителя;  $R_{ком}$  – полное термическое сопротивление (от поверхности испарителя к потоку охлаждающего воздуха)

ставлена схема радиатора с воздушным охлаждением, выполненного на базе кольцевого термосифона с плоским испарителем. Радиатор предназначен для системы охлаждения силовой электроники зарядного устройства (инвертор/IGBT) электромобиля с тепловой нагрузкой от 0.5 до 1 кВт.

Термическое сопротивление кольцевого термосифона как функция тепловой нагрузки приведено на рис. 5.

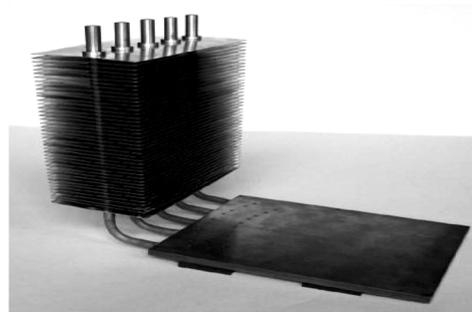
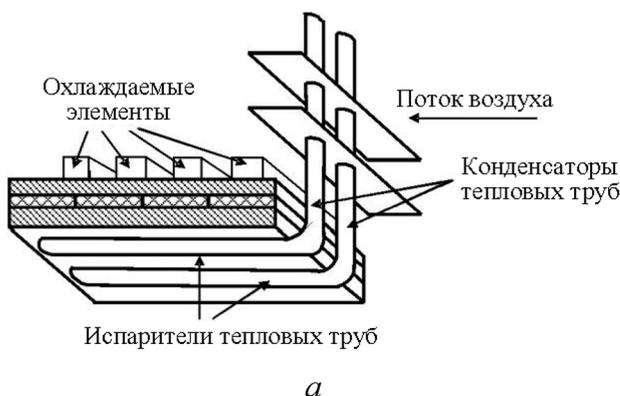
Система охлаждения силовой электроники автотранспорта также может быть основана на использовании специальных тепловых труб L-типа, у которых испаритель расположен горизонтально, а конденсатор вертикальный. Цилиндрический испаритель имеет хороший тепловой контакт с медной пластиной, на которой расположены полупроводниковые компоненты силовой электроники (рис. 6, а). Вертикальные

конденсаторы тепловых труб имеют водяное или воздушное охлаждение (рис. 6, б).

## 2. Система электрического питания электромобиля.

### Аккумуляторная батарея

Литий-ионные батареи широко используются в электромобилях благодаря наличию высокой плотности энергии и длительного срока службы. Поскольку характеристики и срок службы литий-ионных батарей чувствительны к температуре, очень важно постоянно поддерживать нужный температурный диапазон их работы. Температура, идеально подходящая для литий-ионной батареи, должна быть равномерной по всей площади батареи в пределах от 20 до 30°C. Одна из проблем перегрева и охлаждения литий-ионных аккумуляторов – неравномерное распределение тепла, что приводит к деградации отдельных модулей батареи. В данной статье рассматривается эффективное управление температурным режимом аккумуляторной батареи с помощью тепловых труб и термосифонов, а также определение их критических тепловых потоков. В электромобиле существует несколько узлов, прогревающихся до высоких температур. Электродвигатель в среднем во время работы нагревается до 100°C, автомобильная электроника – до 80°C. Одним из способов выравнивания температуры батареи является передача тепла от ее модулей к системе жидкостного охлаждения с помощью тепловых труб и кольцевых термосифонов. Тепловая нагрузка на модуль батареи может варьироваться от 5 до 50 Вт. Общее тепловыделение от батареи равно 50–400 Вт.



**Рис. 6.** Система охлаждения силовой электроники автотранспорта на тепловых трубах L-типа: а – схема, б – фотография

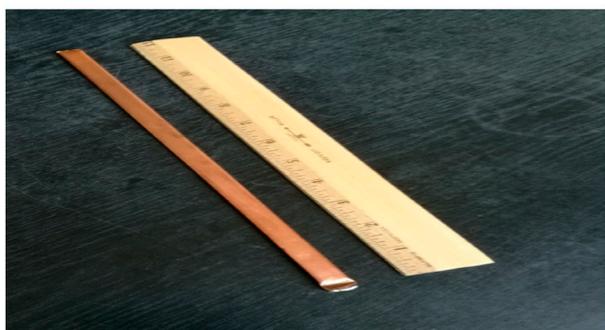


Рис. 7. Плоская тепловая труба для охлаждения модуля литий-ионной батареи

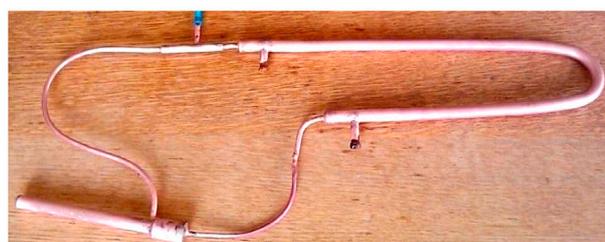


Рис. 8. Кольцевой термосифон с горизонтальным испарителем и жидкостным охлаждением конденсатора

Плоские и тонкие медные тепловые трубы (рис. 7) располагаются вертикально между модулями батареи и передают тепловой поток испарителю кольцевого термосифона (рис. 8).

Кольцевой термосифон с горизонтальным испарителем (рис. 9) контактирует с тепловыми трубами и сбрасывает тепловой поток от батареи в жидкостную систему охлаждения.

Альтернативой металлическим тепловым трубам и термосифонам являются горизонтальные кольцевые термосифоны, выполненные из полимерных нанокомпозитов [14]. На рис. 10 приведена схема кольцевого термосифона с плоским испарителем и конденсатором, выпол-

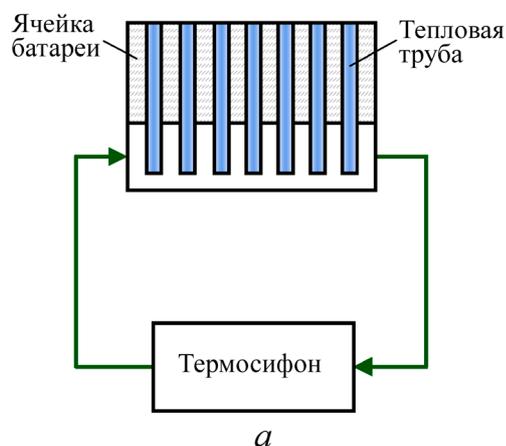


Рис. 9. Схема охлаждения литий-ионной батареи с помощью тепловых труб и кольцевого термосифона (а) и схема кольцевого термосифона (б)

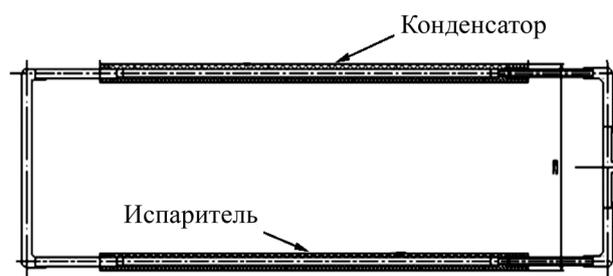


Рис. 10. Кольцевой полимерный термосифон с корпусом из нанокомпозита. Рабочая жидкость – изобутан

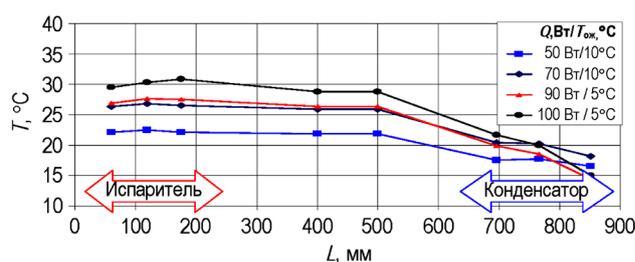
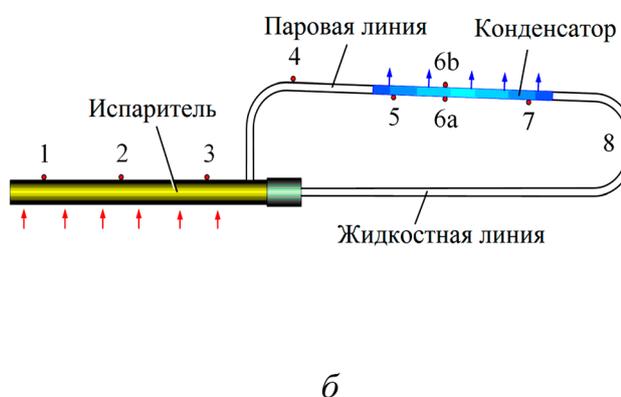


Рис. 11. Температурное поле вдоль контура термосифона как функция тепловой нагрузки

ненного из нанокомпозита (полиамид с введенными в него алмазными микро- и наночастицами, армированный угольными микроволокнами). Испаритель и конденсатор термосифона являются одинаковыми по исполнению. Кольцевые термосифоны с плоскими испарителями и конденсаторами удобны в качестве жидкостных систем охлаждения и предварительного нагрева литий-ионных батарей при запуске двигателя автомобиля в холодное время года.

На рис. 11 изображено температурное поле вдоль контура термосифона при различной интенсивности тепловыделения батареи и температуре охлаждающей жидкости.



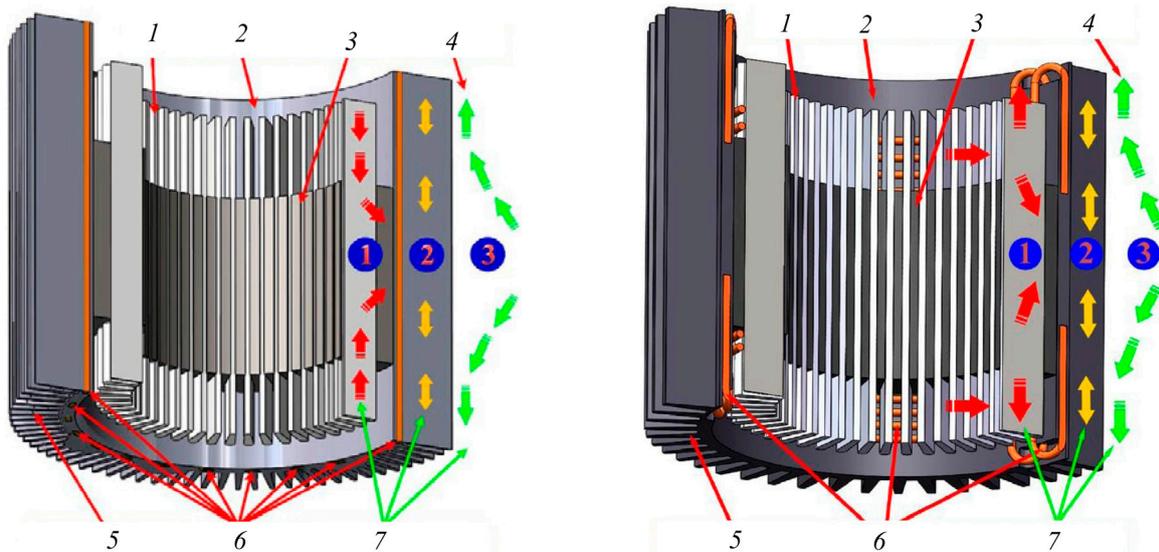


Рис. 12. Охлаждение статора двигателя с помощью тепловых труб: 1 – обмотка; 2 – оболочка статора; 3 – сердечник статора; 4 – охлаждающий воздух; 5 – ребра, рассеивающие тепло; 6 – плоская тепловая труба; 7 – направление теплового потока [11]

### 3. Двухфазные системы охлаждения электродвигателя транспортного средства

При работе электродвигателя транспортного средства интенсивное тепловыделение происходит как в статоре двигателя, так и его роторе. Нагрев двигателя отрицательно сказывается на величине крутящего момента и на общей эффективности работы магнитов.

Применение тепловых труб и термосифонов для охлаждения двигателя целесообразно как в одном, так и другом случае. На рис. 12 показано применение тепловых труб для охлаждения статора двигателя. Плоские тепловые трубы вставлены между слоями электрической обмотки статора двигателя для отвода более 300 Вт теплоты при поддержании температуры источника тепловыделения ниже его предела равного 180°C [11].

Одним из перспективных вариантов охлаждения статора электродвигателя является ис-

пользование пульсационных тепловых панелей (рис. 13) [15].

Пульсационные тепловые трубы могут быть выполнены из алюминиевых сплавов, что уменьшит общий вес устройства и его стоимость по сравнению с медным аналогом.

Охлаждение ротора электродвигателя может осуществляться с помощью центробежных тепловых труб, помещенных внутрь ротора (рис. 14) [16].

Большие тепловые потери в роторе (40–60% от общих тепловых потерь) имеют место в двигателях с повышенным скольжением и частотным регулированием (электромобили, электрические погрузчики). Преимущество системы охлаждения электродвигателя тепловыми трубами перед другими технологиями значительно возрастает, если двигатель не имеет наружного обдува воздухом, что характерно для двигателей с глубоким регулированием частоты вращения.

Для интенсификации теплообмена внутри ротора электродвигателя целесообразно применять оригинальную конструкцию тепловой трубы, выполненной в виде цилиндрической паровой камеры (рис. 15) [17, 18]. Предлагаемая в статье конструкция охладителя ротора хорошо совместима с различными хладагентами (жидкость, газ, двухфазный поток,

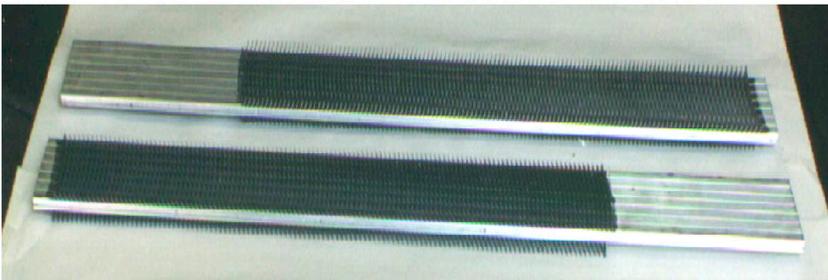


Рис. 13. Пульсационные тепловые трубы (панели), выполненные из алюминиевого профиля. Рабочая жидкость R245a [15]

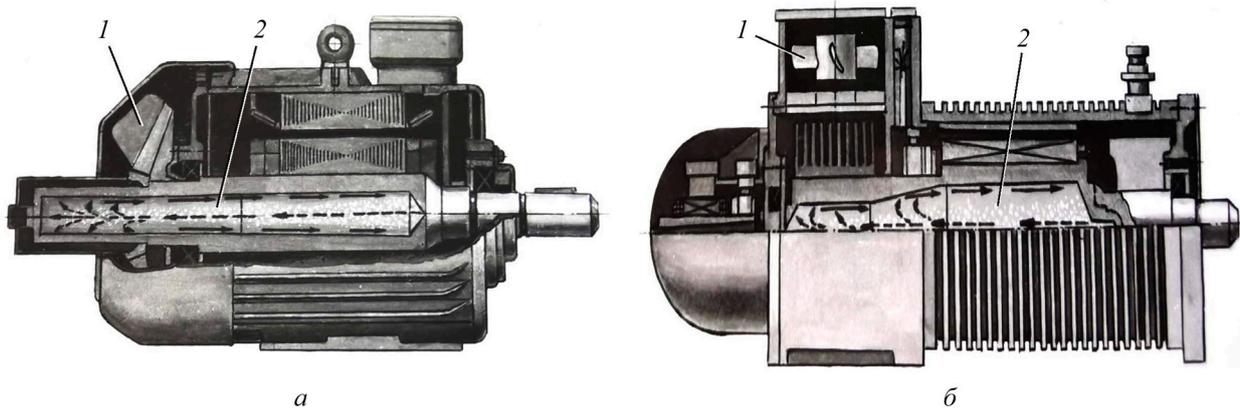


Рис. 14. Электродвигатель со вставленной центробежной тепловой трубой, конденсатор которой охлаждается потоком воздуха самовентиляцией (а) и вентилятором с независимым приводом (б) [16]: 1 – вентилятор, 2 – центробежная тепловая труба

распылительное охлаждение). Охладителем устройства является внешняя оболочка испарителя паровой камеры. Конденсатором служит внутренняя трубка, через которую проходит поток охлаждающей субстанции (жидкость, двухфазный поток, распыление микрокапель масла и др.). В частности, данное устройство является симбиозом центробежной паровой камеры, расположенной на внутренней трубке, охлаждаемой движущимся внутри нее хладагентом (цилиндрическая паровая камера + цилиндрическая тепловая труба).

руировании гибридного автомобиля обусловлены ограниченностью объема, в котором расположен привод автомобиля, и необходимостью обеспечения высокой мощности и крутящего момента двигательной системы. Это приводит к увеличению тепловых потерь внутри двигателя и необходимости уменьшения объема системы охлаждения. Обладая высокой удельной мощ-

#### 4. Гибридные системы охлаждения электро-транспорта

В гибридных приводах автомобилей используются два варианта двигателей – электрический и механический. На рис. 16 приведена схема гибридного автомобиля, обладающего способностью использовать для движения транспортного средства как электрическую энергию, так и моторное топливо двигателя внутреннего сгорания [19].

Трансмиссия автомобиля может присоединяться попеременно как к электрическому двигателю, так и к двигателю внутреннего сгорания. Основные рекомендации при конст-

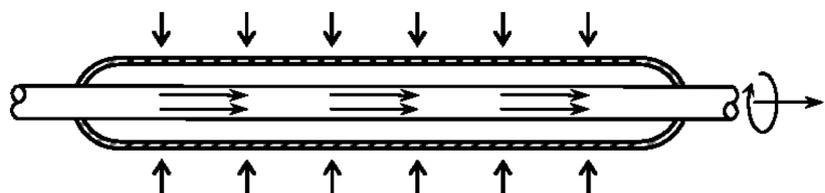


Рис. 15. Центробежная цилиндрическая паровая камера для охлаждения ротора электродвигателя [18]

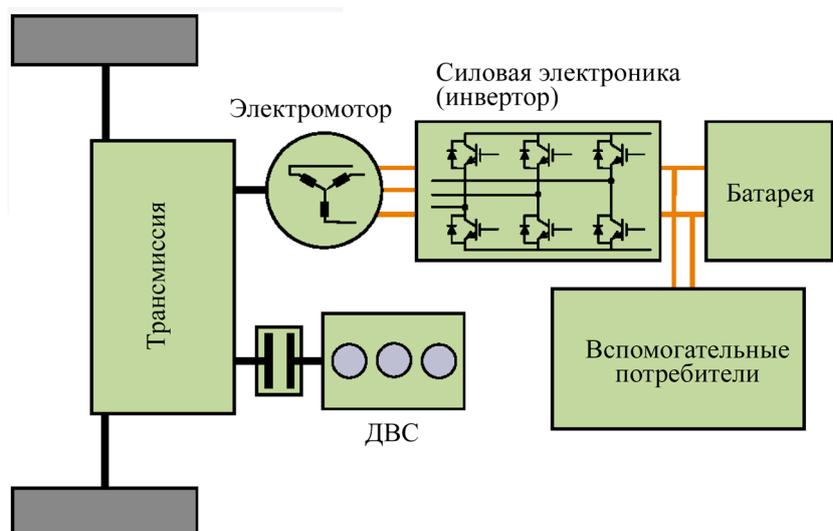


Рис. 16. Схема гибридного автомобиля, обладающего способностью использовать как электрическую энергию, так и моторное топливо для движения транспортного средства [19]

ностью, надежностью работы и компактными размерами, гибридный автомобиль представляет большой интерес для быстро растущей отрасли производства новых видов автомобилей [19–22]. Данный тип транспортного средства наиболее привлекателен с точки зрения охраны окружающей среды и экономичности потребления энергии.

Одним из существенных достоинств системы терморегулирования компонентов гибридного транспортного средства с термосифонами является то, что с их помощью оптимизируется климат-контроль автомобиля при заправке адсорбционного аккумулятора газа (водород, природный газ и др.). Выделяемая теплота адсорбции используется для предварительного подогрева кабины автомобиля и электрической батареи (теплообменники на тепловых трубах и термосифонах). Во время работы гибридного автомобиля на газе происходит десорбция газа (охлаждение) при его расходе в адсорбционном аккумуляторе газа, что позволяет использовать охлажденный воздух для кондиционирования кабины автомобиля. С помощью термосифонов осуществляется подогрев аккумуляторов газа теплотой, выделяемой мотором и трансмиссией двигателя.

Длина пробега гибридного транспортного средства существенно выше, чем у классического электромобиля, поскольку используется суммарный запас как электрической энергии батареи, так и топлива газового аккумулятора. При работе двигателя внутреннего сгорания происходит подзарядка электрической батареи.

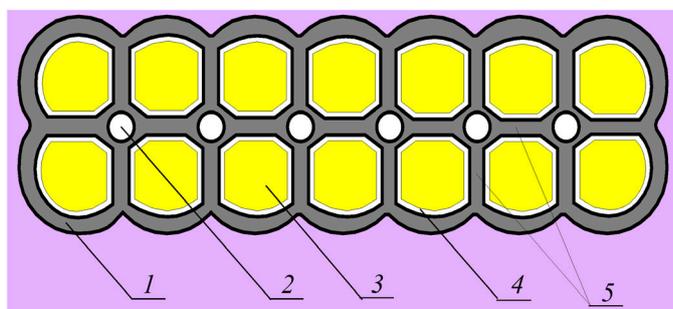
В Институте тепло- и массообмена НАН Беларуси разработано и испытано устройство

(кольцевой термосифон), предназначенное для охлаждения аккумулятора газового моторного топлива (водорода, метана, природного газа). Теплота (газ), выделяемая при адсорбции топлива, с помощью термосифона передается электрической батарее для ее предварительного нагрева. Схема секционного адсорбционного аккумулятора газа (14 компонентов) и компоновка оборудования в автомобиле показаны на рис. 17 [23].

## Заключение

Выполнен обзор различных систем охлаждения, нагрева и кондиционирования гибридного и электротранспорта с помощью тепловых труб и термосифонов. С возрастанием потребности в сложных системах управления и функциях в электромобиле появляется необходимость отвода большого количества тепла и остается все меньше места для размещения системы охлаждения. Система охлаждения с тепловыми трубами является привлекательной альтернативной технологией за счет отсутствия движущихся частей; простой и надежной конструкции и небольшого веса устройства.

Архитектура охлаждения аккумуляторной батареи с помощью двухфазной системы (тепловые трубы и термосифоны) является наиболее предпочтительной, если реализуется комбинированная система охлаждения – тепловая труба (термосифон) и жидкостный радиатор. Применение двухфазной пассивной теплопередачи обеспечивает высокую производительность, надежность во время работы, безопасные условия работы, лучшую однородность темпе-



*а*



*б*

**Рис. 17.** Секционный адсорбционный аккумулятор газа. Разрез 14-компонентного газового баллона (*а*) и расположение плоского газового баллона в багажнике гибридного автомобиля (*б*): 1 – оболочка газового баллона; 2 – испарители кольцевого термосифона; 3 – сорбент для адсорбции газа; 4 – пространство между сорбентом и оболочкой газового баллона для перемещения газа; 5 – металлическое оребрение газового баллона для охлаждения/нагрева сорбента

ратуры, легкое и более дешевое решение по сравнению с однофазным охлаждением с применением механического насоса.

Для достижения высокой производительности при работе двигателя эффективная система охлаждения должна управляться с помощью интеллектуальной системы терморегулирования с использованием обратной связи от нескольких датчиков температуры.

Система охлаждения гибридного транспорта с использованием тепловых труб и термосифонов является предпочтительной по сравнению с традиционной системой охлаждения с помощью однофазной системы охлаждения с использованием механического насоса.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Chan C.C., Cheng M.** Vehicle Traction Motors. In: Encyclopedia of Sustainability Science and Technology, Ed. R.A. Meyers., NY: Springer New York, 2012. P. 11522. [https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0851-3\\_800](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0851-3_800)
2. **Красневский Л.Г.** Автоматические трансмиссии: анализ и перспективы применения на гибридных и батарейных электромобилях. Ч. 1 // Механика машин, механизмов и материалов. 2020. Т. 51. № 2. С. 16–29.
3. **Huang J., Naini S.S., Miller R., Rizzo D., Sebeck K., Shurin S., Wagner J.** A hybrid electric vehicle motor cooling system – design, model, and control // IEEE Trans. Veh. Technol. 2019. <http://dx.doi.org/10.1109/TVT.2019.2902135>
4. **Singh K.V., Bansal H.O., Singh D.** A comprehensive review on hybrid electric vehicles: architectures and components // J. Mod. Transp. 2019. V. 27. N 2. P. 77–107.
5. **Lei G., Zhu J., Guo Y., Liu C., Ma B.** A review of design optimization methods for electrical machines // Energies. 2017. V. 10. 1962. DOI:10.3390/en10121962
6. **Gai Y., Kimiabeigi M., Chong Y.C., Widmer J.D., Deng X., Popescu M., Goss J., Staton D., Steven A.** Cooling of automotive traction motors: Schemes, examples, and computation methods // IEEE Trans. Ind. Electron., 2019. DOI: 10.1109/TIE.20182835397
7. **Singh R., Lapp G., Velardo J., Long P.T., Mochizuki M., Akbarzadeh A., Date A., Mausolf K., Busse K.** Battery cooling options in electric vehicles with heat pipes // Frontiers in Heat and Mass Transf. (FHMT). 2021. V. 16. N 2. DOI: 10.5098/hmt.16.2
8. **Vasiliev L.L., Rabetsky M.I., Grakovich L.P., Zhuravlyov A.S.** Loop thermosyphon as one-turn annular pulsating heat pipe // International Journal of Research in Engineering and Science. 2019. V. 7. Iss. 2. Ser. 1. P. 19–32.
9. **Kuntanapreeda S.** Traction control of electric vehicles using sliding-mode controller with tractive force observer // International Journal of Vehicular Technology. V. 2014. Article ID 829097. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/829097>
10. **Tikadar A., Kumar N., Joshi Y., Kumar S.** Coupled electro-thermal analysis of permanent magnet synchronous motor for electric vehicles // Intersoc. Conf. Therm. Thermomechanical Phenom. Electron. Syst. IThERM. 2020, July. P. 249–256.
11. **Yuan F.W., Yan Z., Sun Y., Tang Y.** Thermal management integrated with three-dimensional heat pipes for air-cooled permanent magnet synchronous motor // Appl. Therm. Eng. 2019. V. 152, Febr. P. 594–604.
12. **Singh R., Mochizuki M., Saito Y., Yamada T., Nguyen T., Nguyen Ti.** Heat pipes applications in cooling automotive electronics // Heat Pipe Science and Technology An International Journal. 2016. V. 7. N 1–2. P. 57–59.
13. **Kim J., Oh J., Lee H.** Review on battery thermal management system for electric vehicles // Appl. Therm. Eng. 2019. V. 149, Febr. P. 192–212.
14. **Vasiliev L., Zhuravlyov A., Grakovich L., Rabetsky M., Vassiliev L.Jr.** Flat polymer loop thermosyphons // Archives of Thermodynamics. 2018. V. 39. N 1. P. 75–90.
15. **Vasiliev L.L.** Heat pipes in modern heat exchangers // Appl. Therm. Eng. 2005. V. 25. N 1. P. 1–19. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2003.12.004
16. **Васильев Л.Л., Конев С.В., Хроленок В.В.** Интенсификация теплообмена в тепловых трубах. Минск: Наука и техника, 1983. 151 с.
17. **Авт. св. 653499 (СССР).** Теплопередающее устройство / Васильев Л.Л., Богданов В.М. Бюллетень изобретений. 1979. № 11.
18. **Васильев Л.Л.** Теплообменники на тепловых трубах. Минск: Наука и техника, 1981. 143 с.
19. **Nollau A., Gerling D.** A new cooling approach for traction motors in hybrid drives. // Proc. 2013 IEEE Int. Electr. Mach. Drives Conf. IEMDC. 2013. P. 456–461.
20. **Nollau A., Gerling D.** A flux barrier cooling for traction motors in hybrid drives // IEEE Int. Electr. Mach. Drives Conf. (IEMDC). 2015. P. 1103–1108. DOI: 10.1109/IEMDC.2015.7409199
21. **Sun Y., Zhang S., Chen G., Tang Y., Liang F.** Experimental and numerical investigation on a novel heat pipe based cooling strategy for permanent magnet synchronous motors // Appl. Therm. Eng. 2020. V. 170, Jan. 114970.
22. **Fang G., Yuan W., Yan Z., Sun Y., Tang Y.** Thermal management integrated with three-dimensional heat pipes for air-cooled permanent magnet synchronous motor // Appl. Therm. Eng. 2019. V. 152, Febr. P. 594–604. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.02.120
23. **Kanonchik L.E., Vasiliev L.L.** Charge dynamics of the low-pressure adsorbed natural gas Accumulator, using solid adsorbents, vapordynamic thermosyphon and recirculation loop // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019. V. 143. 118374.

## Thermal control systems for thermally loaded equipment of electrical transport

**L.L. Vasiliev<sup>1</sup>, A.S. Zhuravlyov<sup>1</sup>, S.N. Poddubko<sup>2</sup>, A.V. Belevich<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the NAS of Belarus,  
Minsk, 220072, Republic of Belarus*

<sup>2</sup> *United Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus,  
Minsk, 220072, Republic of Belarus*

*e-mail: LVASIL@hmti.ac.by; bats@ncpmm.bas-net.by*

There are many electric transport means having a great number of components requiring intensive cooling. The article presents an overview of cooling methods, such as air-type, liquid-type, and employing phase-variable materials, and marks pros and cons of each of them. The problem of the excessive heat removal from heat generating electronic equipment may be solved successfully with two-phase heat transferring devices such as heat pipes and thermo-siphons. These devices are autonomous, noiseless, and their operation does not require energy consuming, which is utterly important for the wireless electric transport. Both heat pipes and thermo-siphons are able to absorb heat from the object being cooled, remove it outward the volume and then transfer it to the coolant or air. The article analyzes the options of heat pipes and thermo-siphons application for cooling and thermal control of the electric and hybrid transport components. It notes the two-phase passive heat transfer attractiveness for application in electric cars. Structures and specifics of the developed two-phase heat removing devices (vapor-dynamic thermo-siphon, ring thermo-siphons with cylindrical and flat evaporators, centrifugal heat pipe, etc.) are presented, and options of their application in thermal control systems for transportation means with electrical motor drive are proposed. The article regards the possibility of substantial intensification of transportation power electronics cooling by ring thermo-siphons of a new structure. It is possible to align the battery temperature, transferring the heat from its modules to the coolant system employing the heat pipes and thermo-siphons, and heat removal from rotor and stator of the electric motor is possible as well. An electric motor rotor can be cooled by the rotating centrifugal heat pipes, whereas the heat can be removed from the stator by the flat heat pipes, inserted between the electric winding layers. The cooling system with heat pipes is attractive due to its simplicity and reliable design, absence of moving parts, and the relatively low weight of the device.

**Keywords:** electric transport, thermal control, cooling system, heat pipe, thermo-siphon.

### REFERENCES

1. **Chan C.C., Cheng M.** *Vehicle Traction Motors*. In: Encyclopedia of Sustainability Science and Technology, Ed. R.A. Meyers. NY: Springer New York, 2012. P. 11522. [https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0851-3\\_800](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0851-3_800).
2. **Krasnevsky L.G.** Avtomaticheskie transmissii: analiz i perspektivy primeneniya na gibridnykh i batareynykh elektromobilyakh, Ch.1 [Automatic transmissions: analysis and prospects for use in hybrid and battery electric vehicles, Part 1] // *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov – Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*, 2020, vol. 51, no. 2, pp. 16–29. In Russ.
3. **Huang J., Naini S.S., Miller R., Rizzo D., Sebeck K., Shurin S., Wagner J.** A Hybrid Electric Vehicle Motor Cooling System – Design, Model, and Control // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, vol. 68, no. 5, pp. 4467–4478. DOI: 10.1109/TVT.2019.2902135
4. **Singh K.V., Bansal H.O., Singh D.** A Comprehensive Review on Hybrid Electric Vehicles: Architectures and Components // *Journal of Modern Transportation*, 2019, vol. 27, no. 4, pp. 77–107. DOI: 10.1007/s40534-019-0184-3
5. **Lei G., Zhu J., Guo Y., Liu C., Ma B.** A Review of Design Optimization Methods for Electrical Machines // *Energies*, 2017, vol. 10, 1962. DOI: 10.3390/en10121962
6. **Gai Y., Kimiabeigi M., Chong Y.C., Widmer J.D., Deng X., Popescu M., Goss J., Staton D., Steven A.** Cooling of Automotive Traction Motors: Schemes, Examples, and Computation Methods // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, vol. 66, no. 3, pp. 1681–1692. DOI: 10.1109/TIE.20182835397
7. **Singh R., Lapp G., Velardo J., Long P.T., Mochizuki M., Akbarzadeh A., Date A., Mausolf K., Busse K.** Battery Cooling Options in Electric Vehicles with Heat Pipes // *Frontiers in Heat and Mass Transfer*, 2021, vol. 16, no. 2. DOI: 10.5098/hmt.16.2
8. **Vasiliev L.L., Rabetsky M.I., Grakovich L.P., Zhuravlyov A.S.** Loop thermosiphon as one-turn annular pulsating heat pipe // *International Journal of Research in Engineering and Science*, 2019, vol. 7, iss. 2, ser. 1, pp. 19–32.

9. **Kuntanapreeda S.** Traction Control of Electric Vehicles Using Sliding-mode Controller with Tractive Force Observer // *International Journal of Vehicular Technology*, 2014, article ID 829097. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/829097>
10. **Tikadar A., Kumar N., Joshi Y., Kumar S.** Coupled electro-thermal analysis of permanent magnet synchronous motor for electric vehicles // *19th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm)*, 2020, July, pp. 249–256. DOI: 10.1109/ITherm45881.2020.9190562
11. **Yuan F.W., Yan Z., Sun Y., Tang Y.** Thermal management integrated with three-dimensional heat pipes for air-cooled permanent magnet synchronous motor // *Applied Thermal Engineering*, 2019, vol. 152, Febr., pp. 594–604. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.02.120
12. **Singh R., Mochizuki M., Saito Y., Yamada T., Nguyen T., Nguyen Ti.** Heat pipes applications in cooling automotive electronics // *Heat Pipe Science and Technology An International Journal*, 2016, vol. 7, no. 1–2, pp. 57–59. DOI: 10.1615/HeatPipeScieTech.2016017225
13. **Kim J., Oh J., Lee H.** Review on Battery Thermal Management System for Electric Vehicles // *Applied Thermal Engineering*, 2019, vol. 149, Febr., pp. 192–212. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.12.020
14. **Vasiliev L., Zhuravlyov A., Grakovich L., Rabetsky M., Vassiliev L.Jr.** Flat polymer loop thermosyphons // *Archives of Thermodynamics*, 2018, vol. 39, no. 1, pp. 75–90. DOI: 10.1515/aoter-2018-0004
15. **Vasiliev L.L.** Heat Pipe in Modern Heat Exchangers // *Applied Thermal Engineering*, 2005, vol. 25, no. 1, pp. 1–19. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2003.12.004
16. **Vasiliev L.L., Konev S.V., Khrolenok V.V.** Intensifikatsiya teploobmena v teplovykh trubakh [Intensification of heat exchange in heat pipes]. Minsk: Nauka i tekhnika, 1983. 151 p. In Russ.
17. **Vasiliev L.L., Bogdanov V.M.** Reploperedashchee ustroystvo [Heat transfer device] // *Byulleten Izobreteniy*. 1979. № 11. Pat. 653499. In Russ.
18. **Vasiliev L.L.** *Teploobmenniki na teplovykh trubakh* [Heat Pipe Heat Exchangers]. Minsk: Science and technology, 1981. 143 p. In Russ.
19. **Nollau A., Gerling D.** A new cooling approach for traction motors in hybrid drives // *2013 International Electric Machines & Drives Conference*, pp. 456–461. DOI: 10.1109/IEMDC.2013.6556136
20. **Nollau A., Gerling D.** A flux barrier cooling for traction motors in hybrid drives // *2015 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, pp. 1103–1108. DOI: 10.1109/IEMDC.2015.7409199
21. **Sun Y., Zhang S., Chen G., Tang Y., Liang F.** Experimental and numerical investigation on a novel heat pipe based cooling strategy for permanent magnet synchronous motors // *Applied Thermal Engineering*, 2020, vol. 170, Jan., 114970. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.114970
22. **Fang G., Yuan W., Yan Z., Sun Y., Tang Y.** Thermal management integrated with three-dimensional heat pipes for air-cooled permanent magnet synchronous motor // *Applied Thermal Engineering*, 2019, vol. 152, Febr., pp. 594–604. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.02.120
23. **Kanonchik L.E., Vasiliev L.L.** Charge dynamics of the low-pressure adsorbed natural gas Accumulator, using solid adsorbents, vapordynamic thermosyphon and recirculation loop // *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, vol. 143, 118374.