

Научная статья

УДК 629.7.03

URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=186677>

EDN: <https://www.elibrary.ru/JMGPHT>



Исследование теплового состояния модуля аккумуляторной батареи с различными системами терморегулирования для применения в составе гибридной или электрической силовой установки летательного аппарата

Роман Олегович Тетерин^{1✉}, Андрей Дмитриевич Едигарев², Михаил Вячеславович Шемет³

^{1, 2, 3} ОДК-Климов, Санкт-Петербург, Российская Федерация

¹ teterin_ro@klimov.ru✉

Аннотация. Рассмотрены основные системы терморегулирования для обеспечения функционирования аккумуляторной батареи (АКБ) для применения в составе гибридной или электрической силовой установки летательного аппарата. Определены ключевые особенности различных систем терморегулирования, рассмотрен опыт разработки модулей аккумуляторных батарей. На основании полученных результатов определены области применения для различных систем терморегулирования АКБ.

Ключевые слова: энергоустановки летательных аппаратов, источники энергии, гибридная силовая установка, модуль аккумуляторной батареи, система терморегулирования

Для цитирования: Тетерин Р.О., Едигарев А.Д., Шемет М.В. Исследование теплового состояния модуля аккумуляторной батареи с различными системами терморегулирования для применения в составе гибридной или электрической силовой установки летательного аппарата // Вестник Московского авиационного института. 2025. Т. 32. № 4. С. 160–169. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=186677>

Original article

Thermal State Studying of the Battery Module with Various Thermal Control Systems for Application as a Part of the Aircraft Hybrid or Electric Power Plant

Roman O. Teterin^{1✉}, Andrei D. Edigarev², Mikhail V. Shemet³

UEC-Klimov, Saint-Petersburg, Russian Federation

¹ teterin_ro@klimov.ru✉

Abstract

The current evolution of aviation technologies demonstrates a consistent transition from conventional internal combustion engines towards hybrid and electric propulsion systems (EPS) for aircraft. This transition opens new opportunities for innovative flying vehicle architectures, driven by goals of reducing emissions, improving energy efficiency, and minimizing acoustic and thermal characteristics. Lithium-ion batteries (LIBs) play a central role in the of electric and hybrid-electric aircraft architecture due to their high specific power and energy density.

However, their integration poses significant challenges, especially in terms of thermal management and ensuring safe operation under stringent aviation constraints.

The LIBs performance and service life are highly sensitive to the operating temperature. Deviation from the optimal thermal range (15–35°C) leads to the capacity fade, accelerated degradation, and in extreme cases, thermal runaway, which may pose serious safety risks. The demand for high power at critical flight phases such as takeoff and landing exacerbates these thermal challenges. In contrast to electric vehicles, where peak power is required for rather short durations, aircraft typically requires sustained high-power output over longer periods (30–300 seconds), increasing the risk of overheating.

To address this, an effective Battery Thermal Management System (BTMS) is essential. Among various BTMS technologies there are air cooling, indirect liquid cooling, phase change materials, and heat pipes. The direct liquid immersion cooling offers the most effective solution for the aviation-grade battery systems. With this method, battery cells are being directly submerged into a dielectric coolant, eliminating thermal contact resistance and ensuring superior heat dissipation. Immersion cooling to the safety as well by suppressing the effects of thermal runaway and allowing compact module architecture.

This study presents the design and thermal analysis of lithium-ion battery modules with immersion cooling tailored for hybrid-electric aircraft applications. The modules are based on high-power cylindrical 21700 cells with a capacity of less than 10 Ah, selected for their superior structural integrity and safety features such as Current Interrupt Devices (CID). The thermal model accounts for the LIB cells anisotropic thermal conductivity, and was verified against experimental discharge data at 5C and 10C rates. Three battery module architectures were developed and compared in terms of their thermal performance under high current loads.

The simulation results demonstrate that immersion-cooled modules effectively maintain cell temperatures below the critical threshold of 55°C, ensuring full utilization of available energy without compromising safety or cycle life. This validates immersion cooling as a promising approach for aviation battery systems. The presented design strategies align with the strict requirements of aerospace standards (such as RTCA DO-311A) and reflect the increasing adoption of modular, fault-tolerant battery architectures in the next-generation electric aircraft.

Keywords: aircraft power plant, energy sources, hybrid power plant, battery module, thermal management system

For citation: Teterin R.O., Edigarev A.D., Shemet M.V. Thermal State Studying of the Battery Module with Various Thermal Control Systems for Application as a Part of the Aircraft Hybrid or Electric Power Plant. *Aerospace MAI Journal*. 2025;32(4):160–169. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=186677>

List of Figures

Fig. 1. Lithium-ion battery operating temperature range

Fig. 2. The Midnight project electric propulsion system architecture by the Archer Company

Fig. 3. Electric propulsion system structure of the ACCCEL project

Fig. 4. Lithium-ion battery discharge curves

Fig. 5. Layout of the battery module, option No. 1

Fig. 6. Layout of the battery module, option No. 2 (air-cooled on the left; immersion-cooled on the right)

Fig. 7. Layout of the battery module, option No. 3

List of Tables

Table. Testing results of various battery module options

Введение

Современное развитие авиационных технологий демонстрирует устойчивую тенденцию перехода от традиционных двигателей внутреннего сгорания к гибридным силовым установкам (ГСУ) и электрическим силовым установкам (ЭСУ) летательных аппаратов (ЛА). Применение ГСУ открывает новые возможности для инноваций в конструкции летательных аппаратов, что способствует развитию авиационной индустрии. Широкое внедрение таких типов силовых установок обусловлено потенциальным снижением вредных выбросов, возможностью интеграции в новые архитектуры ЛА, оптимизации

ей режимов работы газотурбинного двигателя, минимизацией акустических и тепловых сигнатур ЛА [1], отсутствием зависимости мощности от высоты полета, а также топливной эффективностью. ГСУ обладает конструкцией повышенной сложности, и для ее применения необходим поиск оптимальной стратегии управления потоками энергии [2].

За последние несколько лет появилось множество разновидностей летательных аппаратов в рамках концепции городской воздушной аэромобильности, что стало возможно благодаря увеличению удельной энергии и мощности литий-ионных аккумуляторных батарей [3]. Мощность,

необходимая для вертикального взлета и посадки, напрямую зависит от нагрузки на винт — параметра, определяемого отношением взлетной массы ЛА к суммарной площади несущих винтов. В крейсерском режиме полета ключевым фактором, определяющим энергопотребление, является подъемная сила крыла, формирующая аэродинамическую эффективность ЛА. Оптимизация летно-технических характеристик (ЛТХ) ЛА предполагает поиск баланса между ключевыми параметрами, такими как взлетная масса, дальность и продолжительность полета, полезная нагрузка и энергопотребление. Разнообразие аэродинамических конфигураций ЛА, обусловленное различиями ЛТХ, накладывает уникальные для каждого ЛА требования к применению АКБ. Однако с совершенствованием технологии АКБ, благодаря которому повышаются удельная мощность и плотность энергии, полезная нагрузка, дальность и продолжительность полета ЛА увеличиваются [4].

Одним из ключевых элементов в архитектуре ГСУ является АКБ, которая должна обеспечивать надежное и стабильное электропитание на различных этапах полета ЛА. Концепция проектирования ГСУ предполагает создание высокомоощных АКБ с минимальной массой [5], что критически важно для топливной эффективности, поскольку энергоемкость керосина на порядок превышает энергоемкость современных АКБ. Даже если принять во внимание перспективы развития литий-ионных аккумуляторов (ЛИА), удельная энергоемкость которых достигает в настоящий момент уровня $500 \text{ Вт} \cdot \text{ч/кг}$, для междугородних полетов такой уровень недостаточен.

Согласно исследованиям [6, 7] применение ЭСУ значительно сокращает дальность полетов ЛА в сравнении с традиционными и гибридными силовыми установками. Поэтому, до тех пор пока технология литий-ионных аккумуляторов не развилась до определенного уровня, ЛА, в которых реализуется питание от литий-ионных АКБ, должны быть предназначены для более коротких внутригородских и пригородных полетов с высокой взлетной мощностью. Примерами таких проектов являются ЛА с вертикальным взлетом и посадкой (VTOL — Vertical Take Off and Landing) и с укороченным взлетом и посадкой (STOL — Short Takeoff and Landing).

В разработке находятся такие перспективные ЛА с вертикальным взлетом и посадкой, как Vertical Aerospace VX4 и Horizon Aircraft Cavorite X7. Данные ЛА используют АКБ в составе ГСУ для обеспечения взлета и посадки, а также в качестве аварийного источника питания.

Первоочередной задачей интеграции ГСУ в ЛА является внедрение высокомоощных АКБ, работаю-

щих в связке с энергоузелом на базе газотурбинного двигателя, для обеспечения пиковых энергетических нагрузок на этапах взлета и посадки, а также в качестве аварийного источника энергии.

Главной задачей при проектировании АКБ для авиационных силовых установок является обеспечение требуемого уровня надежности, удельных энергетических и мощностных характеристик, а также безопасности при высоких массогабаритных ограничениях.

Согласно исследованию [8], основными факторами деградации ЛИА являются высокая и низкая рабочая температура, при этом температурный режим играет ключевую роль в обеспечении их эффективной работы, долговечности, производительности и безопасности, что подтверждается исследованием [9].

Работа АКБ в условиях высоких токовых нагрузок позволяет оптимизировать ее массу за счет повышения удельной мощности (Вт/кг). Поскольку существенным источником тепловыделений в ЛИА является нагрев от внутреннего сопротивления при протекании тока, существует вероятность перегрева ЛИА при высоких скоростях разряда и заряда (C-rate). Перегрев ЛИА может привести к снижению емкости, ускоренной деградации, а в критических случаях — к возникновению аварийных ситуаций, включая тепловой разгон. Высокая рабочая температура вызывает деградацию электрохимической системы, снижает производительность и ускоряет старение ЛИА [10, 11]. Установлено, что оптимальная рабочая температура для ЛИА находится в диапазоне от 15 до 35°C [12]. На рис. 1 показано влияние температуры на ЛИА. Отклонение от оптимального температурного диапазона приводит к ряду негативных последствий.

При низких температурах ухудшение производительности в основном вызвано снижением ионной проводимости (скорости протекания химических реакций), увеличением сопротивления переносу заряда и образованием литиевого покрытия — специфическим эффектом, который происходит на поверхности графита и других анодов на основе углерода, что приводит к риску

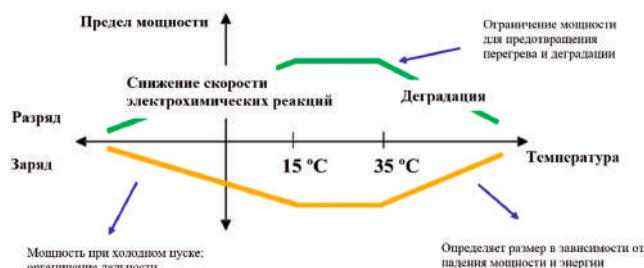


Рис. 1. Температурный диапазон работы ЛИА

короткого замыкания и потере емкости при низких температурах [13].

Нарушение температурного баланса, особенно в сочетании с дефектами производства или механическими повреждениями, может стать причиной короткого замыкания, разгерметизации ЛИА и их воспламенения. Таким образом, необходимым этапом разработки АКБ является эффективная система управления температурой (BTMS – Battery Thermal Management System) для поддержания требуемого диапазона и минимизации теплового градиента ЛИА с целью предотвращения неблагоприятных эффектов [14].

Описание исходных данных

К АКБ авиационного применения предъявляются более строгие требования по сравнению с АКБ, используемыми в наземном электротранспорте. Основные требования к безопасности АКБ изложены в стандарте RTCA DO-311A, который устанавливает минимальные требования к производительности и безопасности перезаряжаемых литиевых батарей и батарейных систем аэрокосмической отрасли. Стандарт определяет, что высоковольтная АКБ должна обеспечивать сдерживание теплового разгона единичного ЛИА в течение достаточного времени, а также препятствовать распространению теплового разгона на соседние ЛИА. Также стандарт регламентирует функции управления и защиты BMS – Battery Management System, которые, как правило, являются двухуровневыми системами. Нижний уровень BMS собирает телеметрию (замер напряжений и температур) и

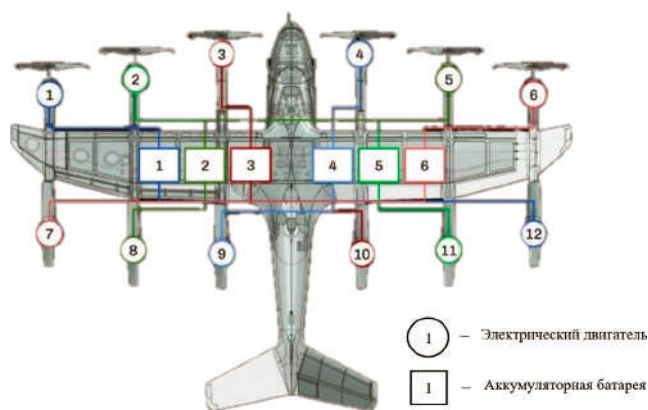


Рис. 2. Архитектура ЭСУ проекта Midnight компании Archer

осуществляет балансировку. Верхний уровень BMS выполняет функции управления и защиты АКБ, в том числе воздействует на силовые цепи, а также отвечает за взаимодействие АКБ с системой управления изделием.

Повышение надежности АКБ достигается за счет замены единой АКБ несколькими параллельными независимыми сборками. Независимые сборки обеспечивают резервирование и снижают риск полного отказа АКБ. Архитектура ЭСУ ЛА Midnight компании Archer представлена на рис. 2.

Каждая из шести независимых высоковольтных АКБ обеспечивает энергией собственную пару инверторов и электрических двигателей.

Силовая установка проекта ACCEL, представленная на рис. 3, состоит из трех гальванически

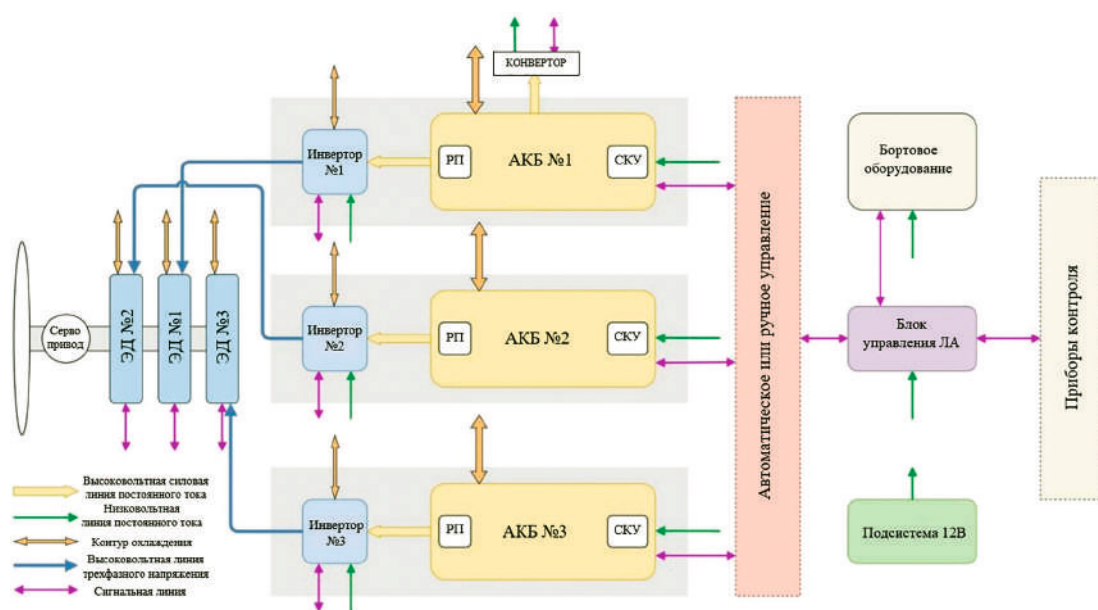


Рис. 3. Структура ЭСУ проекта ACCEL

изолированных высоковольтных АКБ, каждая из которых обеспечивает энергией собственный инвертор и электрический двигатель.

Каждая высоковольтная АКБ применяется в качестве автономного источника энергии и оснащается собственной системой непрямого охлаждения. При таком подходе аккумуляторные модули формируют независимые высоковольтные АКБ с разделенными силовыми и информационными интерфейсами. Для обеспечения безопасности АКБ также применяется система продувки азотом, целью которой является разбавление и снижение концентрации горючих газов и кислорода для предотвращения образования взрывоопасной среды.

В отличие от электрических автомобилей, где максимальные мощности требуются в течение коротких интервалов (до 10 с для ускорения), в авиационном применении интервалы работы на максимальной мощности увеличиваются до 30 ... 300 с, что соответствует этапам взлета и посадки. Анализируя существующие разработки и требования к силовым установкам ЛА, приняли решение о разработке аккумуляторных модулей, способных функционировать при максимально допустимых токовых нагрузках с сохранением стабильного теплового состояния.

Различают три форм-фактора ЛИА: цилиндрические, призматические и ЛИА в мягкой полимерной упаковке (pouch ЛИА). Цилиндрические ЛИА обеспечивают равномерное распределение механических напряжений на всем протяжении жизненного цикла, в то время как призматические элементы в течение жизненного цикла набухают, что усложняет сборку и требует управления напряжениями для предотвращения структурных и деформационных отказов [15].

Набуханием в ЛИА называется циклическое изменение объема катодного и анодного материала, вызванное интеркаляцией лития во время циклов заряда и разряда [16]. Цилиндрические и призматические элементы ввиду наличия собственного металлического корпуса имеют в своей конструкции специальные устройства прерывания тока (CID-мембраны — current interruption device), которые при превышении давления внутри ЛИА открываются и выпускают горючие газы в определенном направлении, это сопровождается разрывом силовой цепи ЛИА. Аббревиатура “CID” расшифровывается как «устройство прерывания тока» — подвижный контакт, отключающий подачу напряжения на положительную клемму в случае перегрева АКБ и воздействия на подвижную мембрану (предохранительный клапан) избыточного давления с выделением газа из корпуса ЛИА [17].

Также, поскольку тепловой разгон ЛИА сопровождается выделением энергии, которая прямо пропорциональна располагаемой емкости, лучше выбирать ЛИА с емкостью до 10 А·ч. После анализа коммерчески доступных ЛИА различных форм-факторов выбор был сделан в пользу высокоомощных цилиндрических ЛИА 21700.

Выбор системы терморегулирования

Большинство современных BTMS реализуются на базе двух основных подходов: воздушном [18] и жидкостном охлаждении [19]. Известны также BTMS с применением материалов с фазовым переходом [20] (PCM — Phase Change Material), в том числе системы с применением тепловых трубок [21]. Комплексные обзоры различных BTMS представлены в исследованиях [22, 23].

Воздушное охлаждение в основном используется благодаря простоте конструкции и низкой стоимости. Однако эффективность метода ограничена низким коэффициентом теплопередачи, что затрудняет отвод тепла в условиях высоких температур и при эксплуатации на высоких скоростях разряда.

Системы с PCM имеют высокую способность хранения тепловой энергии благодаря использованию скрытой теплоты перехода между фазами для поглощения тепловой энергии ЛИА, следовательно, могут эффективно ограничивать повышение температуры и обеспечивать равномерность температуры АКБ [24]. Однако широкому применению системы PCM препятствуют ее недостаточная долгосрочная термическая стабильность и изменение объема после плавления материалов с фазовым переходом.

Жидкостное охлаждение можно разделить на косвенное и прямое. В косвенном применяются пластины, трубки и рубашки охлаждения. В качестве охлаждающей жидкости (ОЖ), как правило, применяется водно-гликолевая смесь. Поскольку жидкость обладает электропроводностью, то необходима изоляция от элементов АКБ с помощью диэлектрических, теплопроводных материалов, что усложняет конструкцию и увеличивает стоимость BTMS. Неполный контакт между охлаждающими структурами и ЛИА увеличивает контактное тепловое сопротивление, что снижает эффективность теплопередачи.

При прямом жидкостном охлаждении ЛИА непосредственно погружены в диэлектрический хладагент. Традиционные методы воздушного охлаждения и косвенного жидкостного охлаждения уступают по эффективности и массе методу прямого жидкостного охлаждения. Наиболее эффективным методом охлаждения ЛИА является прямое погружение в однофазную непроводящую

ОЖ [25]. Прямое жидкостное охлаждение устраняет тепловое контактное сопротивление между ЛИА и ОЖ и значительно повышает эффективность рассеивания тепла [26]. Кроме того, ОЖ могут выступать в качестве антипиренов, что уменьшает опасность и влияние теплового разгона. Основными недостатками таких ВМТС являются необходимость обеспечения совместимости материалов и периодической проверки изоляционных свойств.

По прогнозам аналитической компании IDTechEx в ближайшие 10 лет рынок ВМТС на основе иммерсионного охлаждения продемонстрирует рост в 9 раз, что указывает на устойчивую тенденцию к развитию данного направления [27].

Ярким примером иммерсионного охлаждения высоковольтной АКБ большой мощности является гиперкар Koenigsegg Regera, в котором аккумуляторные модули размещены в герметичных корпусах с оптимизированным распределением ОЖ. Такая архитектура позволяет обеспечивать пиковые мощности в 670 л. с. в течение 10 с при массе АКБ 75 кг, а также быструю зарядку мощностью 200 кВт.

При проектировании АКБ используются характеристики ЛИА. В общем виде кривые разряда ЛИА представлены на рис. 4. Разной токовой нагрузке соответствует собственная кривая разряда (зависимость напряжения от емкости).

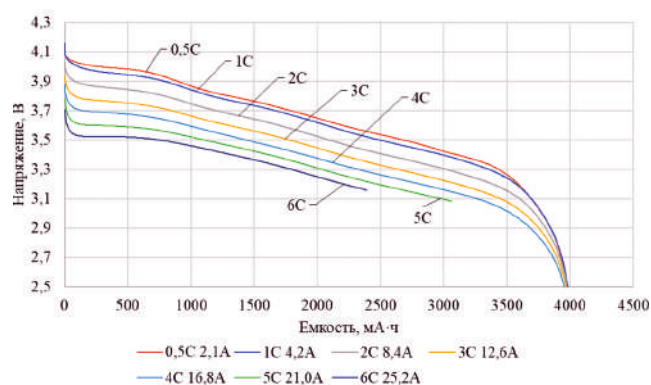


Рис. 4. Разрядные кривые ЛИА

График также демонстрирует предельные температурные значения, зафиксированные в процессе разряда. Некоторые кривые преждевременно обрываются из-за достижения максимально разрешенной температуры 60°C, что ограничило полезную емкость батарей.

Для последующих расчетов, с целью полного использования заложенной емкости и сохранения ресурса ЛИА, в качестве целевого значения максимальной температуры принято 55°C.

Тепловое состояние модулей АКБ

Разработка модулей АКБ для авиационных энергоустановок вызвана потребностью в высоко-мощных источниках энергии. Проектирование включает тепловые расчеты и конструирование, при котором необходимо обеспечить надежную фиксацию ЛИА, соблюдение требований электро-безопасности и совместимости материалов.

Тепловое состояние моделировалось по результатам проведения испытаний с замером температуры поверхности ЛИА. В рамках сопряженной термодинамической задачи моделировался разряд единичного ЛИА с получением зависимости температурного состояния от отданной емкости на токовых нагрузках 5С и 10С. Верификация расчетной модели проводилась по моделированию единичного ЛИА в условиях свободной конвекции для повторения кривой нагрева, полученной экспериментальным путем разряда ЛИА на соответствующих токах. В качестве исходных данных для моделирования теплового состояния модулей АКБ использовались значения массового расхода охлаждающей среды и объемного источника тепловой мощности с учетом анизотропии теплопроводности в радиальном и осевом направлениях ЛИА.

Для анализа тепловых характеристик были разработаны три варианта модулей АКБ. Вариант № 1 использует систему принудительной конвекции, в которой охлаждение реализовано посредством вентиляторов, установленных на фронтальной панели модуля АКБ. Внешний вид модуля АКБ № 1 представлен на рис. 5.

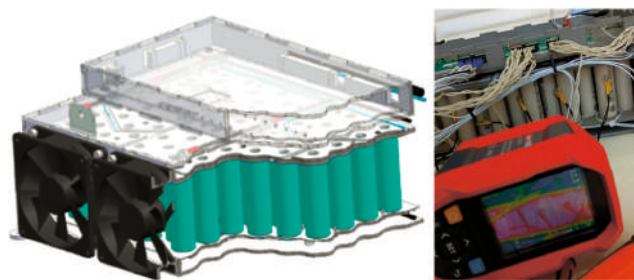


Рис. 5. Внешний вид модуля АКБ вариант № 1

Вариант № 2 представляет собой универсальный модуль АКБ, поддерживающий два варианта терморегулирования: воздушное и жидкостное иммерсионное. При воздушном охлаждении вентилятор нагнетает воздух в нижнюю часть модуля, специальные корпусные отверстия обеспечивают его выход в верхней части. При иммерсионном охлаждении ОЖ подается в нижнюю часть модуля, разделяется на направленные потоки вдоль торцевых и цилиндрических поверхностей ЛИА, после

чего отводится из модуля АКБ. Внешний вид модуля АКБ № 2 представлен на рис. 6.

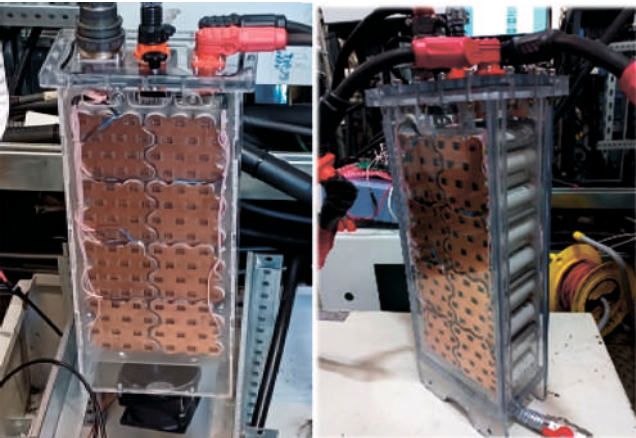


Рис. 6. Внешний вид модуля АКБ вариант № 2 (слева — с воздушным охлаждением, справа — с иммерсионным охлаждением)

Вариант № 3 оснащен системой иммерсионного охлаждения со специально профилированными каналами. ОЖ поступает в нижнюю часть модуля, равномерно распределяется по оптимизированным каналам, проходит массив ЛИА и выводится из модуля АКБ. Внешний вид модуля АКБ № 3 представлен на рис. 7.



Рис. 7. Внешний вид модуля АКБ вариант № 3

Испытания модулей АКБ проводились на специализированном нагрузочном оборудовании, обеспечивающем автоматическое поддержание разрядной мощности, что позволяет имитировать реальный разряд АКБ в условиях работы в составе ГСУ.

Тепловое состояние контролировалось по показаниям датчиков температур, которые были закреплены на ЛИА с помощью термоклея, количество датчиков в каждом модуле — не менее 8 штук.

Результаты испытаний приведены в таблице. Отклонения расчетных температур от значений, полученных экспериментальным путем, составили не более 12%.

Мощность ВМТС оценивалась по затрачиваемой электрической мощности вентиляторов и насоса для циркуляции охлаждаемой среды. Испытания оканчивались по достижении максимальной температуры модулей АКБ 55°С либо при полном разряде модуля АКБ.

Результаты испытаний модуля АКБ № 1

Испытания модуля № 1 с воздушным охлаждением продемонстрировали снижение отдаваемой емкости до 31 и 28,6% при токах 10С и 13С соответственно. При нагрузке 5С воздушное охлаждение обеспечило выдачу 92% от номинальной емкости.

Недобор полной 100%-ной емкости объясняется следующими факторами:

1) снижением емкости на 3–5% в сравнении с номинальной емкостью при нагрузке 5С по характеристикам ЛИА;

2) потерями, вызванными падением напряжения во время испытаний, оцениваемыми в 2–3%.

Конфигурация модуля № 1 может быть доведена до выдачи максимальной теоретической емкости путем:

1) увеличения расхода воздуха, что повлечет за собой увеличение требуемой мощности ВМТС;

Результаты испытаний различных вариантов модулей АКБ

	Модуль АКБ № 1			Модуль АКБ № 2		Модуль АКБ № 3	
Тип ВТМС	Воздушная			Воздушная	Иммерсионная жидкостная		
Расход охлаждаемой среды	6 м³ / мин			2 м³ / мин	8 л/мин	12 л/мин	4 л/мин
Разрядный ток, С	5	10	13	10	10	10	10
Максимальная температура ЛИА, °С	55	55	55	55	55	49	51
Отданная емкость, %	92	31	28,6	28	58	90	88,4
Максимальный градиент температуры, °С/с	0,16	0,42	0,6	0,5	0,36	0,29	0,25
Минимальный градиент температуры, °С/с	0,02	0,24	0,28	0,24	0,10	0,04	0,03
Мощность ВТМС, Вт	210	210	210	70	86	105	120

2) оптимизации расположения ЛИА с увеличением расстояний между ЛИА для улучшения обтекания и снижения эффектов от соседних ЛИА, что ухудшит удельную объемную плотность (Вт ч/л).

Результаты испытаний модуля АКБ № 2

Испытания модуля № 2 с воздушным охлаждением демонстрируют недостаточность отданной емкости (28%), в то время как иммерсионное охлаждение с расходом ОЖ 12 л/мин позволяет приблизиться к максимальной теоретической разрядной емкости с учетом снижения емкости на 5–7% от номинальной при токе 10С, а также потерь напряжения при испытаниях. Иммерсионное охлаждение с расходом 12 л/мин позволило обеспечить максимальную температуру ниже 50°C, что удовлетворяет условию непревышения заданного ограничения по температуре (55°C). Данная конфигурация модуля распределяет ОЖ между цилиндрическими и торцевыми частями ЛИА в определенной пропорции, потоки разделяются на три области. При такой конфигурации модуль АКБ № 2 имеет меньшее гидравлическое сопротивление в сравнении с модулем № 3, в связи с чем потребная энергия для прокачки ОЖ меньше. Для прокачки каждого модуля АКБ 12 л/мин в составе АКБ, номинальным напряжением 702 В, требуется 156 л/мин, что создает определенные сложности и обуславливает требования к обеспечению циркуляции ОЖ в составе АКБ.

Результаты испытаний модуля АКБ № 3

Испытания модуля АКБ № 3 с иммерсионным охлаждением продемонстрировали удовлетворительную отданную емкость, равную 88,4%, а также непревышение максимальной температуры, равной 55°C. При этом прокачка ОЖ в сравнении с модулем № 2 сократилась в три раза и составила 4 л/мин, что положительно скажется на общей ВМТС в составе АКБ изделия. В сравнении с модулем АКБ № 2 течение ОЖ осуществляется по специально профилированным каналам, что увеличивает гидравлические потери и требует большей мощности ВМТС.

При испытаниях АКБ № 2 с расходом 12 л/мин и модуля АКБ № 3 кривая нагрева принимала пологий характер и температурное состояние стабилизировалось, что говорит о достижении температурного равновесия, при этом максимальная температура не достигла 55°C. В других случаях достижение предельной температуры 55°C сопровождалось положительным градиентом нарастания температуры.

Выводы

Воздушная система терморегулирования обеспечивает эффективное охлаждение ЛИА при

токовой нагрузке 5С, тогда как иммерсионное охлаждение позволяет поддерживать допустимый тепловой режим ЛИА при нагрузке 10С.

Как правило, применение высокомоощных АКБ в составе ГСУ для авиации обусловлено максимальными токовыми нагрузками, АКБ в составе ГСУ проектируется из условия обеспечения максимальной мощности (кВт), в то время как АКБ в составе ЭСУ проектируется на иной целевой параметр – максимальную энергоемкость (кВт·ч) для обеспечения максимальной дальности полета. В случае применения в ЭСУ АКБ может работать на умеренных токовых нагрузках, где достаточно воздушных ВМТС, в то время как для высокомоощных АКБ, применяемых в составе ГСУ, требуется более интенсивный отвод тепловой мощности и, следовательно, наиболее подходящим вариантом является иммерсионная ВМТС.

Таким образом, рассмотренные в данной статье модули АКБ подтвердили основанные на тепловых расчетах концептуальные предположения о возможности поддержания максимальной температуры на базе воздушной и жидкостной ВМТС на требуемом уровне.

Дальнейшая работа будет сосредоточена на уточнении расчетной модели, в частности на более точном задании граничных условий и комплексной оптимизации ВМТС, включающей анализ течений ОЖ в различных конфигурациях модулей и снижении паразитных энергетических затрат, необходимых для циркуляции ОЖ.

Список источников

1. Rendón M.A., Sánchez C.D.R., Gallo M.J., et al. Aircraft Hybrid-Electric Propulsion: Development Trends, Challenges and Opportunities // Journal of Control, Automation and Electrical Systems. 2021. Vol. 32, pp. 1244–1268. DOI: 10.1007/s40313-021-00740-x
2. Riboldi C.E.D. Energy-optimal off-design power management for hybrid-electric aircraft // Aerospace Science and Technology. 2019. Vol. 101. No. 95: 105833. DOI: 10.1016/j.ast.2020.105833
3. Epstein A.H. Aeropropulsion: Advances, opportunities, and challenges // The Bridge. 2020. Vol. 50. No. 2, pp. 8–14. URL: <https://www.nae.edu/234398/Summer-Bridge-Issue-on-Aeronautics>
4. Bertram O., Jäger F., Voth V., et al. UAM Vehicle Design with Emphasis on Electric Powertrain Architectures // AIAA SciTech 2022 Forum (January 3–7, 2022; San Diego, CA & Virtual). DOI: 10.2514/6.2022-1995
5. Едигарев А.Д., Тетерин Р.О., Шемет М.В. Экспериментальное исследование баланса энергетических потоков в гибридной силовой установке последовательного типа // Вестник РГАТ им. П.А. Соловьева. 2023. № 2(65). С. 36–42.

6. Варюхин А.Н., Захарченко В.С., Власов А.В. и др. Оценка эффективности различных типов силовых установок 9-местного самолета местных воздушных линий // Авиационные двигатели. 2025. № 1(26). С. 83–100.
7. Бондаренко Д.А., Равикович Ю.А. Обоснование применимости гибридных силовых установок на летательных аппаратах различного типа и назначения // Вестник Московского авиационного института. 2023. Т. 30. № 2. С. 148–157. DOI: 10.34759/vst-2023-2-148-157
8. Birkel C.R., Roberts J.B., McTurk E., et al. Degradation diagnostics for lithium ion cells // Journal of Power Sources. 2017. Vol. 341, pp. 373–386. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2016.12.011
9. Bandhauer T.M., Garimella S., Fuller T.F. A critical review of thermal issues in lithium-ion batteries // Journal of The Electrochemical Society. 2011. Vol. 158. No. 3. DOI: 10.1149/1.3515880
10. Lu L., Han X., Li J., et al. A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles // Journal of Power Sources. 2013. Vol. 226. No. 3, pp. 272–288. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2012.10.060
11. Leng F., Tan C.M., Pecht M. Effect of temperature on the aging rate of Li ion battery operating above room temperature // Scientific Reports. 2015. Vol. 5. No. 1: 12967. DOI: 10.1038/srep12967
12. Pesaran A., Santhanagopalan S., Kim G. Addressing the impact of temperature extremes on large format Li-Ion batteries for vehicle applications // 30th International Battery Seminar (11–14 March 2013; Ft. Lauderdale, Florida).
13. 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. No. 6, pp. 653–660. DOI: 10.1016/j.pnsc.2018.11.002
14. Liu G., Ouyang M., Lu L., et al. Analysis of the heat generation of lithium-ion battery during charging and discharging considering different influencing factors // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2014. Vol. 116. No. 2, pp. 1001–1010. DOI: 10.1007/s10973-013-3599-9
15. Smith K., Saxon A., Keyser M., et al. Life prediction model for grid-connected Li-ion battery energy storage system // American Control Conference (24–26 May 2017; Seattle, WA, USA). DOI: 10.23919/ACC.2017.7963578
16. Spielbauer M., Steinhardt M., Singer J., et al. Influence of breathing and swelling on the jelly-roll case gap of cylindrical lithium-ion battery cells // Batteries. 2023. Vol. 9. No. 1. DOI: 10.3390/batteries9010006
17. Харламенков А.С. Системы защиты ячеек и батарейных блоков с литий-ионными аккумуляторами. Часть 1 // Пожаровзрывобезопасность. 2022. Т. 31. № 4. С. 76–79.
18. Jilte R., Kumar R., Ma L. Thermal performance of a novel lithium-ion battery module with restricted flow // Applied Thermal Engineering. 2019. Vol. 146. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.09.099
19. Deng Y., Feng C., Jiaqiang E., et al. Effects of different coolants and cooling strategies on the cooling performance of the power lithium ion battery system: A review // Applied Thermal Engineering. 2018. Vol. 142, pp. 10–29. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.06.043
20. Bai F., Chen M., Song W., et al. Thermal management performances of PCM/water cooling-plate using for lithium-ion battery module based on non-uniform internal heat source // Applied Thermal Engineering. 2017. Vol. 126, pp. 17–27. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.07.141
21. Tran T., Harmand S., Desmet B., et al. Experimental investigation on the feasibility of heat pipe cooling for HEV/ EV lithium-ion battery // Applied Thermal Engineering. 2014. Vol. 63. No. 2, pp. 551–558. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2013.11.048
22. Hwang F.S., Confrey T., Reidy C., et al. Review of battery thermal management systems in electric vehicles // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2024. Vol. 192. No. 2: 114171. DOI: 10.1016/j.rser.2023.114171
23. Roe C., Feng X., White G., et al. Immersion cooling for lithium-ion batteries – A review // Journal of Power Sources. 2022. Vol. 525. No. 2: 231094. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2022.231094
24. Sabbah R., Kizilel R., Selman J.R., et al. Active (air-cooled) vs. passive (phase change material) thermal management of high power lithium-ion packs: limitation of temperature rise and uniformity of temperature distribution // Journal of Power Sources. 2008. Vol. 182. No. 2, pp. 630–638. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2008.03.082
25. Sundin D.W., Sponholtz S. Thermal management of Li-ion batteries with single-phase liquid immersion cooling // IEEE Open Journal of Vehicular Technology. 2020. Vol. 1, pp. 82–92. DOI: 10.1109/OJVT.2020.2972541
26. Garud K.S., Tai L.D., Hwang S.-G., et al. A review of advanced cooling strategies for battery thermal management systems in electric vehicles // Symmetry. 2023. Vol. 15. No. 7: 1322. DOI: 10.3390/sym15071322
27. Edmondson J., Wang Y. Thermal Management for Electric Vehicles 2025–2035: Materials, Markets, and Technologies. 2025. URL: <https://www.idtechex.com/en/research-report/thermal-management-for-electric-vehicles-2025-2035-materials-markets-and-technologies/1015>

References

1. Rendón MA, Sánchez CDR, Gallo MJ, et al. Aircraft Hybrid-Electric Propulsion: Development Trends, Challenges and Opportunities. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*. 2021;32:1244–1268. DOI: 10.1007/s40313-021-00740-x
2. Riboldi CED. Energy-optimal off-design power management for hybrid-electric aircraft. *Aerospace Science and Technology*. 2019;101(95):105833. DOI: 10.1016/j.ast.2020.105833
3. Epstein AH. Aeropropulsion: Advances, opportunities, and challenges. *The Bridge*. 2020;50(2):8–14. URL: <https://www.nae.edu/234398/Summer-Bridge-Issue-on-Aeronautics>
4. Bertram O, Jäger F, Voth V, et al. UAM Vehicle Design with Emphasis on Electric Powertrain Architectures. *AIAA SciTech 2022 Forum (January 3–7, 2022; San Diego, CA & Virtual)*. DOI: 10.2514/6.2022-1995
5. Edigarev AD, Teterin RO, Shemet MV. Experimental study of the balance of energy flows in a serial hybrid propulsion system. *Vestnik RGATA im. P.A. Solov'eva*. 2023(2):36–42. (In Russ.).
6. Varyukhin AN, Zakharchenko VS, Vlasov AV, et al. Efficiency analysis of different types of propulsion systems for 9-pax commuter aircraft. *Aviatsionnye dvigateli*. 2025(1):83–100. (In Russ.).
7. Bondarenko DA, Ravikovich YuA. Hybrid power plants applicability substantiation on various types and purpose aircraft. *Aerospace MAI Journal*. 2023;30(2):148–157. (In Russ.). DOI: 10.34759/vst-2023-2-148-157
8. Birkel CR, Roberts JB, McTurk E, et al. Degradation diagnostics for lithium ion cells. *Journal of Power Sources*. 2017;341:373–386. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2016.12.011
9. Bandhauer TM, Garimella S, Fuller TF. A critical review of thermal issues in lithium-ion batteries. *Journal of The Electrochemical Society*. 2011;158(3). DOI: 10.1149/1.3515880
10. Lu L, Han X, Li J, et al. A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles. *Journal of Power Sources*. 2013;226(3):272–288. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2012.10.060
11. Leng F, Tan CM, Pecht M. Effect of temperature on the aging rate of Li ion battery operating above room temperature. *Scientific Reports*. 2015;5(1):12967. DOI: 10.1038/srep12967
12. Pesaran A, Santhanagopalan S, Kim G. Addressing the impact of temperature extremes on large format Li-Ion batteries for vehicle applications. *30th International Battery Seminar (March 11–14, 2013; Ft. Lauderdale, Florida)*.
13. 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(6):653–660. DOI: 10.1016/j.pnsc.2018.11.002
14. Liu G, Ouyang M, Lu L, et al. Analysis of the heat generation of lithium-ion battery during charging and discharging considering different influencing factors. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2014;116(2):1001–1010. DOI: 10.1007/s10973-013-3599-9
15. Smith K, Saxon A, Keyser M, et al. Life prediction model for grid-connected Li-ion battery energy storage system. *American Control Conference (May 24–26, 2017; Seattle, WA, USA)*. DOI: 10.23919/ACC.2017.7963578
16. Spielbauer M, Steinhardt M, Singer J, et al. Influence of breathing and swelling on the jelly-roll case gap of cylindrical lithium-ion battery cells. *Batteries*. 2023;9(1). DOI: 10.3390/batteries9010006
17. Kharlamenkov AS. Systems for protecting cells and batteries with lithium-ion batteries. Part 1. *Pozharovzryvbezopasnost / Fire and Explosion Safety*. 2022;31(4):76–79. (In Russ.).
18. Jilte R, Kumar R, Ma L. Thermal performance of a novel lithium-ion battery module with restricted flow. *Applied Thermal Engineering*. 2019;146. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.09.099
19. Deng Y, Feng C, Jiaqiang E, et al. Effects of different coolants and cooling strategies on the cooling performance of the power lithium ion battery system: A review. *Applied Thermal Engineering*. 2018;142:10–29. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.06.043
20. Bai F, Chen M, Song W, et al. Thermal management performances of PCM/water cooling-plate using for lithium-ion battery module based on non-uniform internal heat source. *Applied Thermal Engineering*. 2017;126:17–27. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.07.141
21. Tran T, Harmand S, Desmet B, et al. Experimental investigation on the feasibility of heat pipe cooling for HEV/EV lithium-ion battery. *Applied Thermal Engineering*. 2014;63(2):551–558. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2013.11.048
22. Hwang FS, Confrey T, Reidy C, et al. Review of battery thermal management systems in electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2024;192(2):114171. DOI: 10.1016/j.rser.2023.114171
23. Roe C, Feng X, White G, et al. Immersion cooling for lithium-ion batteries – A review. *Journal of Power Sources*. 2022;525(2):231094. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2022.231094
24. Sabbah R, Kizilel R, Selman JR, et al. Active (air-cooled) vs. passive (phase change material) thermal management of high power lithium-ion packs: limitation of temperature rise and uniformity of temperature distribution. *Journal of Power Sources*. 2008;182(2):630–638. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2008.03.082
25. Sundin DW, Sponholtz S. Thermal management of Li-ion batteries with single-phase liquid immersion cooling. *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*. 2020;1:82–92. DOI: 10.1109/OJVT.2020.2972541
26. Garud KS, Tai LD, Hwang S-G, et al. A review of advanced cooling strategies for battery thermal management systems in electric vehicles. *Symmetry*. 2023;15(7):1322. DOI: 10.3390/sym15071322
27. Edmondson J, Wang Y. Thermal Management for Electric Vehicles 2025–2035: Materials, Markets, and Technologies. 2025. URL: <https://www.idtechex.com/en/research-report/thermal-management-for-electric-vehicles-2025-2035-materials-markets-and-technologies/1015>

Статья поступила в редакцию / Received 04.07.2025
 Одобрена после рецензирования / Revised 05.11.2025
 Принята к публикации / Accepted 05.11.2025