

Тепловые процессы в технике. 2026. Т. 18. № 5. С. 233–246
Thermal processes in engineering, 2026, vol. 18, no. 5, pp. 233–246

Научная статья
УДК 536.24; 629.33.03-83
URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=188860>
EDN: <https://www.elibrary.ru/IRBXEG>

Системы терморегулирования источников питания для летательных аппаратов на электрической тяге

Л.Л. Васильев¹, А.С. Журавлев², Л.Л. Васильев мл.³✉

^{1,2}*Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

³*ООО ЛЕД Интех, Минск, Республика Беларусь*

³*leonid.l.vasiliev.jr@gmail.com*✉

Аннотация. БПЛА и eVTOL все шире внедряются в гражданских и коммерческих приложениях, где электрические накопители энергии выступают ключевым элементом силового привода. Применение аккумуляторов в спутниках, БПЛА и eVTOL предъявляет разные требования к удельной накопленной энергии, мощности, скорости зарядки/разрядки и термической стабильности. При этом тепловой режим батарей остается критическим ограничением: интенсивное тепловыделение и перегрев негативно сказываются на безопасности, эффективности и ускоряют деградацию элементов. Это обуславливает необходимость разработки компактных и эффективных систем терморегулирования (BTMS), работающих в условиях жестких массогабаритных ограничений. Особый интерес представляют BTMS с двухфазным теплообменом, обеспечивающие высокую плотность отвода тепла при минимальных габаритах и массе. В статье анализируются механизмы тепловыделения и теплопереноса в литий-ионных батареях и факторы, влияющие на эффективность BTMS.

Ключевые слова: летательный аппарат на электрической тяге, система терморегулирования, система управления температурой аккумулятора (СУТА), тепловая труба, термосифон

Для цитирования. Васильев Л.Л., Журавлев А.С., Васильев Л.Л. мл. Системы терморегулирования источников питания для летательных аппаратов на электрической тяге // Тепловые процессы в технике. 2026. Т. 18. № 5. С. 233–246. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=188860>

Original article

Thermal control systems for power sources for electric aircraft

L.L. Vasiliev¹, A.S. Zhuravlyov², L.L. Vassiliev³✉

^{1,2}*A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

³*LED Intech LLC, Minsk, Republic of Belarus*

³*leonid.l.vasiliev.jr@gmail.com*✉

Abstract. Unmanned aerial vehicles (UAVs) and electric vertical takeoff and landing (eVTOL) aircraft are becoming highly popular in civil and commercial industries. In these aircraft, electrical energy storage

systems (batteries) are key components for propulsion. Using batteries in satellites, UAVs, and eVTOLs creates different requirements for stored energy, power capability, charge/discharge speeds, and thermal stability. Battery temperature remains a major problem. High heat generation and overheating reduce safety, lower efficiency, and destroy battery cells faster. Therefore, engineers need compact and high-performance Battery Thermal Management Systems (BTMS) that fit into small spaces and add very little weight.

Air cooling is the most common method for UAVs because it is simple and lightweight. However, from a physical standpoint, air cooling is the least effective method. It cannot handle the high heat from modern, high-power battery cells. Adding a radiator helps remove heat, but it increases weight and volume, which reduces the aircraft's performance. Liquid cooling removes heat much better. However, it requires extra parts, including pipes, a pump, a fluid tank, and a radiator. Additionally, the pump consumes electricity from the battery.

Two-phase heat transfer methods are a promising solution for better BTMS efficiency. These systems use a working fluid that absorbs and releases latent heat. Specifically, heat-pipe systems combine high cooling performance with passive operation, small size, and low weight. Among these, flat-panel pulsating heat pipes (PHPs) are excellent candidates for future UAV and eVTOL projects because they have a simple design, small volume, low weight, and low cost. This review article explains how lithium-ion cells generate heat and how internal heat-transfer processes work. It analyzes recent engineering advances and remaining challenges in thermal management, with a special focus on new two-phase solutions. Finally, it shows future research directions to improve system safety and efficiency. This paper is a helpful resource for researchers, engineers, and industry professionals who want to optimize battery cooling systems.

Keywords: UAV, eVTOL, thermal control, battery thermal management system (BTMS), heat pipes, thermosyphon

For citation. Vasiliev L.L., Zhuravlyov A.S., Vassiliev L.L. Thermal control systems for power sources for electric aircraft. *Thermal processes in engineering*. 2026, vol. 18, no. 5, pp. 233–246. (In Russ.). URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=188860>

Введение

Современная авиация переживает наиболее масштабную трансформацию с момента появления реактивного двигателя. Внедрение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и развитие концепции электрических воздушных судов с вертикальным взлетом и посадкой (eVTOL) знаменуют собой переход на принципиально новый технологический уровень. Эти инновации не просто дополняют существующий парк воздушных судов, но и коренным образом меняют архитектуру использования воздушного пространства.

Роль БПЛА в современной авиации эволюционировала от узкоспециализированного военного применения до формирования целой экосистемы гражданских сервисов: от высокоточного дистанционного зондирования Земли до автономной доставки грузов. В то же время появление eVTOL открывает качественно новый сегмент – городскую воздушную мобильную технику (UAM), которая призвана интегрировать авиационные

технологии в повседневную транспортную сеть мегаполисов. Эти аппараты решают две критические задачи современной авиации: радикальное снижение уровня шума и достижение углеродной нейтральности за счет использования электрических силовых установок.

Переход современной авиации к электрическим силовым установкам стал возможен благодаря прогрессу в области электрохимических систем накопления энергии. В архитектуре беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и судов с вертикальным взлетом и посадкой (eVTOL) электрическая батарея/аккумулятор перестала быть просто компонентом питания энергией, превратившись в ключевой лимитирующий фактор и одновременно главный драйвер технологического развития.

В отличие от наземного электротранспорта, где масса аккумулятора может быть частично компенсирована эффективностью рекуперации, в авиационных системах каждый килограмм веса

батареи создает дополнительную нагрузку, требующую увеличения тяги и, как следствие, повышенного энергопотребления. Таким образом, одним из наиболее важных параметров является максимальная удельная энергия электрического аккумулятора, измеряемая в Вт·ч/кг. Второй важной характеристикой является удельная мощность (C-rate), определяющая способность выдавать пиковые токи в наиболее энергозатратных режимах – взлет воздушного аппарата и его зависание над заданной точкой. Также крайне важным является и общий ресурс работы батареи, характеризующийся сохранением эксплуатационных характеристик на протяжении 1000 и более рабочих циклов устройства. Литий-ионные аккумуляторы (рис. 1) доминируют с учетом плотности энергии и мощности по сравнению с традиционными химическими составами аккумуляторов. Это делает их предпочтительными для беспилотных летательных аппаратов, для которых ограничения по размеру и весу играют исключительно важную роль совместно с необходимостью внезапных и интенсивных скачков мощности [1]. Более того, плотность выделяемой энергии и удельная мощность аккумулятора энергии имеют обратно пропорциональную зависимость.

Литий-полимерные (Li-Po) батареи характеризуются высокой удельной мощностью (рис. 1) и являются основным выбором для маневренных БПЛА и спортивных дронов, несмотря на их меньший ресурс. Литий-ионные батареи за счет высокой плотности энергии и долговечности становятся стандартом для БПЛА дальнего радиуса действия и проектов пассажирских судов с вертикальным взлетом и посадкой.

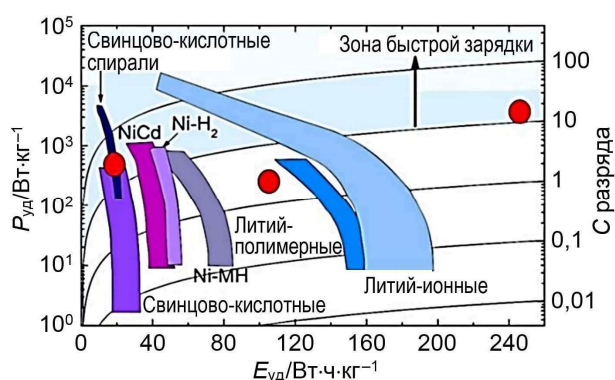


Рис. 1. Сравнительные характеристики аккумуляторов электрической энергии [2]

В свою очередь, на производительность и жизненный цикл источников питания критическое

влияние оказывают однородность распределения тепловых полей в топливной ячейке и/или в аккумуляторе в целом, а также диапазон рабочих температур.

Влияние температуры на литий-ионные аккумуляторы

Несмотря на многие преимущества литий-ионных/полимерных батарей (ЛИБ), фундаментальной характеристикой этих батарей является их температурный режим, так как от него напрямую зависит вязкость электролита и скорость химических реакций. Основные отклонения от заданных характеристик связаны с тепловыделением во время использования и уменьшением их производительности при низких температурах [3, 4]. Допустимый диапазон температур для ЛИБ обычно составляет минус 20 °С – +60 °С. В частности, диапазон температур для операций зарядки составляет от 0 °С до 45 °С, в то время как диапазон операций разрядки шире и составляет от минус 20 °С до +60 °С. Идеальная рабочая температура для литий-ионных аккумуляторов обычно находится в диапазоне от 15 °С до 35 °С для оптимальной производительности и долговечности. Эксплуатация вне этого температурного интервала, а также неоднородность температурных полей между топливными ячейками может отрицательно сказаться на безопасности и сроке эксплуатации электрической батареи [5].

Механизм тепловыделения в аккумуляторах

Выделение тепла в ЛИБ зависит от множества факторов: с-rate, температура и состояние заряда. Среди них с-rate выделяется как доминирующий фактор [6]. Генерацию тепла в электрической батарее можно разделить на обратимую и необратимую [5, 7]. Обратимое тепло, также известное как энтропийное тепло, возникает из обратимой энтропии изменения, происходящие в рамках электрохимических реакций. Необратимое тепло, в основном, состоит из джоулева нагрева вследствие наличия внутреннего сопротивления [7, 8], а также из нагрева, вызванного смешиванием и изменением энтальпии [6, 8]. Нагрев из-за перемешивания относится к теплу, выделяемому вследствие неоднородного распределения ионов во время работы аккумулятора [8]. Изменение энтальпии – это выделение тепла в результате

фазовых изменений в катодных материалах из-за диффузии ионов лития [6]. Важно отметить, что на джоулев нагрев приходится около 50 % выделяемого необратимого тепла, в то время как на реакционный нагрев электродов приходится от 30 до 40 % выделяемого тепла [9]. В то же время выработка тепла в результате изменения энтропии составляет около 5–10 % от общего количества тепла, вырабатываемого топливными ячейками. Неравномерное распределение температуры возникает внутри и через слои ячеек из-за неравномерности тепловыделяющих зон и анизотропной теплопроводности. Суммарное тепловыделение ЛИБ является результатом экзотермических реакций, тепла, вырабатываемого за счет перенапряжения электродов, и тепла, выделяемого за счет их внутреннего электрического сопротивления во время зарядки и разрядки. Параметры, при которых работает аккумулятор, такие как уровень его заряда, температура и сила рабочего тока, являются основными факторами, определяющими скорость выделения тепла. Бернарди и др. [10] получили модифицированный вариант общего уравнения энергетического баланса для топливной ячейки ЛИБ (LiAl/FeS). Этого удалось достичь, включив в уравнение (1) среднюю теплоемкость и исключив части, связанные с фазовым переходом и энтальпией смешивания.

$$q = I \times V + \sum_l I_l \left(T^2 d \frac{U_{l,avg}}{dT} \right) + m C_p^m \frac{dT}{dt}, \quad (1)$$

где, I и V – ток и потенциал ячейки, q – скорость теплопередачи, l – реакция, T – абсолютная температура ячейки, C_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении, $u_{l,avg}$ – теоретическое напряжение холостого хода и m – масса ячейки.

Количество тепла, выделяемого на внутреннем сопротивлении, увеличивается с увеличением скорости зарядки и разрядки. Большая часть энергии, вырабатываемой элементом, отводится во время разряда при умеренных скоростях разряда (2 °C в минуту, или менее) во внешние цепи. С увеличением скорости разряда максимальное напряжение падает из-за внутреннего сопротивления элемента. Рекомендуется, чтобы ток разряда составлял не более 50 % от тока короткого замыкания для получения максимальной мощности. Кроме того, необратимые и обратимые

скорости тепловыделения, которые зависят от внутреннего сопротивления, уровня заряда и рабочих температур элемента, являются двумя основными источниками тепла литий-ионного аккумулятора большого размера [11]. Фенг и др. [12] использовали термодинамическую модель литий-ионной батареи, представленную Ньюманом и Балсаром [13], для прогнозирования изменений температуры во время зарядки и разрядки с помощью трех компонентов: поляризационного тепла, конвективного тепла и энтропийного тепла, как показано в уравнении (2) [13].

$$m c_p \frac{\partial T}{\partial t} = I(V_{OC} - V) + IT \frac{\partial V_{OC}}{\partial T} + hA(T - T_{amb}). \quad (2)$$

Здесь m – масса клетки, представляет собой удельную теплоемкость, I – ток элемента, T – температура элемента, V_{OC} – напряжение разомкнутой цепи, h – коэффициент теплопередачи, A – площадь поверхности батареи, а T_{amb} – температура окружающей среды (K).

Влияние температуры на эффективность работы аккумулятора

Производительность топливных ячеек, включая емкость и мощность, снижается при низких температурах обычно ниже 0 °C по нескольким причинам. В основном это связано со снижением ионной проводимости в электролите, вызывающим снижение скорости накопления и высвобождения энергии. В конечном счете это приводит к уменьшению заряда батареи, ее емкости и мощности, а также более длительному времени зарядки [14].

Воздействие высоких температур может негативно сказываться на производительности, сроке и безопасности эксплуатации устройства [15]. Первоначально высокие температуры могут увеличить емкость аккумулятора [5], но со временем они вызывают старение, уменьшение емкости и выходной мощности аккумулятора, что в итоге приводит к сокращению срока эксплуатации аккумулятора. Высокая температура приводит к увеличению деградации емкости аккумулятора из-за истощения лития и уменьшения содержания активного материала. Повышенное внутреннее сопротивление приводит к потере мощности [5, 15]. В худшем случае высокие температуры могут привести к утечке тепла через

изоляцию, что является серьезной проблемой безопасности и может привести к полному разрушению аккумулятора. Это происходит, когда аккумулятор выделяет тепло быстрее, чем рассеивает его, вызывая быстрое и неконтролируемое повышение температуры и давления [15]. Интенсивный тепловой разогрев включает в себя серию самоподдерживающихся и самоускоряющихся экзотермических цепных реакций внутри аккумулятора, что приводит к внезапному скачку температуры. Это повышение температуры разрушает внутренние структуры элемента, что потенциально может привести к его выходу из строя полностью [4].

Перегрев аккумуляторов часто происходит в процессе интенсивного выделения энергии и может вызвать образование дыма, возгорание и/или взрыв. Тепловое излучение может привести к катастрофическим последствиям на уровне всей системы, поскольку оно распространяется от элемента, инициировавшего процесс, к соседним элементам. Во время перегрева батарея подвергается воздействию очень высокой температуры, что приводит к явлению, известному как термический разряд. Термический разряд батареи может происходить в несколько этапов. Стадия 1 теплового разогрева, известная как «самонагревание», наступает, когда тепло, выделяемое внутри ЛИБ, превышает номинальную рабочую температуру из-за электрического, механического или термического воздействия. На этом этапе происходит образование литиевых дендритов и начинается разрушение межфазного слоя твердого электролита (SEI). Рабочие характеристики ЛИБ постепенно снижаются, что происходит при температуре около 90 °C. Кроме того, если самонагревание продолжает оставаться значительным, как правило, со скоростью 0,2 °C в минуту, это вызывает распад защитного покрытия электрода и приводит к возникновению экзотермических взаимодействий между анодом и электролитом, а также к окислению анода [16]. Стадия 2 – отсутствие эффективного отвода тепла вызывает повышение температуры и может привести к значительному экзотермическому эффекту. Стадия 3 – в конечном счете при повышении температуры свыше 120 °C более интенсивные взаимодействия между анодом и катодом приводят к разрушению катода, образованию кислорода и окислению электролита. Далее происходит раз-

рушение материалов, образование внутренней дуги и возникновение пламени, известного как термический выброс [4].

Эффективная система управления температурой аккумулятора (СУТА) должна решать проблему эффективного отвода тепла, тем самым предотвращая в первую очередь как перегрев отдельных элементов, так и всего устройства в сборе.

Существующие системы терморегулирования аккумуляторных батарей

Система СУТА необходима для увеличения срока службы литий-ионных аккумуляторов. Это достигается за счет оптимизации рабочей температуры аккумуляторов и сведения к минимуму возможности перегрева. Современная СУТА должна обладать многими ключевыми характеристиками. К ним относится возможность регулировать температуру аккумуляторной батареи в пределах 15 °C до 35 °C, будучи легкими, компактными, энергоэффективными и экономичными. СУТА использует несколько способов охлаждения батареи, в том числе воздушные, жидкостные, а также двухфазные и гибридные системы охлаждения. В этом разделе рассматриваются основные методы СУТА, используемые для терморегулирования аккумуляторов.

Воздушное охлаждение

Воздушное охлаждение является наиболее распространенным способом отвода тепла от батарей и широко используется из-за таких преимуществ как низкая цена, простота конструкции, малый вес, низкая удельная теплоемкость и длительный срок эксплуатации. В контексте беспилотных летательных аппаратов пассивное воздушное охлаждение использует движение дрона в окружающем воздухе для рассеивания тепла, выделяемого электрической батареей. На практике получили большое распространение два основных способа отвода тепловой энергии: теплообмен при вынужденной конвекции с поверхности корпуса аккумулятора и непосредственно от топливных ячеек. В первом случае конструкция теплоотвода наиболее простая, но она проигрывает в эффективности второму варианту, так как присутствует дополнительное термическое

сопротивление между ячейками и корпусом аккумулятора. Кроме того, она не позволяет выровнять распределение тепловых полей непосредственно в топливных ячейках, расположенных внутри корпуса.

Эффективность отвода тепла от аккумулятора прямо пропорциональна поверхности источника тепловыделения, свойств потока охлаждающего воздуха и разнице температур между горячей стенкой и охлаждающим потоком воздуха.

При фиксированной температуре источника тепловыделения и поверхности теплообмена дальнейшая интенсификация системы охлаждения может быть получена за счет оптимизации размера и формы воздушных каналов внутри корпуса аккумулятора, а также направления омывания воздухом тепловыделяющих элементов. В особых случаях для увеличения расхода охлаждающего потока воздуха в системе охлаждения может иметься дополнительный вентилятор (рис. 2).

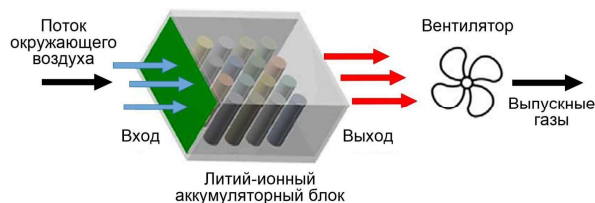


Рис. 2. Схема воздушной СУТА с дополнительным вентилятором [17]

Эффективность воздушного охлаждения может быть значительно увеличена за счет использования радиаторов (рис. 3), оснащенных множеством ребер для увеличения площади теплообмена и изготовленных из металлов с высокой теплопроводностью, таких как алюминий или медь.

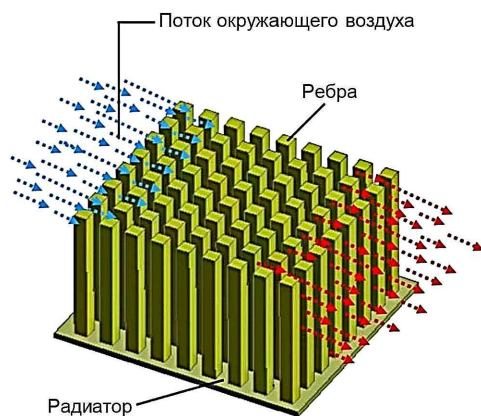


Рис. 3. Внешний радиатор [18]

Основная функция радиатора заключается в эффективной передаче тепла от аккумулятора к потоку окружающего воздуха. Процесс охлаждения основан на теплопроводности и конвекции, при которых добавление радиатора в непосредственном контакте с аккумулятором обеспечивает передачу тепла от аккумулятора к радиатору по закону Фурье при наличии температурного градиента и от радиатора к окружающему воздуху посредством конвекции [19]. Радиатор может иметь тепловой контакт как с корпусом аккумулятора, так и быть интегрирован внутрь корпуса, имея тепловой контакт непосредственно с топливной ячейкой (рис. 4). Тепловое соединение между батареей и радиатором может быть улучшено благодаря правильной технологии крепления и использованию теплопроводной пасты для заполнения любых воздушных зазоров, критически важных из-за низкой теплопроводности воздуха.

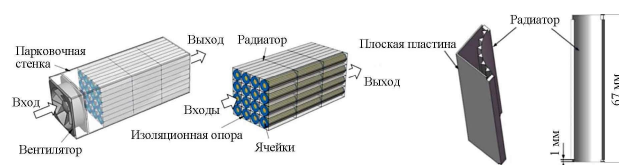


Рис. 4. Схема СУТА с радиатором внутри корпуса аккумулятора [20]

Основным недостатком такой системы охлаждения является относительно малая эффективность, избыточный вес за счет дополнительного металлического радиатора и потребление электрической энергии при наличии вентилятора, что критично для аппаратов малой авиации.

Жидкостное охлаждение

Принцип действия жидкостного охлаждения во многом сходен с воздушным. Под действием перепада давления, вызванного работой жидкостного насоса, поток жидкости прокачивается через трубки, омывая снаружи корпус аккумулятора или попадая внутрь корпуса, имея в этом случае непосредственный контакт с топливными элементами. Приняв тепло от аккумулятора, поток горячей жидкости попадает в радиатор, обдуваемый холодным воздухом. Охладившись, жидкость попадает вновь на вход аккумулятора, замыкая тем самым рабочий цикл [21].

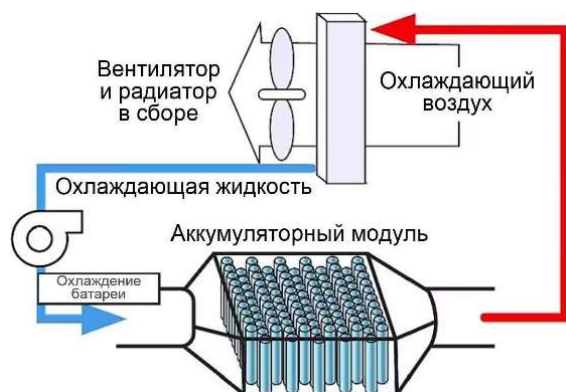


Рис. 5. Схема СУТА с жидкостным охлаждением [21]

Основное преимущество жидкостной СУТА заключается в том, что она способна достигать более высоких коэффициентов теплоотдачи при меньших расходах потока, чем системы с воздушным охлаждением. В качестве хладагента для жидкостных СУТА могут использоваться различные типы охлаждающих жидкостей: вода, масла, этиленгликоль и другие. Так как каждая жидкость имеет разные значения вязкости, теплопроводности и удельной теплоемкости, выбор типа жидкости зависит от количества тепла, которое необходимо поглотить, а также от механической энергии, требуемой для циркуляции жидкости вокруг батарейного блока. Жидкостные СУТА делятся на две категории: косвенное [22] и прямое охлаждение, при этом основное различие заключается в том, что косвенное охлаждение требует физического разделения охлаждающей жидкости и литий-ионной батареи, тогда как в случае прямого охлаждения поток охлаждающей жидкости имеет прямой контакт с энергетическими ячейками. Важно отметить, что при организации прямого охлаждения должна использоваться неэлектропроводная жидкость, чтобы исключить опасность короткого замыкания между жидкой средой и самим Li-ion аккумуляторным блоком.

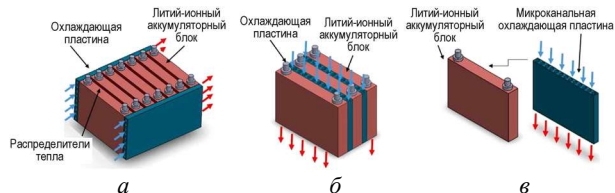


Рис. 6. Схема СУТА с жидкостным охлаждением косвенного типа: а – перпендикулярное направление движение жидкости поперек топливных ячеек; б – движение жидкости вдоль топливных ячеек; в – схема СУТА единичного элемента [22]

В настоящее время много внимания уделяется повышению эффективности жидкостных СУТА. Важно отметить, что при фиксированных массе, количеству выделяемого тепла и перепаду температур между аккумулятором и окружающей средой основной акцент переносится на повышение массового расхода жидкости при одновременном снижении энергопотребления механического насоса, а также выравниванию поля температур в топливных ячейках и по всему аккумулятору в целом. Таким образом, жидкостное охлаждение является более эффективным по сравнению с воздушным, а значит, может быть реализовано в более компактном исполнении без ущерба для эффективности охлаждения, что чрезвычайно важно для аппаратов малой авиации. Тем не менее, у жидкостного охлаждения есть и недостатки. Сложность, стоимость, дополнительная нагрузка на батарею, связанная с потреблением электроэнергии жидкостным насосом, а также опасность утечек жидкости являются дополнительными рисками при широком применении их на практике.

Двухфазное охлаждение

Система охлаждения аккумулятора с использованием тепловых труб принципиально отличается от вышеобсуждаемых СУТА.

Тепловые трубы являются полностью пассивными теплопередающими устройствами, для функционирования которых, в отличие от воздушного (при наличии вентилятора) или жидкостного охлаждения, не требуется использования дополнительной электрической и/или механической энергии. СУТА на основе тепловых труб начинает функционировать при наличии даже небольшой разницы температур между источником тепловыделения, например, топливной ячейкой, и стоком тепла, которым является окружающая среда.

Рассмотрим более детально конструкцию тепловой трубы (ТТ) в общем случае. Тепловая труба состоит из металлического герметично закрытого корпуса, в котором содержится небольшое количество жидкости, называемого теплоносителем, в условиях вакуума. При подводе тепла к корпусу ТТ жидкость начинает испаряться и в виде пара под действием градиента давлений, вызванного разницей температур, начинает течь в более холодную часть. Там при взаимо-

действии с холодной стенкой пар конденсируется и под действием сил гравитации возвращается обратно в более горячую зону, тем самым завершая рабочий цикл. Горячая зона ТТ, называемая испарителем, и более холодная – конденсатор, отделяются друг от друга так называемой транспортной зоной (рис. 7).

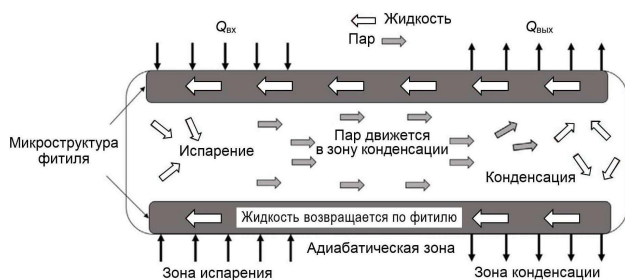


Рис. 7. Принципиальная схема работы тепловой трубы [17]

Если сил гравитации недостаточно для возврата конденсата или работа ТТ должна не зависеть от ориентации в пространстве, как, например, в авиации, в конструкцию ТТ добавляют пористый фитиль, по которому транспорт жидкости из конденсатора в испаритель происходит за счет капиллярных сил. Другими словами, ТТ – это герметично закрытая система, где циркуляция тепла происходит за счет фазовых превращений теплоносителя под действием незначительного градиента температур. Передача тепла за счет фазовых превращений – чрезвычайно эффективный способ передачи тепла, и на практике теплопроводность ТТ может достигать $40000\text{--}60000 \text{ Вт}/(\text{м}\times\text{К})$, что в десятки раз выше, чем, например, теплопроводность меди – $460 \text{ Вт}/(\text{м}\times\text{К})$. Для увеличения передаваемой мощности внешняя поверхность конденсатора может быть оснащена радиатором из тонких пластин из высокотеплопроводного металла.

В настоящий момент наибольшее распространения получили тонкие гибкие топливные ячейки с плоской формой (pouch-элементы), характеризующиеся высокой удельной энергией и возможностью формировать батарею под корпус дрона, что критично для мультикоптеров и легких беспилотных аппаратов. Для более тяжелых БПЛА и различных конструкций eVTOL-аппаратов чаще используются цилиндрические 18650/21700 и призматические топливные ячейки. Они более прочные механически, стандартизированы, удобны для модульной сборки; при-

меняются в тяжелых БПЛА и гибридных системах, где важна надежность и термоуправление.

В зависимости от формы топливных элементов и других конструктивных особенностей аккумулятора в их системе охлаждения могут быть использованы тепловые трубы различных форм и конструкций. На рис. 8 представлена возможная схема компоновки СУТА на основе цилиндрических тепловых труб. При данной компоновке тепло, выделяемое топливными ячейками, передается испарителю тепловой трубы за счет теплопроводности металла. В испарителе ТТ происходит испарение рабочего тела, и пар затем движется в зону конденсации, где конденсируется с выделением тепла. Теплоноситель далее возвращается в испаритель под действием капиллярных сил пористого фитиля ТТ. Тепло же, выделяемое ТТ при конденсации, в дальнейшем отводится потоком жидкости, прокачиваемой через жидкостный теплообменник. Для улучшения механического и теплового контакта между ТТ и топливными элементами могут применяться гибкие пластины из высокотеплопроводного металла. Вместо жидкостного теплообменника может также использоваться поток холодного воздуха, попадающий на оребренную поверхность конденсатора ТТ.

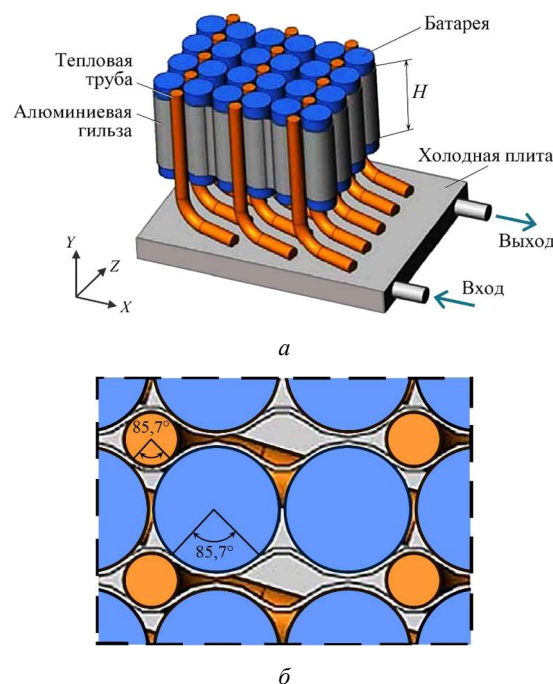


Рис. 8. Пример СУТА с использованием цилиндрических ТТ: а – сборка, б – тепловой интерфейс между ТТ и топливной ячейкой [23]

СУТА на основе цилиндрических ТТ способны поддерживать максимальную температуру ячейки ниже 50°C и равномерность температуры (т. е. разница между минимальной и максимальной температурой) в пределах 5°C соответственно, при выделяемой мощности 50 Вт и скорости разряда 3С [24].

На рис. 9 изображена СУТА пяти топливных элементов призматической формы с использованием плоских тепловых труб L-образной формы. Данная конструкция позволяет поддерживать температуру аккумулятора ниже 50°C при скорости разряда 5С, используя вынужденную конвекцию через оребренный конденсатор ТТ потоком воздуха с температурой 20°C [25].

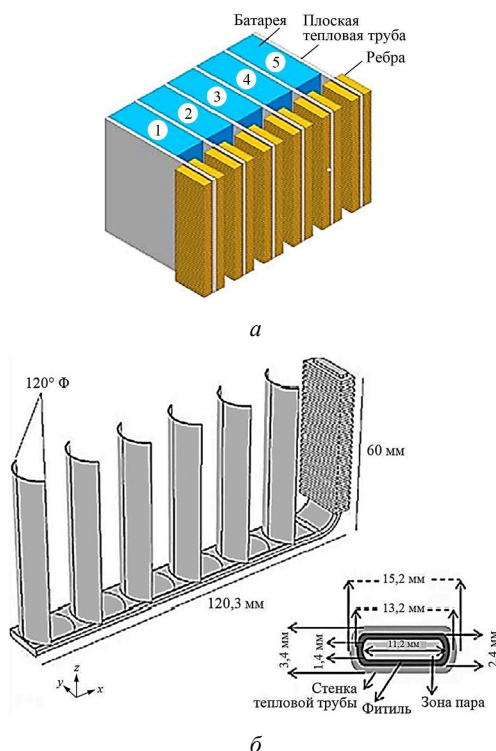


Рис. 9. Пример СУТА с L-образными плоскими ТТ (а) и с интегрированным воздушным радиатором (б) [25]

По сравнению с тепловыми трубками цилиндрической формы плоские тепловые трубки имеют конструктивные преимущества вследствие лучшей интеграции в конструкцию аккумулятора с призматическими или pouch топливными элементами. Плоская поверхность тепловой трубки обеспечивает возможность ее прямого соединения с топливным элементом, а использование теплопроводной пасты может существенным образом улучшить тепловой контакт.

На рис. 10 показан другой подход к проектированию СУТА, в которой тепло от аккумулятора передается с помощью плоских тепловых труб на фюзеляж БПЛА и рассеивается в дальнейшем за счет конвективного теплообмена с окружающей средой. Такая конструкция СУТА позволяет поддерживать рабочую температуру аккумулятора не выше 36°C при скорости разряда батареи 3С и общем весе 32,18 г [26].

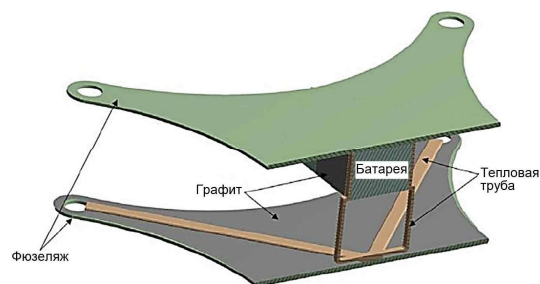


Рис. 10. СУТА с использованием плоских ТТ [26]

Помимо эффективности отвода тепла от аккумулятора, для широкого применения в реальных БПЛА и eVTOL аппаратах СУТА должна иметь компактные размеры и вес, а также низкую стоимость изделия. В этой связи представляют большой интерес так называемые пульсирующие тепловые трубы (ПТТ). Этот класс тепловых труб представляет собой длинную капиллярную медную трубку, изогнутую в виде «змейки» и частично заполненную рабочей жидкостью (рис. 11).

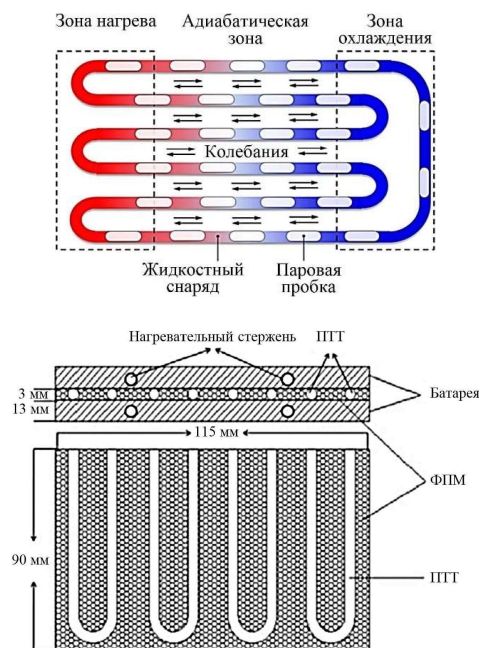


Рис. 11. Принципиальная схема работы ПТТ [27]

Тепло, поглощаемое и отдаваемое в испарительной и конденсаторной секциях ПТТ, приводит к образованию и схлопыванию пузырьков, вызывая колебательное (пульсирующее) движение внутри трубы [28], транспортируя тепло от испарительной секции к конденсаторной. Поэтому, в отличие от цилиндрических и плоских тепловых труб, ПТТ не требуют фитильной структуры, что делает эту конструкцию относительно более простой и уменьшает общую массу устройства. Основные параметры, определяющие производительность ПТТ – это диаметр трубы, коэффициент заполнения, свойства рабочей жидкости и материал тепловой трубы. Были проведены несколько экспериментальных исследований возможностей ПТТ в СУТА при различных условиях окружающей среды, условиях охлаждения, рабочих жидкостях и ориентациях [27, 29, 30]. Испытания вертикально ориентированной ПТТ с верхним концом, контактирующим с аккумулятором, и охлаждаемым нижним концом, показали, что она поддерживает температуру около 60 °С при подводе тепла в 20 Вт [31, 32]. Исследование Чи и др. [33] показали, что использование гибких ПТТ, изготовленных из каучука, может поддерживать температуру испарителя ниже 50 °С при мощности 121 Вт и адиабатической длине 570 мм при вертикальном расположении. Чен и др. [34] исследовали эффективность так называемых наножидкостей, обладающих лучшими по сравнению с беспримесными жидкостями теплоотводящими свойствами, позволяя поддерживать максимальную температуру и равномерность температуры ячейки ниже 42,22 °С и 2 °С соответственно, при скорости разряда 1С и температуре окружающей среды 35 °С. Значительный вклад в разработку и исследование тепловых характеристик двухфазных охладителей СУТА внесен сотрудниками Института тепло- и массообмена Национальной академии наук Беларуси [35–40]. 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 теплопе-

редачи для охлаждения и терморегулирования электрических батарей и двигателей.

Выводы

Применение электрических силовых установок в летательных аппаратах различного назначения позволяют снизить потребление углеводородных топлив и благоприятно сказывается на экологической обстановке. Беспилотные технологии занимают все большее место в жизни современного общества. Их роль становится существенной в таких областях как логистика и транспорт, сельское хозяйство, промышленность и экология, безопасность и многие другие. Этот прогресс возможен благодаря развитию технологий, связанных с накопителями электрической энергии. Сегодня они становятся основным источником энергии для двигательных установок и ключевым фактором жизнеспособности перспективных летательных аппаратов. С увеличением мощности аккумуляторов и особенностей их эксплуатации крайне важным становится вопрос поддержания диапазона рабочих температур для их эффективного использования на протяжении всего срока службы. В данной статье приводится обзор существующих систем управления температурой аккумулятора. Так, воздушное охлаждение является наиболее распространенным способом поддержания рабочей температуры в аккумуляторе за счет простоты конструкции и отсутствия дополнительного веса/объема в БПЛА. Однако с теплофизической точки зрения такой тип охлаждения батарей является наименее эффективным и не всегда может справиться с количеством тепла, генерируемым современной электрической батареей. Дополнительное использование радиатора увеличивает величину теплового рассеивания, но одновременно оно сопряжено с дополнительным объемом и массой, что снижает эксплуатационные характеристики самого БПЛА.

Жидкостное охлаждение является более эффективным способом отвода тепла, но требует наличия дополнительных элементов в системе охлаждения, таких как трубопровод, жидкостной насос, аккумулятор жидкости и радиатор. Более того, наличие жидкостного насоса оказывает дополнительную нагрузку на электрическую батарею. СУТА на основе тепловых труб является наиболее перспективной из-за высокой

эффективности этих устройств, их пассивного метода работы, компактного дизайна и легкого веса. Для широкого использования на практике таких СУТА особое внимание стоит уделить так называемым пульсирующим тепловым трубам. Благодаря простоте их конструкции, малому объему, легкому весу и относительно низкой цене они могут быть рекомендованы при проектировании беспилотных аппаратов в ближайшем будущем.

Список источников

1. Patnaik S. Overview of electrode advances in commercial Li-ion batteries // *Ionics*. 2024. Vol. 30. pp. 3069–3090. DOI: 10.1007/s11581-024-05579-1
2. Pelz A., Grunebaum M., Wiemhofer H.-D. Hybrid electrolytes for lithium ion and post lithium ion batteries // *Encyclopedia of Interfacial Chemistry. Surface Science and Electrochemistry*. 2018. pp. 660–673. DOI: 10.1016/B978-0-12-409547-2.14190-3
3. Kim J., Oh J., Lee H. Review on battery thermal management system for electric vehicles // *Applied Thermal Engineering*. 2019. № 149. pp. 192–212. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.12.020
4. Shahid S., Agelin-Chaab M. A review of thermal runaway prevention and mitigation strategies for lithium-ion batteries // *Energy Conversion and Management*: X. 2022. Vol. 16. DOI: 10.1016/j.ecmx.2022.100310
5. Ma S., Jiang M., Tao P. et al. Temperature effect and thermal impact in lithium-ion batteries: A review // *Progress in Natural Science: Materials International*. 2018. Vol. 28. pp. 653–666. DOI: 10.1016/j.pnsc.2018.11.002
6. Zhang Q., Wei F., Zhang P. et al. Research on the reversible and irreversible heat generation of $\text{LiNi}_{1-x-y}\text{Co}_x\text{Mn}_y\text{O}_2$ -based lithium-ion batteries // *Fire Technology*. 2023. Vol. 59. pp. 1029–1049. DOI: 10.1007/s10694-022-01220-7
7. Schuster E., Ziebert C., Melcher A. et al. Thermal behavior and electrochemical heat generation in a commercial 40 Ah lithium ion pouch cell // *Journal of Power Sources*. 2015. Vol. 286. pp. 580–589. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2015.03.170
8. Du S.L., Lai Y.Q., Ai L. et al. An investigation of irreversible heat generation in lithium ion batteries based on a thermo-electrochemical coupling method // *Applied Thermal Engineering*. 2017. Vol. 121. pp. 501–510. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.04.077
9. Weragoda D.M., Tian G., Burkitbayev A. et al. A comprehensive review on heat pipe based battery thermal management systems // *Applied Thermal Engineering*. 2023. Vol. 224. URL: 10.1016/j.applthermaleng.2023.120070
10. Bernardi D., Pawlikowski E., Newman J. A general energy balance for battery systems // *Journal of Electrochemical Society*. 1985. Vol. 132. № 1. pp. 5–12. DOI: 10.1149/1.2113792
11. Xia G., Cao L., Bi G. A review on battery thermal management in electric vehicle application // *Journal of Power Sources*. 2017. Vol. 367. pp. 90–105. URL: 10.1016/j.jpowsour.2017.09.046
12. Feng X., Gooi H.B., Chen S.X. An improved lithium-ion battery model with temperature prediction considering entropy // 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe) Conference, Berlin, 2012. pp. 1–8.
13. Newman J., Balsara N.P. *Electrochemical Systems (The ECS Series of Texts and Monographs)*. (4th ed.). New York: John Wiley & Sons, 2021. 608 p.
14. Pesaran A., Santhanagopalan S., Kim G.-H. Addressing the impact of temperature extremes on large format Li-ion batteries for vehicle applications // 30th International Battery Seminar, Ft. Lauderdale, Florida, March 11–14, 2013.
15. Shen W., Wang N., Zhang J. et al. Heat generation and degradation mechanism of lithium-ion batteries during high-temperature aging // *ACS Omega*. 2022. № 7. pp. 44733–44742. DOI: 10.1021/acsomega.2c04093
16. Liao Z., Zhang S., Li K. et al. A survey of methods for monitoring and detecting thermal runaway of lithium-ion batteries // *Journal of Power Sources*. 2019. Vol. 436. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2019.226879
17. Foo Shen Hwang, Thomas Confrey, Colin Reidy, et al. Review of battery thermal management systems in electric vehicles // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2024. Vol. 192. DOI: 10.1016/j.rser.2023.114171
18. Al Kindi A.S. Experimental and numerical analysis of air flow through heat sink fins // ISER International Conference, Hamburg, Germany, November 4–5, 2020. pp. 1–5.
19. Mahendra M., Fathina S., Shariff M.H.B.M. et al. Design and CFD analysis of micro-fin heat sink // *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. 2020. Vol. 9, № 7. pp. 1015–1021. DOI: 10.17577/IJERTV9IS070405
20. Yang W., Zhou F., Zhou H. et al. Thermal performance of axial air cooling system with bionic surface structure for cylindrical lithium-ion battery module // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020. Vol. 161. DOI: 10.1016/j.jheatmasstransfer.2020.120307
21. Choubey A. Evaluating latest techniques of battery cooling in electric vehicles. 2022.
22. Weixiong Wu, Shuangfeng Wang, Wei Wu et al. A critical review of battery thermal performance and liquid based battery thermal management // *Energy Conversion and Management*. 2019. Vol. 182. pp. 262–281. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.12.051
23. Veragoda D.M., Tian G., Burkitbaev A. et al. A comprehensive review on heat pipe based battery thermal management systems. *Applied Thermal Engineering*. 2023;224. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.120070
24. Rao Z., Wang S., Wu M. et al. Experimental investigation on thermal management of electric vehicle battery with heat pipe // *Energy Conversion and Management*. 2013. Vol. 65. pp. 92–97. DOI: 10.1016/j.enconman.2012.08.014
25. Wu W., Yang X., Zhang G. et al. Experimental investigation on the thermal performance of heat pipe-assisted phase change material based battery thermal management.

- ment system // *Energy Conversion and Management*. 2017. Vol. 138. pp. 486–492. DOI: 10.1016/j.enconman.2017.02.022
26. Ma Y., Chiang S.W., Chu X.D. et al. Thermal design and optimization of lithium ion batteries for unmanned aerial vehicles // *Energy Storage*. 2019. Vol. 1. № 1. DOI: 10.1002/est.248
 27. Wang Q., Rao Z., Huo Y. et al. Thermal performance of phase change material/oscillating heat pipe-based battery thermal management system // *International Journal of Thermal Sciences*. 2016. Vol. 102. pp. 9–16. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2015.11.005
 28. Nazari M.A., Ahmadi M.H., Ghasempour R. et al. A review on pulsating heat pipes: From solar to cryogenic applications // *Applied Energy*. 2018. Vol. 222. pp. 475–484. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.04.020
 29. Burban G., Ayel V., Alexandre A. et al. Experimental investigation of a pulsating heat pipe for hybrid vehicle applications // *Applied Thermal Engineering*. 2013. Vol. 50. № 1. pp. 94–103. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2012.05.037
 30. Rao Z., Huo Y., Liu X. Experimental study of an OHP-cooled thermal management system for electric vehicle power battery // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2014. Vol. 57. pp. 20–26. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2014.03.017
 31. Chi R.-G., Chung W.-S., Rhi S.-H. Thermal characteristics of an oscillating heat pipe cooling system for electric vehicle Li-ion batteries // *Energies*. 2018. Vol. 11. № 3. DOI: 10.3390/en11030655
 32. Chi R.-G., Rhi S.-H. Oscillating heat pipe cooling system of electric vehicle's Li-ion batteries with direct contact bottom cooling mode // *Energies*. 2019. Vol. 12. № 9. DOI: 10.3390/en12091698
 33. Qu J., Wang C., Li X. et al. Heat transfer performance of flexible oscillating heat pipes for electric/hybrid-electric vehicle battery thermal management // *Applied Thermal Engineering*. 2018. Vol. 135. pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.02.045
 34. Chen M., Li J. Nanofluid-based pulsating heat pipe for thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles // *Journal of Energy Storage*. 2020. Vol. 32. DOI: 10.1016/j.est.2020.101715
 35. Васильев Л.Л., Журавлев А.С., Поддубко С.Н. и др. Системы терморегулирования теплонагруженного оборудования электротранспорта // *Тепловые процессы в технике*. 2021. Т. 13. № 7. С. 296–307. DOI: 10.34759/tpt-2021-13-7-296-307
 36. Vasiliev L.L., Zhuravlyov A.S. Two-phase heat transfer devices for passive cooling of electric and hybrid aircraft onboard equipment // *International Journal of Sustainable Aviation*. 2023. Vol. 9. № 2. pp. 89–114. DOI: 10.1504/IJSA.2023.129938
 37. Васильев Л.Л., Журавлев А.С., Гракович Л.П. и др. Двухфазные устройства для терморегулирования теплонагруженных компонентов электротранспорта // *Инженерно-физический журнал*. 2025. Т. 98. № 1. С. 62–73.
 38. Vasiliev L., Zhuravlyov A., Sadchenko D. Two-phase heat conductors for passive thermal regulation systems of electric vehicles // *Mechanical Engineering Advances*. 2025. Vol. 3. № 2. DOI: 10.59400/mea2052
 39. Васильев Л.Л., Журавлев А.С., Кузьмич М.А. Экспериментальное исследование гидродинамики и теплообмена в кольцевом термосифоне для терморегулирования силовых установок электрических летательных аппаратов // *Теплоэнергетика*. 2025. № 6. С. 75–81. DOI: 10.56304/S0040363625700857
 40. Васильев Л.Л., Кузьмич М.А., Садченко Д.И. и др. Двухфазные теплопередающие устройства в системах терморегулирования электрического транспорта // *Вестник Фонда фундаментальных исследований*. 2025. № 4. С. 122–137.

References

1. Patnaik S. Overview of electrode advances in commercial Li-ion batteries. *Ionics*. 2024;30: 3069–3090. DOI: 10.1007/s11581-024-05579-1
2. Pelz A, Grunebaum M, Wiemhofer H-D. Hybrid electrolytes for lithium ion and post lithium-ion batteries. *Encyclopedia of Interfacial Chemistry. Surface Science and Electrochemistry*. 2018;660–673. DOI: 10.1016/B978-0-12-409547-2.14190-3
3. Kim J, Oh J, Lee H. Review on battery thermal management system for electric vehicles. *Applied Thermal Engineering*. 2019;149:192–212. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.12.020
4. Shahid S, Agelin-Chaab M. A review of thermal runaway prevention and mitigation strategies for lithium-ion batteries. // *Energy Conversion and Management: X*. 2022; 16: DOI: 10.1016/j.ecmx.2022.100310
5. Ma S, Jiang M, Tao P et al. Temperature effect and thermal impact in lithium-ion batteries: A review. *Progress in Natural Science: Materials International*, 2018; 28:653–666.
6. Zhang Q, Wei F, Zhang P et al. Research on the reversible and irreversible heat generation of $\text{LiNi}_{1-x-y}\text{Co}_x\text{Mn}_y\text{O}_2$ -based lithium-ion batteries. *Fire Technology*, 2023;59: 1029–1049. DOI: 10.1007/s10694-022-01220-7
7. Schuster E, Ziebert C, Melcher A et al. Thermal behavior and electrochemical heat generation in a commercial 40 Ah lithium ion pouch cell. *Journal of Power Sources*, 2015;286: 580–589. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2015.03.170
8. Du SL, Lai YQ, Ai L et al. An investigation of irreversible heat generation in lithium ion batteries based on a thermo-electrochemical coupling method. *Applied Thermal Engineering*. 2017;12: 501–510. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.04.077
9. Weragoda DM, Tian G, Burkitbayev A et al. A comprehensive review on heat pipe based battery thermal management systems. *Applied Thermal Engineering*, 2023; 224. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.120070
10. Bernardi D, Pawlikowski E, Newman J. A general energy balance for battery systems. *Journal of Electrochemical Society*. 1985; 132(1):5–12. DOI: 10.1149/1.2113792

11. Xia G, Cao L, Bi G. A review on battery thermal management in electric vehicle application. *Journal of Power Sources*, 2017; 367: 90–105. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2017.09.046
12. Feng X, Gooi HB, Chen SX. An improved lithium-ion battery model with temperature prediction considering entropy. *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe) Conference (Berlin, 2012)*. DOI: 10.1109/ISGTEurope.2012.6465668
13. Newman J, Balsara NP. *Electrochemical Systems (The ECS Series of Texts and Monographs) (4th eds.)*. New York: John Wiley & Sons; 2021. 608 p.
14. Pesaran A, Santhanagopalan S, Kim G-H. Addressing the impact of temperature extremes on large format Li-ion batteries for vehicle applications. *30th International Battery Seminar (Ft. Lauderdale, Florida, March 11–14, 2013)*.
15. Shen W, Wang N, Zhang J et al. Heat generation and degradation mechanism of lithium-ion batteries during high-temperature aging. *ACS Omega*, 2022;7:44733–44742. DOI: 10.1021/acsomega.2c04093
16. Liao Z, Zhang S, Li K et al. Habetler. A survey of methods for monitoring and detecting thermal runaway of lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*. 2019;436. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2019.226879
17. Foo Shen Hwang, Thomas Confrey, Colin Reidy et al. Review of battery thermal management systems in electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2024;192. DOI: 10.1016/j.rser.2023.114171
18. Al Kindi AS. Experimental and numerical analysis of air flow through heat sink fins. *ISER International Conference, Hamburg, Germany, November 4–5. 2020*. pp. 1–5.
19. Mahendra M, Fathina S, Shariff MHB et al. Design and CFD analysis of micro-fin heat sink. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. 2020;9(07):1015–1021. DOI: 10.17577/IJERTV9IS070405
20. Yang W, Zhou F, Zhou H et al. Thermal performance of axial air-cooling system with bionic surface structure for cylindrical lithium-ion battery module. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020;(161). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120307
21. Choubey A. *Evaluating latest techniques of battery cooling in electric vehicles*. 2022.
22. Weixiong Wu, Shuangfeng Wang, Wei Wu et al. A critical review of battery thermal performance and liquid based battery thermal management. *Energy Conversion and Management*. 2019;182:262–281. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.12.051
23. Veragoda DM, Tian G, Burkitbaev A et al. A comprehensive review on heat pipe based battery thermal management systems. *Applied Thermal Engineering*. 2023; 224, DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.120070
24. Rao Z, Wang S, Wu M et al. Experimental investigation on thermal management of electric vehicle battery with heat pipe. *Energy Conversion and Management* 2013; 65:92–97. DOI: 10.1016/j.enconman.2012.08.014
25. Wu W, Yang X, Zhang G et al. Experimental investigation on the thermal performance of heat pipe-assisted phase change material based battery thermal management system. *Energy Conversion and Management*. 2017;138:486–492. DOI: 10.1016/j.enconman.2017.02.022
26. Ma Y, Chiang SW, Chu XD et al. Thermal design and optimization of lithium-ion batteries for unmanned aerial vehicles. *Energy Storage*. 2019;1(1). DOI: 10.1002/est.2.48
27. Wang Q, Rao Z, Huo Y et al. Thermal performance of phase change material/oscillating heat pipe-based battery thermal management system. *International Journal of Thermal Sciences*. 2016;102:9–16. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2015.11.005
28. Nazari MA, Ahmadi MH, Ghasempour R et al. A review on pulsating heat pipes: From solar to cryogenic applications. *Applied Energy*. 2018;222:475–484. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.04.020
29. Burban G, Ayel V, Alexandre A et al. Experimental investigation of a pulsating heat pipe for hybrid vehicle applications. *Applied Thermal Engineering*. 2013;50(1): 94–103. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2012.05.037
30. Rao Z, Huo Y, Liu X. Experimental study of an OHP-cooled thermal management system for electric vehicle power battery. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2014;57:20–26. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2014.03.017
31. Chi R-G, Chung W-S, Rhi S-H. Thermal characteristics of an oscillating heat pipe cooling system for electric vehicle Li-ion batteries. *Energies*. 2018;11(3). DOI: 10.3390/en11030655
32. Chi R-G, Rhi S-H. Oscillating heat pipe cooling system of electric vehicle's Li-ion batteries with direct contact bottom cooling mode. *Energies*. 2019;12(9) DOI: 10.3390/en12091698
33. Qu J, Wang C, Li X et al. Heat transfer performance of flexible oscillating heat pipes for electric/hybrid-electric vehicle battery thermal management. *Applied Thermal Engineering*. 2018;135:1–9. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.02.045
34. Chen M, Li J. Nanofluid-based pulsating heat pipe for thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles. *Journal of Energy Storage*. 2020;32. DOI: 10.1016/j.est.2020.101715
35. Vasiliev LL, Zhuravlyov AS, Poddubko SN et al. Thermal control systems for thermally loaded equipment of electrical transport. *Thermal Processes in Engineering*. 2021;13(7):296–307. DOI: 10.34759/tpt-2021-13-7-296-307 (In Russ.).
36. Vasiliev LL, Zhuravlyov AS. Two-phase heat transfer devices for passive cooling of electric and hybrid aircraft onboard equipment. *International Journal of Sustainable Aviation*. 2023;9(2):89–114. (In Russ.). DOI: 10.1504/IJS A.2023.129938
37. Vasiliev LL, Zhuravlev AS, Grakovich LP et al. Two-phase devices for thermal regulation of heat loaded components of electric transport. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2025;98(1):62–72. DOI: 10.1007/s10891-025-03075-5
38. Vasiliev L, Zhuravlyov A, Sadchenko D. Two-phase heat conductors for passive thermal regulation systems of

- electric vehicles. *Mechanical Engineering Advances*. 2025;3(2). (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.59400/mea2052>
39. Vasiliev LL, Zhuravlyov AS, Kuzmich MA. Experimental study of hydrodynamics and heat transfer in a loop thermosyphon for thermal control of power plants of electric aircraft. *Thermal Engineering*. 2025;6:75–81. DOI: 10.56304/S0040363625700857
40. Vasiliev LL, Zhuravlyov AS, Kuzmich MA et al. Two-phase heat transfer devices in thermal control systems of electric transport. *Vestnik of the Foundation for Fundamental Research*. 2025;4:122–137 (In Russ.).