

# НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

## NEW TECHNOLOGICAL PROCESSES AND EQUIPMENT

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)  
УДК 658.562  
DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-2-176-187



### РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ПОДОГРЕВОМ БАТАРЕИ МАЛОГО БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С ПРИМЕНЕНИЕМ СВЕТОДИОДНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАДАННОГО КАЧЕСТВА ПОЛЕТА

Кузьменко В.П.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

**Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы).** Современные малые беспилотные летательные аппараты предъявляют высокие требования к качеству их работы, особенно в экстремальных условиях эксплуатации. Одним из ключевых факторов, влияющих на надежность и долговечность таких летательных аппаратов, является поддержание стабильных тепловых режимов аккумуляторов в условиях низких температур. Оптимизация теплового управления становится необходимой для обеспечения заданных характеристик полета аппарата и повышения эффективности его системы электропитания. Для обеспечения стабильного качества функционирования системы электропитания малого беспилотного летательного аппарата в таких условиях требуется разработка инновационных подходов к управлению тепловыми процессами. Использование светодиодных осветительных приборов за счет их существенного тепловыделения может стать необычным комбинированным источником не только света, но и тепла для данных авиационных систем, что, в свою очередь, открывает новые перспективы для разработки моделей теплового менеджмента, которые могут обеспечить дополнительное поддержание достаточной для нормальной работы аккумуляторной батареи температуры. **Цель работы.** Разработка модели управления подогревом батареи малого беспилотного летательного аппарата с применением светодиодных систем, направленной на поддержание оптимальных рабочих температур аккумуляторов и повышение надежности и качества полетов в низкотемпературных условиях (до -15°C). **Используемые методы.** В рамках данного исследования использован комплексный подход, включающий численное моделирование тепловых процессов на основе дифференциальных уравнений теплопередачи, а также экспериментальные исследования, направленные на оценку эффективности предложенной модели в реальных условиях эксплуатации. Моделирование проводилось с использованием языков программирования Python и MATLAB, что обеспечило высокую точность и адаптивность расчетов. Для симуляции работы системы использованы данные о динамике температурных изменений, характеристиках аккумуляторов и светодиодных источников света. Применены методы оптимального моделирования тепловых процессов, а также анализ соответствия разработанной модели требованиям качества и стандартам эксплуатации в заданных температурных условиях. **Новизна.** Впервые предложена интеграция светодиодных систем в качестве активного элемента теплового менеджмента для беспилотных летательных аппаратов, позволяющая не только обеспечивать освещение, но и выполнять функции обогрева аккумуляторов в экстремальных температурных условиях. Разработанная математическая модель учитывает основные параметры, влияющие на теплопередачу и работу системы, такие как теплоемкость материалов, коэффициенты теплопроводности, конвекции и излучения. Особое внимание уделено моделированию взаимодействия тепловых потоков внутри источника питания малого беспилотного летательного аппарата и учету аэродинамических воздействий на его корпус, что способствует поддержанию необходимого качества полета в экстремальных температурных условиях. **Результат.** Проведенное моделирование и экспериментальные исследования показали, что использование светодиодов для поддержания оптимальной температуры аккумуляторов приводит к значительному увеличению времени их работы. **Практическая значимость.** Применение предложенной модели и стратегии позволяет значительно улучшить эксплуатационные характеристики малых беспилотных авиационных систем, повысить их надежность и эффективность работы в холодных климатических условиях. Разработанная модель может быть внедрена в практику конструирования и эксплуатации малых беспилотных летательных аппаратов, что позволит улучшить качество полетов и эффективность использования данных устройств, расширит область их применения в умеренно холодных климатических условиях.

**Ключевые слова:** тепловой менеджмент, малые беспилотные летательные аппараты, малые беспилотные авиационные системы, управление качеством полета, подогрев источника питания, светодиодные источники света, энергоэффективность, оптимизация работы, управление качеством

© Кузьменко В.П., 2025

#### Для цитирования

Кузьменко В.П. Разработка модели управления подогревом батареи малого беспилотного летательного аппарата с применением светодиодных систем для обеспечения заданного качества полета // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №2. С. 176-187. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-176-187>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

# DEVELOPMENT OF A BATTERY HEATING CONTROL MODEL FOR A SMALL UNMANNED AERIAL VEHICLE USING LED SYSTEMS TO ENSURE THE SPECIFIED FLIGHT QUALITY

Kuzmenko V.P.

St. Petersburg State University University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia

**Abstract. Problem Statement (Relevance).** Modern small unmanned aerial vehicles impose high demands on their performance quality, especially in extreme operating conditions. One of the key factors affecting the reliability and longevity of such vehicles is maintaining stable thermal conditions for the batteries in low-temperature environments. Optimizing thermal management becomes necessary to ensure the specified flight characteristics and improve the efficiency of the vehicle's power supply system. To maintain stable power system performance for small unmanned aerial vehicles under such conditions, the development of innovative approaches to thermal management is required. The use of LED lighting devices, due to their significant heat generation, can serve as an unconventional combined source of both light and heat for these aerial systems. This opens new prospects for the development of thermal management models that can provide additional support in maintaining the battery temperature at levels sufficient for normal operation. **Objectives.** The goal of this work is to develop a battery heating management model for small unmanned aerial vehicles using LED systems, aimed at maintaining optimal operating temperatures for the batteries and improving the reliability and quality of flights in low-temperature conditions (down to -15 degrees Celsius). **Methods Applied.** This study utilizes a comprehensive approach that includes numerical modeling of thermal processes based on differential heat transfer equations, as well as experimental research aimed at evaluating the efficiency of the proposed model in real-world operating conditions. The modeling was conducted using Python and MATLAB programming languages, ensuring high accuracy and adaptability of the calculations. The simulation of the system's operation was based on data concerning the dynamics of temperature changes, battery characteristics, and LED light sources. Methods of optimal thermal process modeling were applied, along with an analysis of the compliance of the developed model with quality and operational standards under the specified temperature conditions. **Originality.** For the first time, the integration of LED systems as an active element of thermal management for small unmanned aerial vehicles is proposed, enabling not only illumination but also battery heating in extreme temperature conditions. The developed mathematical model takes into account the main parameters affecting heat transfer and system performance, such as material heat capacity, thermal conductivity coefficients, convection, and radiation. Special attention is given to modeling the interaction of thermal flows within the power source of small unmanned aerial vehicles and accounting for aerodynamic effects on its body, which helps maintain the required flight quality under extreme temperature conditions. **Result.** The conducted modeling and experimental studies showed that using LEDs to maintain optimal battery temperatures leads to a significant increase in battery life. **Practical Relevance.** The application of the proposed model and strategy significantly improves the operational characteristics of small UAVs, enhancing their reliability and efficiency in cold climatic conditions. The developed model can be integrated into the design and operation of small UAVs, improving flight quality and the effective use of these devices, thereby expanding their applicability in moderately cold climatic regions.

**Keywords:** thermal management, small unmanned aerial vehicles, small unmanned aerial systems, flight quality management, power source heating, LED light sources, energy efficiency, performance optimization, quality management

## For citation

**Kuzmenko V.P.** Development of a Battery Heating Control Model for a Small Unmanned Aerial Vehicle Using Led Systems to Ensure the Specified Flight Quality. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 2, pp. 176-187. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-176-187>

## Введение

Расширение областей применения малых беспилотных летательных аппаратов (БЛА) в различных климатических условиях, включая регионы с низкими температурами до -30°C, ставит перед разработчиками задачу обеспечения стабильного качества полета в таких экстремальных условиях. Низкие температуры негативно влияют на характеристики литий-ионных аккумуляторов, снижая их емкость и мощность, что может привести к сокращению времени полета и снижению надежности работы БЛА. Одним из перспективных решений

данной проблемы является использование светодиодных систем не только для освещения, но и в качестве источников тепла для подогрева аккумуляторных батарей. Светодиоды обладают высокой энергоэффективностью и способностью выделять достаточное количество тепла при работе, что позволяет эффективно использовать их для поддержания оптимальной температуры аккумуляторов.

Целью данной работы является разработка модели управления подогревом батареи малого беспилотного летательного аппарата с применением светодиодных систем для обеспечения заданного качества полета.

Предложенная модель позволит поддерживать оптимальный температурный режим аккумуляторной батареи, обеспечивая стабильную работу БЛА и повышение его эксплуатационных характеристик в условиях низких температур. Светодиоды (светоизлучающие диоды) являются полупроводниковыми устройствами, которые преобразуют электрическую энергию непосредственно в свет. Они обладают высокой энергоэффективностью, долгим сроком службы и устойчивостью к вибрациям и ударам, что делает их идеальными для использования в беспилотных авиационных средствах [1]. Светодиоды применяются в БЛА для различных задач, включая навигационное освещение, сигнальные системы и задачи, связанные с изображениями и видеонаблюдением. Благодаря их малому весу и низкому энергопотреблению, они особенно привлекательны для применения в БЛА, где каждый грамм и каждый ватт имеют значение [2].

Последние исследования в области материаловедения и светотехнических технологий привели к созданию светодиодов с более высоким световым потоком и пониженным энергопотреблением, что способствует повышению эффективности и увеличению времени работы малых БЛА при использовании данных систем в качестве систем освещения или поисковых прожекторов [3]. Кроме того, разработка интеллектуальных систем управления освещением позволяет оптимизировать использование света в зависимости от условий окружающей среды и потребностей миссии [4]. Однако в условиях низких температур эксплуатация светодиодов и аккумуляторных батарей сталкивается с рядом проблем, связанных с терморегулированием и поддержанием оптимальных рабочих параметров. При этом одной из ключевых проблем является терморегулирование светодиодов, что важно для поддержания их эффективности и долговечности [5]. Также существует потребность в дальнейшем снижении энергопотребления светодиодных систем при их использовании на малых БЛА для увеличения времени полета [6]. В итоге терморегулирование аккумуляторных батарей и светодиодных систем является критически важным для обеспечения стабильной работы БЛА и достижения заданного качества полета.

Светодиодные технологии позволяют использовать данные источники света не только как осветительные приборы, но и как способ передачи информации и сенсорные устройства. Например, светодиоды могут использоваться для передачи данных с помощью технологии видимого света (VLC – Visible Light Communication) [7]. Этот метод позволяет БЛА передавать данные на землю или между собой, используя модулированный свет. Светодиоды могут также функционировать как фотодетекторы, обнаруживая изменения в окружающем освещении. Это свойство можно использовать для сенсорных приложений, например для обнаружения препятствий или навигации. Интеграция светодиодов и фотодетекторов в БЛА позволяет использовать эти устройства для обнаружения изменений в окружающей среде, что может быть полезно в задачах мониторинга и разведки.

Таким образом, интеграция светодиодных источников света с другими бортовыми системами, такими как системы навигации и управления, может повысить об-

щую функциональность и эффективность аппарата. Так, недавно была исследована новая экономически эффективная беспроводная передача данных полевых датчиков на сервер на основе светодиодов [8]. Исследования также ведутся в области использования светодиодов для обеспечения энергоэффективной связи в сетях БЛА, включая оптимизацию развертывания и использование диффузоров для расширения зоны покрытия полета [9].

В целом анализ актуальных исследований по внедрению передовых осветительных технологий в жизненный цикл малых БЛА показывает, что интеграция моделей управления светодиодными системами не только в качестве источников света, но и в качестве источников тепла для подогрева аккумуляторов предоставляет возможность эффективного решения проблемы их терморегуляции. Это способствует повышению качества полета за счет поддержания оптимальных эксплуатационных параметров аккумуляторов в условиях окружающей среды. Такой подход соответствует принципам бережливого производства и способствует повышению эффективности использования энергии и ресурсов системы, а также улучшению эксплуатационных характеристик малых БЛА.

### Материалы и методы исследования

Для обеспечения стабильного качества работы малых БЛА в условиях эксплуатации при низких температурах критически важно контролировать тепловой режим аккумуляторов. Температурные условия эксплуатации малых БЛА в данной работе рассматриваются в диапазоне от -15 до -30°C, что соответствует условиям умеренно холодного климата, характерного для европейской части России и крайнего северо-запада умеренного пояса в пределах Западной Сибири. Поддержание рабочих характеристик аккумуляторов в таких условиях требует применения моделей теплового управления или хотя бы управления подогревом для повышения эффективности системы электропитания и соблюдения стандартов качества.

Одной из задач, связанных с управлением качеством, является обеспечение стабильной работы аккумуляторных батарей при изменении физических свойств атмосферы. Например, плотность воздуха снижается с высотой над уровнем моря, что усложняет управление тепловыми процессами.

Физические свойства атмосферы зависят от плотности воздуха, которая определяется высотой над уровнем моря, атмосферным давлением и температурой окружающей среды. Стандартные атмосферные условия определяются на уровне моря при температуре +15°C и барометрическом давлении 1013,25 гПа. Этот базовый уровень используется для расчета «высоты плотности» в зависимости от преобладающих условий окружающей среды. При повышенных температурах высота плотности увеличивается, в то время как в более прохладных условиях она уменьшается. И наоборот, снижение атмосферного давления приводит к увеличению высоты плотности. На больших высотах плотность подъемная сила, создаваемая роторами БЛА, уменьшается, что может привести к ограничению максимального эксплуатат-

ционного веса до значений, ниже указанных производителем.

На высоте 1500 м над уровнем моря, при температуре окружающей среды +35°C и атмосферном давлении 970 гПа расчетная высота плотности приближается к 3000 м относительно стандартной атмосферы на уровне моря. И наоборот, на высоте 50 м над уровнем моря, при температуре окружающей среды -20°C и атмосферном давлении 1035 гПа полученная высота плотности приблизительно равна 1450 м по отношению к стандартной атмосфере на уровне моря.

Умеренно холодные условия эксплуатации оказывают значительное влияние на качество функционирования малых БЛА, особенно на их аккумуляторные батареи, которые чувствительны к изменению температурных режимов. Для обеспечения стабильных эксплуатационных характеристик, соответствующих требованиям качества, необходимо учитывать следующие ключевые аспекты влияния температуры на работу литий-ионных аккумуляторов [9, 10]:

1) при низких температурах, близких к 0°C, вязкость электролита в литий-ионных аккумуляторах увеличивается, что затрудняет движение ионов лития между анодом и катодом. Это приводит к снижению разрядной емкости батареи и её мощности, что негативно сказывается на времени автономной работы аппарата;

2) понижение температуры повышает внутреннее сопротивление аккумуляторов, что снижает их эффективность и может привести к резкому падению напряжения под нагрузкой. В условиях эксплуатации малых БЛА в температурном диапазоне до -15°C это становится критическим фактором, влияющим на качество полета;

3) в литиевых аккумуляторах химические реакции, происходящие при зарядке и разрядке, замедляются при снижении температуры, что также влияет на их эффективность и срок службы;

4) зарядка литий-ионных аккумуляторов в условиях отрицательных температур может привести к образованию литиевых дендритов, что увеличивает риск короткого замыкания и даже взрыва батареи и требует особого контроля качества и соответствия параметров в процессе эксплуатации;

5) когда теплый воздух внутри малого БЛА встречается с холодными поверхностями (например, корпусом малого БЛА, который охладился во время полета при холодной погоде), влага из теплого воздуха может конденсироваться на этих поверхностях, что, в свою очередь, увеличивает вероятность коррозии и повреждения внутренних компонентов, что снижает надежность работы системы.

Поддержание требуемых температурных условий является необходимым фактором для продления срока службы аккумуляторов и улучшения качества эксплуатации малых БЛА в условиях умеренно холодного климата. Литий-ионные аккумуляторы оптимально хранятся при температуре около 15°C, в прохладной и лишенной влаги среде. Обычно рекомендуется хранить эти батареи в температурном диапазоне от 5 до 20°C, чтобы сохранить их целостность и продлить срок службы [10, 11]. Когда температура опускается ниже 0°C, эффектив-

ность литий-ионных батарей существенно снижается, в первую очередь из-за замедления внутренних химических реакций.

При снижении температуры происходит заметное уменьшение уровня заряда (принятое к обозначению как «SOC» – от англ. state of charge), в частности, падение температуры с 25°C до -15°C приводит к снижению уровня заряда батареи примерно на 23%. Это снижение отражает уменьшение доступной емкости при более низких температурах [12].

При пониженных температурах вязкость электролита батареи увеличивается, что, в свою очередь, снижает его ионную проводимость и увеличивает внутреннее сопротивление батареи. Такое увеличение сопротивления, связанное с вязкостью, негативно сказывается на общей производительности батареи.

Для смягчения негативных эффектов низких температур и повышения качества работы литиевых аккумуляторов используются различные технические решения, такие как предварительный подогрев, применение адаптированных электролитов для работы в умеренно холодных условиях, а также оптимизация систем управления батареями. Эти подходы позволяют улучшить эксплуатационные характеристики малых БЛА и подчеркнуть необходимость дальнейшего развития стандартов в области управления качеством тепловых процессов.

На данный момент стандарты для таких систем не разработаны в полной мере, что требует внедрения новых подходов и регламентов для обеспечения стабильного и предсказуемого качества эксплуатации малых БЛА в условиях умеренно холодного климата. Развитие этих стандартов критично для обеспечения надежности и повышения эффективности работы систем электропитания малых БЛА.

Помимо этого, погодные условия, такие как ветер, дождь и снег, могут повлиять на аэродинамику малого БЛА. Ветер может особенно сильно повлиять на скорость и энергоэффективность малого БЛА, требуя больше энергии для поддержания управляемости и стабильного полета.

Неблагоприятная погода также может повлиять на функциональность датчиков малого БЛА. Например, туман, дождь или снег могут ухудшить видимость камеры и помешать работе инфракрасных датчиков, GPS и других навигационных приборов, что снижает надежность и точность выполнения миссий.

Согласно классификации БЛА, разработанной Ассоциацией «Аэронект» и рабочей группой при Минпромторге России для понимания различных типов и размеров БЛА, а также их потенциальных сценариев применения, светодиодные системы могут быть интегрированы в различные классы БЛА с учетом их теплового менеджмента.

В малых БЛА (обозначаемых «С-Л», «МР-СЛ», «В-Л») светодиоды обычно используются для навигационного освещения и могут выполнять роль индикаторов состояния. Тепловой менеджмент здесь важен из-за меньшего размера, управление тепловыми процессами здесь играет ключевую роль с точки зрения обеспечения исключения взаимного влияния термоактивных узлов

БЛА друг на друга для обеспечения заданной надежности.

В средних и крупных БЛА (обозначаемых «С-С», «МР-С», «В-С», «К-С», «Г-С») светодиоды могут использоваться как для навигационных целей, так и для специальных задач, таких как освещение при посадке или в рамках оборудования для аэроботики. Тепловой менеджмент становится более значимым, особенно для поддержания оптимальной производительности и долговечности светодиодов.

В крупногабаритных БЛА (обозначаемых «В-Т», «МР-Т», «С-Т», «К-Т», «Г-Т») светодиоды могут использоваться в более требовательных и разнообразных сценариях, включая длительные миссии и сложные условия эксплуатации. Здесь тепловой менеджмент критичен для обеспечения надежности и безопасности системы, особенно при работе в экстремальных температурных условиях.

Каждый класс БЛА предъявляет свои требования к светодиодным системам и соответствующему тепловому менеджменту. Понимание этих требований поможет в разработке оптимальных решений для каждого конкретного применения БЛА.

Рассмотрим классификацию источников света для малых БЛА по функциональному признаку с учетом их роли в управлении качеством тепловых процессов:

1. Источники навигационного света. Данные источники расположены преимущественно на поворотных концах БЛА, это могут быть грани, крылья, хвост или нос, эти источники света необходимы для улучшения видимости БЛА. Они имеют решающее значение для определения ориентации и направления движения БЛА. Световой поток и угловая дисперсия этих огней должны быть разработаны для оптимизации видимости в широком диапазоне условий освещения окружающей среды. Световой поток и тепловая отдача таких огней могут быть использованы для оптимизации распределения тепла, что способствует поддержанию качества функционирования аккумуляторных батарей в условиях умеренно холодного климата.

2. Источники посадочного света. Данные источники крепятся к нижней части БЛА и предназначены для излучения концентрированного луча света вниз. Основная функция – освещать посадочную площадку во время операций в условиях недостаточного освещения или в ночное время, тем самым повышая безопасность за счет визуальных подсказок о рельефе местности и препятствиях на пути посадки. Обеспечение дополнительного тепла при посадке в условиях низкой освещенности позволяет повысить надежность работы системы в сложных климатических условиях, что напрямую связано с управлением качеством полета.

3. Специальные источники света. Данные источники света применяются для выполнения конкретных оперативных функций, они могут включать в себя высокointенсивные прожекторные лучи для освещения во время поисковых операций или встроенное освещение в системах видеонаблюдения для улучшения захвата изображения в условиях низкой освещенности. Спектральные характеристики и интенсивность таких источ-

ников света подбираются в соответствии с конкретными оперативными требованиями, например, инфракрасное освещение для тепловидения или усиленное освещение для захвата видео высокой четкости.

4. Источники сенсорного света. Данные источники расположены в непосредственной близости от коммуникационных и сенсорных устройств, таких как антенны и навигационные датчики, эти источники света выполняют вспомогательные функции, которые могут включать подачу сигналов в системах непрямой связи или расширение возможностей датчиков в условиях переменчивой внешней освещенности. Их конфигурация часто специализируется на взаимодействии с конкретными сенсорными технологиями, возможно, с различными длинами волн и схемами модуляции для передачи данных или улучшения работы датчиков. Это способствует повышению общей эффективности и повышению качества полета малых БЛА.

Разработка систем управления теплом должна учитывать широкий диапазон внешних температурных условий, в которых могут эксплуатироваться малые БЛА. Эти условия влияют на стабильность работы ключевых компонентов и, следовательно, на общее качество выполнения миссий БЛА. Модель должна описывать интеграцию светодиодных систем с другими бортовыми элементами с учетом обеспечения оптимального теплового баланса системы и, следовательно, качества и эффективности полета.

Формулировка модели и допущения:

1. Малый БЛА роторного типа (дрон или квадрокоптер) оснащен светодиодным прожектором, который генерирует определенное количество тепла, а его система управления и регуляторы, а также периферийное оборудование (поисковый светодиодный прожектор, камера, датчики) преобразуют электрическую энергию в механическую или световую, вызывая нагрев; аккумуляторы выделяют тепло при разряде из-за внутреннего сопротивления.

2. Аккумулятор и светодиодный прожектор достаточно термически связаны, чтобы обеспечить передачу тепла без существенного воздействия на другие компоненты.

3. Окружающая температура переменна и может опускаться ниже оптимальной рабочей температуры аккумулятора.

4. Теплопотери в окружающую среду в основном происходят за счет конвекции и излучения.

5. Эффективность аккумулятора и светодиодного света с точки зрения потребления энергии и выделения тепла известна.

6. Оптимальный диапазон рабочих температур для аккумулятора установлен в пределах от 5 до 20°C, и задача системы заключается в поддержании температуры аккумулятора в этих границах.

7. Решение о включении светодиодного прожектора принимается на основе анализа, сравнивающего энергопотребление для обогрева и потенциальные потери производительности из-за низкой температуры.

8. Модель включает алгоритм управления, который определяет режим работы на основе температур-

ных датчиков, связанных с аккумулятором и окружающей средой.

9. Предполагается, что в данной системе БЛА быстрые динамические изменения тепловых процессов не критичны, таким образом система достигает стационарного теплового состояния, где тепловые потоки постоянны во времени ( $dQ/dt = 0$ ).

10. Для того чтобы исключить сложные вычисления неоднородности теплопроводности, предполагается постоянство теплопроводности  $k$  и излучательной способности  $\varepsilon$  материалов ( $\nabla k = 0$  и  $\nabla \varepsilon = 0$ ).

11. Для упрощения дифференциальных уравнений предполагается линейная зависимость между тепловым потоком, обусловленным теплопроводностью, и градиентом температуры, то есть  $Q_{\text{конд}} \propto dT/dx$ .

12. Предполагается, что тепловые градиенты внутри компонентов незначительны или их влияние на общий тепловой баланс минимально ( $\nabla T_{\text{комп}} \approx 0$ ).

13. Алгоритм управления основан на данных с температурных датчиков, которые регистрируют как внутреннюю температуру аккумулятора, так и внешние условия эксплуатации. Решение о включении или выключении системы подогрева принимается на основе анализа энергопотребления и потерь от разряда аккумулятора в условиях пониженных температур.

14. Система управления решает задачу оптимизации, при которой выбирается один из двух режимов: а) режим подогрева аккумулятора активируется, если затраты на подогрев  $P_{\text{подогрев}}$  меньше, чем потери энергии от разряда аккумулятора при низких температурах  $P_{\text{разряд}}$ . Подогрев продолжается до достижения целевой температуры  $T_{\text{цел}}$ ; б) режим минимального потребления активируется, если расходы на подогрев выше  $P_{\text{разряд}}$ , система переводится в режим минимального освещения или выключения светодиодов для экономии энергии.

15. Для каждого временного шага  $t$  система вычисляется как

$$P_{\text{подогрев}}(t) = k_p \cdot (T_{\text{целевая}} - T_{\text{акб}}(t)); \quad (1)$$

$$P_{\text{разряд}}(t) = k_d \cdot (T_{\text{окр}} - T_{\text{акб}}(t)), \quad (2)$$

где  $P_{\text{подогрев}}(t)$  – мощность подогрева;

$P_{\text{разряд}}(t)$  – потери емкости батареи при низких температурах;

$T_{\text{целевая}}$  – целевая температура аккумулятора,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$T_{\text{акб}}(t)$  – текущая температура аккумулятора в момент времени  $t$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$T_{\text{окр}}$  – температура окружающей среды,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$k_p$  – коэффициент подогрева, зависящий от характеристик аккумулятора, светодиодов и эффективности теплопередачи в системе;

$k_d$  – коэффициент разряда, зависящий от характеристик аккумулятора и влияния температуры окружающей среды на скорость разряда.

16. Система должна учитывать критическую температуру  $T_{\text{крит}}$ , ниже которой даже максимальные затраты на подогрев не смогут поднять температуру аккумулятора до целевого уровня. Этот порог определяется возможностями системы подогрева, её мощностью и потерями тепла.

Эффективность светодиодов ограничена физическими законами и технологическими ограничениями их производства. Тепловыделение в светодиодах критично для их работы, так как избыточное тепло может уменьшить эффективность и сократить срок службы.

Тепловыделение светодиода можно выразить через его электрическую мощность и эффективность преобразования, учитывая также коэффициенты, описывающие режим работы и интенсивность света:

$$Q_{\text{led}} = P_{\text{in}} \cdot (1 - \eta) \cdot M_{\text{реж}} \cdot I_{\text{led}}, \quad (3)$$

где  $Q_{\text{led}}$  – тепловыделение светодиода, Вт;

$P_{\text{in}}$  – электрическая мощность, подаваемая на светодиод, Вт;

$\eta$  – эффективность преобразования электрической энергии в свет, которая может варьироваться в зависимости от типа и качества светодиода, безразмерная величина;  $M_{\text{реж}}$  – коэффициент, описывающий режим работы светодиода (например, для постоянного режима работы при полной яркости  $M_{\text{реж}} = 1$ ,  $I_{\text{led}} = 1$ ; для мигающего режима с половиной времени активности и полной яркости  $M_{\text{реж}} = 0,5$ ,  $I_{\text{led}} = 1$ ; для постоянного режима с уменьшенной яркостью (например, 50%)  $M_{\text{реж}} = 1$ ,  $I_{\text{led}} = 0,5$ ), безразмерная величина;  $I_{\text{led}}$  – коэффициент, отражающий интенсивность света (от 0 до 1, где 1 соответствует максимальной яркости, а меньшие значения соответствуют уменьшенной яркости и, соответственно, меньшему тепловыделению), безразмерная величина.

Уравнение теплопроводности будет иметь вид

$$Q_{\text{конд}} = -k \cdot A \cdot dT/dx, \quad (4)$$

где  $Q_{\text{конд}}$  – теплопередача через материал, Вт;

$k$  – теплопроводность материала в зависимости от температуры  $T$ , Вт/м·К;

$A$  – площадь поперечного сечения, м<sup>2</sup>;

$dT/dx$  – температурный градиент, К/м.

Тогда уравнение конвекции будет иметь вид:

$$Q_{\text{конв}} = h_{(v, T_{\text{окр}}, RH)} \cdot A \cdot (T_{\text{пов}} - T_{\text{окр}}); \quad (5)$$

$$h_{(v, T_{\text{окр}}, \phi)} = N_u \cdot k_{\text{возд}(T_{\text{окр}})} / L; \quad (6)$$

$$N_u = C \cdot R_e^{n1} \cdot P_r^{n2}, \quad (7)$$

где  $Q_{\text{конв}}$  – конвективный теплообмен, Вт;

$h_{(v, T_{\text{окр}}, \phi)}$  – коэффициент конвективной теплоотдачи, зависящий от скорости воздушного потока  $v$ , температуры окружающей среды  $T_{\text{окр}}$  и относительной влажности  $\phi$ , Вт/м·К;

$T_{\text{пов}}$  и  $T_{\text{окр}}$  – температуры поверхности светодиода и окружающей среды соответственно, К;

$k_{\text{возд}(T_{\text{окр}})}$  – теплопроводность воздуха при температуре окружающей среды, К;

$n_1$  и  $n_2$  в уравнении для числа Нуссельта  $N_u$  являются эмпирическими экспонентами, которые определяют, как изменение чисел Рейнольдса  $R_e$  и Прандтля  $P_r$  влияет на конвективный теплообмен. Эти коэффициенты могут меняться в зависимости от геометрии системы, режима потока (ламинарный или турбулентный) и других факторов. Для ламинарного потока около объекта  $n_1$  часто принимается равным 0,5, а  $n_2$  – равным 0,33, что соответствует классической зависимости  $N_u \propto R_e^{1/2} P_r^{1/3}$ ; для

турбулентного потока, значения  $n_1$  и  $n_2$  могут быть различными, например,  $n_1 = 0,8$  и  $n_2 = 0,4$ , отражая большее влияние турбулентности на теплообмен;

$L$  – характеристическая длина, то есть измерение объекта, которое имеет наибольшее влияние на конвективный теплообмен, м;

$C$  – предварительный множитель, который определяется эмпирически и может варьироваться в зависимости от конкретных условий и геометрии системы, безразмерная величина;

$N_u$  – число Нуссельта, для БЛА его значение может быть выше, чем для стационарных условий, из-за усиленной конвекции, вызванной движением, оно будет зависеть от конкретной геометрии БЛА и характеристик потока воздуха вокруг него, безразмерная величина;

$R_e$  – число Рейнольдса, в полете для БЛА может быть высоким из-за больших скоростей и размеров, что указывает на турбулентный режим потока, его значение будет зависеть от скорости полета, размеров БЛА и свойств окружающего воздуха, безразмерная величина,

$$R_e = v \cdot L / \mu, \quad (8)$$

где  $\mu$  – кинематическая вязкость воздуха,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$P_r$  – число Прандтля, для воздуха при нормальных условиях  $P_r$  остается около 0,7, но это значение может изменяться в зависимости от температуры и давления воздуха, особенно на больших высотах, безразмерная величина;

$v$  – скорость воздушного потока, для БЛА будет варьироваться в широком диапазоне в зависимости от скорости полета, может изменяться от низких значений при взлете и посадке до очень высоких при полете на максимальной скорости, м/с;

$\varphi$  – относительная влажность, в зависимости от погодных условий и высоты полета, относительная влажность окружающего воздуха может значительно варьироваться, важно учитывать, что на больших высотах воздух становится суще, %.

Температура окружающей среды изменяется с высотой по градиенту:

$$T_{\text{окр}}(H) = T_{\text{окр}}(0) - \gamma \cdot H, \quad (9)$$

где  $\gamma$  – температурный градиент (обычно около  $6,5^{\circ}\text{C}$  на 1000 м),  $\text{К}/\text{м}$ ;

$H$  – высота полета, м.

Радиационный теплообмен представляет собой передачу тепла путем теплового излучения. В таком случае уравнение радиационного теплообмена будет иметь вид

$$Q_{\text{рад}} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_{\text{пов}}^4 - T_{\text{окр}}^4), \quad (10)$$

где  $Q_{\text{рад}}$  – количество тепла, передаваемое излучением,  $\text{Вт}$ ;

$\varepsilon$  – излучательная способность материала, безразмерная величина;

$\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана,  $\sigma \approx 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ .

Уравнение взаимодействия с другими компонентами системы будет иметь вид:

$$Q_{\text{взаимодействия}} = \sum_i k_i \cdot A_i \cdot (T_{\text{led}} - T_{\text{компоненты}_i}), \quad (11)$$

где  $Q_{\text{взаимодействия}}$  – тепловой поток, возникающий в результате этого взаимодействия,  $\text{Вт}$ ;

$k_i$  – коэффициент теплопроводности между светодиодами и компонентом  $i$ ,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;

$A_i$  – площадь контакта,  $\text{м}^2$ ;

$T_{\text{компоненты}_i}$  – температура компонента  $i$ , К.

Для учета аэродинамического воздействия необходимо учесть составляющую изменения теплового потока в зависимости от скорости полета и изменений аэродинамического сопротивления:

$$Q_{\text{аэро}} = h_{\text{аэро}}(v, T_{\text{окр}}) \cdot A_{\text{пов\_малого БЛА}} \cdot (T_{\text{пов\_малого БЛА}} - T_{\text{окр}}), \quad (12)$$

где  $Q_{\text{аэро}}$  – тепловой поток, вызванный аэродинамическим воздействием,  $\text{Вт}$ ;

$h_{\text{аэро}}(v, T_{\text{окр}})$  – аэродинамический коэффициент теплопередачи,  $[\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})]$ ;

$A_{\text{пов\_малого БЛА}}$  – площадь поверхности малого БЛА,  $\text{м}^2$ ;

$T_{\text{пов\_малого БЛА}}$  – температура поверхности малого БЛА, К.

Для учета нестационарных эффектов теплопередачи необходимо определить зависимость изменения теплового потока от времени:

$$Q_{\text{динамич}} = C_{\text{динамич}} \cdot dT_{\text{пов}}/dt, \quad (13)$$

где  $Q_{\text{динамич}}$  – тепловой поток, вызванный динамическими изменениями,  $\text{Вт}$ ;

$C_{\text{динамич}}$  – теплоемкость системы,  $\text{Дж}/\text{К}$ ;

$dT_{\text{пов}}/dt$  – скорость изменения температуры поверхности компонентов, которые участвуют в тепловом обмене с окружающей средой,  $\text{К}/\text{с}$ .

Теплопроводность материалов корпуса батареи малого БЛА:

$$Q_{\text{корпус}} = -k_{\text{корпус}} \cdot A_{\text{корпус}} \cdot dT_{\text{корпус}}/dx, \quad (14)$$

где  $Q_{\text{корпус}}$  – теплопередача через материал корпуса,  $\text{Вт}$ ;

$k_{\text{корпус}}$  – теплопроводность материала корпуса,  $[\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})]$ ;

$A_{\text{корпус}}$  – площадь поперечного сечения корпуса,  $\text{м}^2$ ;

$dT_{\text{корпус}}/dx$  – температурный градиент в корпусе,  $\text{К}/\text{м}$ .

Для каждого элемента можно определить тепловой вклад следующим образом:

$$Q_{\text{сум}} = \sum_i Q_i, \quad (15)$$

где  $Q_i$  – тепловой вклад отдельного элемента,  $\text{Вт} \cdot \text{с}$ .

$$Q_i = P_i \cdot t, \quad (16)$$

где  $P_i$  – потребляемая мощность элемента,  $\text{Вт}$ ;

$t$  – время работы, с.

Коэффициент конвективной теплоотдачи:

$$h_{\text{конв}}(v, T_{\text{окр}}) = C_p \cdot v^n \cdot f(T_{\text{окр}}), \quad (17)$$

где  $C_p$  – эмпирический коэффициент, зависящий от формы и размера малого БЛА,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;

$n$  – степень зависимости коэффициента конвективной теплоотдачи от скорости воздушного потока, безразмерная величина,  $C_p$  и  $n$  будут зависеть от формы, размера малого БЛА и расположения элементов, которые нужно охладить;

$f(T_{\text{окр}})$  – функция, учитывающая изменение свойств воздуха (плотность, вязкость) с температурой окружающей среды.

Дополнительный нагрев от светодиодов

$$Q_{led} = I_{led} \cdot (1 - \eta) \cdot P_{in}, \quad (18)$$

где  $Q_{led}$  – тепловыделение светодиода, Вт;  $I_{led}$  – интенсивность свечения светодиода, которая влияет на его тепловыделение, безразмерная величина;  $P_{in}$  – мощность, потребляемая светодиодом, Вт.

Охлаждение поверхности прожектора воздушным потоком

$$Q_{охл\_led} = h_{конв(v, T_{окр})} \cdot A_{led} \cdot (T_{led} - T_{окр}), \quad (19)$$

где  $A_{led}$  – площадь поверхности светодиода, участвующая в теплообмене,  $\text{м}^2$ ;

$T_{led}$  – температура поверхности светодиода, К.

Аэродинамическая сила сопротивления может рассчитываться следующим образом:

$$F_{аэр} = 1/2 \cdot C_d \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A_{лоб}, \quad (20)$$

где  $C_d$  – коэффициент аэродинамического сопротивления, безразмерная величина;

$\rho$  – плотность воздуха, зависящая от высоты полета,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$A_{лоб}$  – лобовая площадь БЛА,  $\text{м}^2$ .

Тепловые потери из-за аэродинамического сопротивления

$$Q_{аэр} = F_{аэр} \cdot v. \quad (21)$$

Эффективность и емкость батареи зависят от состояния заряда (*SOC*) и состояния батареи (принятое сокращение «*SOH*» - от англ. state of health):

$$C_{бат\_эфф} = C_{ном\_бат} \cdot SOH \cdot SOC, \quad (22)$$

где  $C_{бат\_эфф}$  – эффективная емкость батареи, А·ч;  $C_{ном\_бат}$  – номинальная емкость батареи, А·ч;  $SOH$  (state of health) – относительное состояние «здоровья» батареи, в процентах от нового состояния, то есть на сколько деградировали химические элементы батареи;

$SOC$  (state of charge) – начальное состояние заряда в долях от полной емкости (в долях или процентах).

Импеданс батареи увеличивается при понижении температуры и по мере старения батареи [15, 16]. Импеданс  $Z$  можно смоделировать как функцию температуры  $T$  и состояния здоровья батареи  $SOH$ :

$$Z = Z_0 \cdot f(T, SOH), \quad (23)$$

где  $Z_0$  – номинальный импеданс при стандартных условиях, Ом;

$f(T, SOH)$  – функция, описывающая изменение импеданса в зависимости от температуры и состояния батареи.

Типовая функция для  $f(T, SOH)$ :

$$f(T, SOH) = a \cdot e^{-b \cdot T} \cdot (1 + c \cdot (1 - SOH)), \quad (24)$$

где  $a$  – базовый коэффициент масштабирования импеданса, безразмерная величина;

$b$  – коэффициент чувствительности импеданса к температуре,  $1/\text{К}$ ;

$c$  – коэффициент влияния деградации на импеданс, безразмерная величина.

Эмпирические коэффициенты  $a$ ,  $b$  и  $c$  определяются путем экспериментальных измерений и подбираются в соответствии с наблюдаемым поведением конкретных химических элементов батареи в различных условиях. Коэффициент  $a$  определяет базовое масштабирование импеданса. На него в первую очередь влияют свойства материала и конструкция батареи,  $a$  регулирует, как импеданс начинается с номинального значения  $Z_0$  при эталонной температуре и состоянии здоровья. Он соответствует импедансу по размеру. Коэффициент  $b$  определяет влияние чувствительности импеданса к изменениям температуры. Обычно это положительное значение, отражающее экспоненциальное увеличение импеданса при снижении температуры,  $b$  выражается в единицах, обратных температуре (например,  $1/\text{К}$ ), чтобы отразить, насколько быстро импеданс увеличивается при снижении температуры. Коэффициент  $c$  определяет влияние деградации на импеданс из-за ухудшения состояния батареи. По мере старения батареи и ухудшения ее состояния  $c$  определяет дополнительное увеличение импеданса. Он является безразмерным и изменяет импеданс пропорционально отклонению *SOH* от 100%.

При разряде или заряде аккумулятора выделяется тепло из-за его внутреннего сопротивления, которое определяется уравнением

$$Q_{акб} = I^2 \cdot Z \cdot t, \quad (25)$$

где  $Q_{акб}$  – тепло, выделяемое внутренним сопротивлением, Вт·с;

$I$  – ток, А;

$Z$  – импеданс батареи, Ом;

$t$  – время, с.

Для динамического моделирования системы сформулируем дифференциальное уравнение для температуры батареи  $T_{бат}$  с учетом всех источников тепла и потерь:

$$dT_{бат}/dt = (Q_{led} + Q_{акб} + Q_{аэро} + Q_{динамич} + Q_{корпуса} - Q_{конв} - Q_{рад} - Q_{взаимодействия}) / m_{бат} \cdot c_{бат}, \quad (26)$$

где  $dT_{бат}/dt$  – скорость изменения температуры батареи,  $\text{К}/\text{с}$ ;

$m_{бат}$  – масса батареи, кг;

$c_{бат}$  – удельная теплоемкость батареи,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ .

Для определения, когда выгодно включать подогрев, определяем целевую функцию, которая должна минимизировать суммарные энергозатраты с учетом потерь:

$$\min \left( \int_0^{t_{раб}} \left[ P_{подогрев}(t) + P_{свет}(t) + Q_{конв}(t) + Q_{аэро}(t) \right] dt \right), \quad (27)$$

где  $P_{подогрев}(t)$  – мощность подогрева в момент времени  $t$ , Вт;

$P_{свет}(t)$  – мощность освещения светодиодами в момент времени  $t$ , Вт;

$Q_{конв}(t)$  – конвективные теплопотери в момент времени  $t$ , Вт;

$Q_{аэро}(t)$  – теплопотери от аэродинамического сопротивления в момент времени  $t$ , Вт;

$t_{раб}$  – время работы системы, с.

На каждом временном шаге  $t$ :

- 1) рассчитываются конвективные  $Q_{\text{конв}}(t)$  и аэродинамические  $Q_{\text{аэр}}(t)$  теплопотери;
- 2) определяются текущие потери аккумулятора  $P_{\text{разряд}}(t)$ ;

3) сравниваются суммарные затраты на подогрев и теплопотери: если  $P_{\text{подогрев}}(t) < P_{\text{разряд}}(t)$ , включается подогрев; если  $P_{\text{подогрев}}(t) > P_{\text{разряд}}(t)$ , система отключает подогрев.

Дифференциальное уравнение для температуры аккумулятора

$$dT_{\text{бат}}/dt = (Q_{\text{led}} + Q_{\text{акб}} + Q_{\text{аэр}} + Q_{\text{динамич}} + Q_{\text{корпуса}} - Q_{\text{конв}} - Q_{\text{рад}} - Q_{\text{взаимодействия}})/(m_{\text{бат}} \cdot c_{\text{бат}}), \quad (28)$$

где  $dT_{\text{бат}}/dt$  – скорость изменения температуры батареи, К/с;

$Q_{\text{led}}$  – тепловыделение от светодиодов, Вт;

$Q_{\text{акб}}$  – тепловыделение от аккумулятора, Вт;

$Q_{\text{аэр}}$  – тепловые потери от аэродинамического сопротивления, Вт;

$Q_{\text{динамич}}$  – динамические изменения теплопотока, Вт;

$Q_{\text{корпуса}}$  – теплопередача через материал корпуса, Вт;

$Q_{\text{конв}}$  – конвективные теплопотери, Вт;

$Q_{\text{рад}}$  – тепловые потери через излучение, Вт;

$Q_{\text{взаимодействия}}$  – теплопередача между компонентами, Вт;

$m_{\text{бат}}$  – масса батареи, кг;

$c_{\text{бат}}$  – удельная теплоемкость батареи, Дж/(кг·К).

### Полученные результаты и их обсуждение

Симуляционное моделирование и численное решение разработанной модели производилось на языке Python с использованием Jupiter Notebook. Было принято, что основным элементом системы является малый БЛА квадрокоптерного типа, оснащенный светодиодным прожектором, термически связанным с аккумуляторной батареей. Светодиодный прожектор используется как источник света и при необходимости как источник тепла для подогрева аккумуляторной батареи. Мощность светодиодов составляет 40 Вт, эффективность света 20%, то есть приблизительно 80% энергии преобразуется в тепло. В качестве аккумуляторной батареи принята литий-ионная батарея с номинальной энергией 65 Вт·ч и напряжением 15,4 В. Батарея имеет массу 0,375 кг и удельную теплоемкость 800 Дж/(кг·К). Моделирование проводилось при температурах окружающей среды -10, -5, 0, 5, -20, -30°C. Было принято, что БЛА эксплуатировался на высоте 3000 м (взлет и снижение не учитывались, поддержание высоты было принято постоянным на весь период моделирования), что соответствует снижению температуры на 19,5°C (6,5°C на каждую 1000 м высоты). Скорость воздушного потока вокруг малого БЛА была принята постоянной и установлена на уровне 15 м/с, что соответствует средней скорости полета малого БЛА.

Коэффициенты теплопроводности ( $k = 0,04$  Вт/(м·К)) и излучательной способности ( $\epsilon = 0,95$ ) материалов корпуса и аккумулятора принимались по-

стоянными. Допускалось, что система достигает стационарного теплового состояния, где тепловые потоки постоянны во времени, при этом уравнение теплопередачи через материал учитывает постоянную теплопроводность и линейную зависимость теплового потока от температурного градиента.

Уравнение конвективного теплообмена учитывает коэффициент конвективной теплоотдачи, который рассчитывается исходя из скорости воздушного потока и температуры окружающей среды.

Уравнение радиационного теплообмена учитывает излучательную способность материала и постоянную Стефана-Больцмана.

Полученные данные симуляционного моделирования позволяют оптимизировать режимы подогрева аккумуляторных батарей БЛА в зависимости от температурных условий, что способствует повышению стабильности и надежности работы системы электропитания. Данная оптимизация является важным элементом стандартизации качества функционирования БЛА в широком диапазоне температур окружающей среды.

Для выполнения моделирования были использованы входные данные, представленные в табл. 1.

Таблица 1. Принятые входные параметры численного решения модели

Table 1. The input parameters adopted for the numerical solution of the model

Параметр	Единица измерения	Значение
Энергия аккумулятора	Вт·ч	65
Время полета	с	2760
Напряжение аккумулятора	В	15,4
Эффективность светодиода	безразмерная величина	0,20
Мощность светодиодов	Вт	40
Температура окружающей среды на уровне земли	°C	-10, -5, 0, 5, -30, -20
Скорость воздушного потока	м/с	15
Коэффициент теплопроводности	Вт/(м·К)	0,04
Площадь контакта	м <sup>2</sup>	0,1
Длина материала	м	0,01
Излучательная способность	безразмерная величина	0,95
Масса аккумулятора	кг	0,375
Удельная теплоемкость	Дж/(кг·К)	800
Температурный градиент	К/1000 м	6,5
Высота полета	м	3000

Для симуляции модели использовались экспериментальные данные о времени разряда аккумулятора при различных температурах. В табл. 2 представлены исходные данные разряда аккумулятора без подогрева и результаты моделирования времени разряда с подогревом. Эффективность нагрева согласно результатам симуляционного моделирования составила 0,263 К/с.

Основные результаты моделирования представлены в табл. 3 и на рис. 1, 2.

Таблица 2. Исходные (полученные экспериментальным путем) данные разряда аккумулятора без подогрева и результаты моделирования времени разряда с подогревом

Table 2. Experimental data on battery discharge without heating and the simulated results of discharge time with heating

Температура, °C	Время разряда без подогрева, с	Время разряда с подогревом, с
-15	3872,76	3930,40
-10	4214,27	4264,77
0	4763,54	4799,78
10	5134,46	5156,43
20	5327,04	5334,74
30	5341,27	5334,70
40	5177,16	5156,33
50	4834,70	4799,60

Таблица 3. Результаты симуляционного моделирования о полученной температуре аккумулятора и выигрыше в повышении длительности разряда

Table 3. Simulation results on the achieved battery temperature and the gain in discharge duration

Температура на уровне земли, °C	Температура на высоте 3000 м, °C	Конечная температура без подогрева, °C	Конечная температура с подогревом, °C	Увеличение длительности разряда, с
-30	-49,5	-22,05	24,22	57,64
-20	-39,5	-15,77	8,73	50,50
-10	-29,5	-8,05	6,59	50,50
-5	-24,5	-3,74	14,08	57,64
0	-19,5	0,80	5,31	36,24
5	-14,5	5,50	5,50	0,00

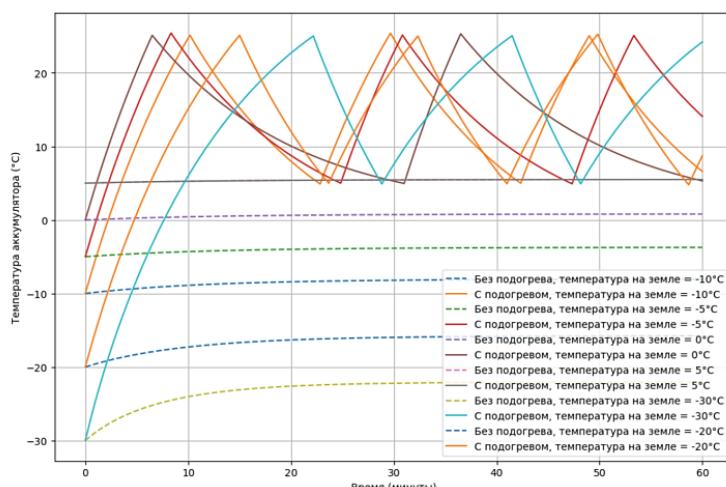


Рис. 1. Сравнение изменений температуры аккумулятора в зависимости от окружающей температуры с включением подогрева и без него

Fig. 1. Comparison of battery temperature changes depending on the ambient temperature with and without heating

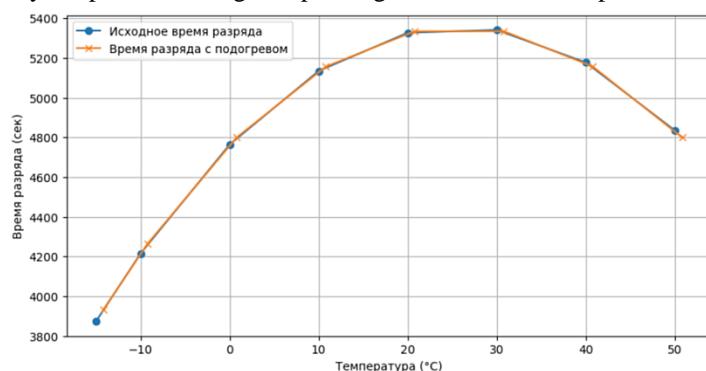


Рис. 2. Влияние нагрева на время разряда аккумулятора

Fig. 2. The impact of heating on battery discharge time

**Заключение**

Разработанная имитационная модель управления подогревом аккумулятора малых БЛА демонстрирует значительный потенциал для улучшения их эксплуатационных характеристик в условиях низких температур. В процессе моделирования было установлено, что использование светодиодных источников света в качестве комбинированных источников света и тепла позволяет поддерживать оптимальную рабочую температуру аккумуляторной батареи, что, в свою очередь, приводит к увеличению времени автономной работы устройства.

Особенно примечательными являются результаты моделирования при температуре окружающей среды  $-15^{\circ}\text{C}$ . В этих условиях время разряда аккумулятора с подогревом увеличилось с 3872,76 до 3930,40 с, что составляет прирост на 57,64 с. Хотя этот прирост времени может показаться незначительным, он имеет критическое значение в ситуациях, требующих длительной автономной работы малых БЛА, особенно в условиях, где температура окружающей среды отрицательно сказывается на эффективности аккумуляторов.

Эти данные свидетельствуют о том, что предложенная модель может существенно расширить возможности применения малых БЛА в различных климатических зонах, включая регионы с умеренно холодными зимами. Кроме того, поддержание оптимальной температуры аккумуляторов с помощью светодиодов способствует повышению энергоэффективности системы и улучшению общей надежности работы малых БЛА.

Интеграция светодиодных систем в качестве комбинированного активного источника света и элемента подогрева аккумулятора не только позволяет оптимизировать энергопотребление, но и открывает новые перспективы для улучшения взаимодействия с другими бортовыми системами, такими как системы навигации и управления. Это может привести к значительному повышению общей функциональности и безопасности эксплуатации малых БЛА.

Модель учитывает ключевые параметры теплопередачи, включая теплоемкость материалов, коэффициенты теплопроводности, конвекции и излучения, а также аэродинамическое воздействие. Это позволяет обеспечить высокую точность расчетов и адаптивность модели к различным условиям эксплуатации. В результате предложенная модель управления подогревом аккумулятора представляет собой значительный шаг вперед в направлении повышения эффективности и надежности малых БЛА, особенно в условиях эксплуатации при умеренно низких температурах.

Таким образом, управление тепловыми характеристиками аккумулятора и светодиодных систем рассматривается как элемент повышения качества и надежности функционирования БЛА, что напрямую относится к управлению качеством продукции. Оптимизация управления подогревом выполнена с учетом задач обеспечения стандартизованных условий эксплуатации. Это позволяет рассматривать модель в контексте управления качеством и стандартизации, так как она позволяет обеспечивать согласованные критерии температурных режимов, а следовательно, и энергозатрат.

Практическое значение данного исследования заключается в возможности повышения надежности и продолжительности работы малых БЛА в сложных климатических условиях. Это открывает новые возможности для расширения их применения в таких областях, как мониторинг, разведка и доставка в регионы с умеренно холодным климатом. Внедрение предложенной модели в эксплуатацию малых БЛА может существенно повысить их конкурентоспособность и обеспечить более широкое использование в различных отраслях.

Разработанная модель управления подогревом аккумуляторов позволяет поддерживать температурный режим батареи, что позволяет влиять на качество функционирования малых БЛА в условиях умеренно холодного климата. Это, в свою очередь, улучшает эксплуатационные характеристики аппарата, повышая его надежность и соответствие стандартам качества, предъявляемым к таким системам.

**Список источников**

1. Pollock A., Pollock H., Pollock C. High Efficiency LED Power Supply // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. 2015, vol. 3, pp. 617-623. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2015.2430621>.
2. Highly efficient near-UV-excitible  $\text{Ca}_2\text{YHf}_2\text{Al}_3\text{O}_{12}:\text{Ce}_{3+},\text{Tb}_{3+}$  green-emitting garnet phosphors with potential application in high color rendering warm-white LEDs / Wang S., Devakumar B., Sun Q., Liang J., Sun L., Huang X. // Journal of Materials Chemistry C. 2020, no. 8, pp. 4408-4420. <https://doi.org/10.1039/d0tc00130a>.
3. An Ultrahigh Efficiency Excitonic Micro-LED / Pandey A., Min J., Reddeppa M., Malhotra Y., Xiao Y., Wu Y., Sun K., Mi Z. // Nano letters. 2023. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.2c04220>
4. Yan C., Bai S., Nie T. Wang. High-power high-efficiency green LEDs // 12th China International Forum on Solid State Lighting (SSLCHINA). 2015, pp. 1-3. <https://doi.org/10.1109/SSLCHINA.2015.7360676>.
5. Very high external quantum efficiency and wall-plug efficiency 527 nm InGaN green LEDs by MOCVD / Li P., Zhao Y., Li H., Che J., Zhang Z., Li Z., Zhang Y., Wang L., Liang M., Yi X., Wang G. // Optics express. 2018, 26(25), 33108-33115. <https://doi.org/10.1364/OE.26.033108>.
6. High wall-plug efficiency blue III-nitride LEDs designed for low current density operation / Kuritzky L., Espenlaub A., Yonkee B., Pynn C., Denbaars S., Nakamura S., Weisbuch C., Speck J. // Optics express. 2017, 25(24), 30696-30707.
7. Кузьменко В.П. Применение алгоритма адаптивной многоимпульсной позиционной модуляции для повышения качества связи в области видимого света при управлении светодиодным освещением // Наука и бизнес: пути развития. 2022, № 7 (133). С. 54-58.
8. Rangappa N., Prasad Y., Dubey S. LEDNet: Deep Learning-Based Ground Sensor Data Monitoring System // IEEE Sensors Journal. 2022, no. 22, pp. 842-850. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3129173>.
9. 3-D Deployment of VLC Enabled UAV Networks With Energy and User Mobility Awareness / Anwar D., Peer M., Lata K., Srivastava A., Bohara V. // IEEE Transactions on Green Communications and Networking. 2022, no. 6, pp. 1972-1989. <https://doi.org/10.1109/TGCN.2022.3171920>.

10. Тыныбаев С.К., Байсейтов Г.Н., Тойбазаров Д.О. Оценка и выбор источников питания беспилотных летательных аппаратов // E-Scio. 2020. №4 (43).
11. Холкин Д., Чausov И., Шуранова А. Энергетика беспилотных авиационных систем // Энергетическая политика. 2023. № 8 (187). С. 26-37. DOI: 10.46920/2409-5516\_2023\_8186\_26.
12. Impact of low temperature and charge profile on the aging of lithium-ion battery: Non-invasive and post-mortem analysis / Wu W., Ma R., Liu J., Liu M., Wang W., Wang Q. // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2021, 170, 121024. <https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2021.121024>.
13. Lithium-ion battery structure that self-heats at low temperatures / Wang C., Zhang G., Ge S., Xu T., Ji Y., Yang X., Leng Y. // Nature, 2016, no. 529, pp. 515-518. <https://doi.org/10.1038/nature16502>.
14. Bandhauer T., Garimella S., Fuller T. A Critical Review of Thermal Issues in Lithium-Ion Batteries // Journal of The Electrochemical Society, 2011, 158. <https://doi.org/10.1149/1.3515880>.
15. Шамарова Н.А. Анализ методов оценки уровня заряда аккумуляторных батарей // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т.14. № 1 (53). С. 24-33.
16. Сердечный Д.В., Томашевский Ю.Б. Особенности эксплуатации накопителя энергии на базе многоэлементной литий-ионной аккумуляторной батареи // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т. 19. № 9-10. С. 140-145.

### References

1. Pollock A., Pollock H., Pollock C. High Efficiency LED Power Supply. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015;3:617-623. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2015.2430621>.
2. Wang S., Devakumar B., Sun Q., Liang J., Sun L., Huang, X. Highly efficient near-UV-excitatable  $\text{Ca}_2\text{YHf}_2\text{Al}_3\text{O}_{12}:\text{Ce}_3^+,\text{Tb}_3^+$  green-emitting garnet phosphors with potential application in high color rendering warm-white LEDs. Journal of Materials Chemistry C, 2020;8:4408-4420. <https://doi.org/10.1039/d0tc00130a>.
3. Pandey A., Min J., Reddeppe M., Malhotra Y., Xiao Y., Wu Y., Sun K., Mi Z. An Ultrahigh Efficiency Exciton Micro-LED. Nano letters. (2023). <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.2c04220>
4. Yan C., Bai S., Nie T. Wang. High-power high-efficiency green LEDs. 12th China International Forum on Solid State Lighting (SSLCHINA), 2015:1-3. <https://doi.org/10.1109/SSLCHINA.2015.7360676>.
5. Li P., Zhao Y., Li H., Che J., Zhang Z., Li Z., Zhang Y., Wang L., Liang M., Yi X., Wang G. x Very high external quantum efficiency and wall-plug efficiency 527 nm InGaN green LEDs by MOCVD. Optics express, 2023;26(25):33108-33115. <https://doi.org/10.1364/OE.26.033108>.
6. Kuritzky L., Espenlaub A., Yonkee B., Pynn C., Denbaars S., Nakamura S., Weisbuch C., Speck, J. High wall-plug efficiency blue III-nitride LEDs designed for low current density operation. Optics express, 2017;25(24):30696-30707.
7. Kuzmenko V.P. Application of adaptive multi-pulse position modulation algorithm to improve communication quality in the visible light range when controlling LED lighting. Nauka i biznes: puti razvitiya [Science and business: ways of development], 2022;7(133):54-58. (In Russ.)
8. Rangappa N., Prasad Y., Dubey S. LEDNet: Deep Learning-Based Ground Sensor Data Monitoring System. IEEE Sensors Journal, 2022;22:842-850. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3129173>.
9. Anwar D., Peer M., Lata K., Srivastava A., Bohara V. 3-D Deployment of VLC Enabled UAV Networks With Energy and User Mobility Awareness. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2022;(6):1972-1989. <https://doi.org/10.1109/TGCN.2022.3171920>.
10. Tynybaev S.K., Bayseitov G.N., Toybazarov, D.O. Assessment and selection of power sources for unmanned aerial vehicles. E-Scio, 2020;4(43). (In Russ.)
11. Kholkin D., Chausov I., Shuranova A. Energy of unmanned aerial systems. Energeticheskaya politika, [Energy policy], 2023;8(187):26-37. DOI: 10.46920/2409-5516\_2023\_8186\_26. (In Russ.)
12. Wu W., Ma R., Liu J., Liu M., Wang W., Wang Q. Impact of low temperature and charge profile on the aging of lithium-ion battery: Non-invasive and post-mortem analysis. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021;170:121024. <https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2021.121024>.
13. Wang C., Zhang G., Ge S., Xu T., Ji Y., Yang X., Leng Y. Lithium-ion battery structure that self-heats at low temperatures. Nature, 2016;529:515-518. <https://doi.org/10.1038/nature16502>.
14. Bandhauer T., Garimella S., Fuller T. A Critical Review of Thermal Issues in Lithium-Ion Batteries. Journal of The Electrochemical Society, 2011;158. <https://doi.org/10.1149/1.3515880>.
15. Шамарова Н.А. Analysis of methods for assessing the charge level of rechargeable batteries. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta [Vestnik of Kazan State Power Engineering University], 2022;14(1(53)): 24-33. (In Russ.)
16. Сердечный Д.В., Томашевский Ю.Б. Features of operation of an energy storage based on a multi-element lithium-ion battery. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki [Power engineering: research, equipment, technology], 2017;19(9-10):140-145. (In Russ.)

Поступила 16.08.2024; принята к публикации 10.10.2024; опубликована 30.06.2025  
Submitted 16/08/2024; revised 10/10/2024; published 30/06/2025

**Кузьменко Владимир Павлович** – кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики и робототехники, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия.  
Email: mr.konnny@gmail.com. ORCID 0000-0002-0270-4875

**Vladimir P. Kuzmenko** – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Electromechanics and Robotics, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia.  
Email: mr.konnny@gmail.com. ORCID 0000-0002-0270-4875