

Национальная Академия Наук Украины
Национальный Научный Центр
«Харьковский физико-технический институт»

На правах рукописи

ЛУХАНИН АЛЕКСАНДР АЛЕКСЕЕВИЧ

Підпис

УДК 004.94: 519.688: 621.354.34

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МЕТОДЫ
АНАЛИЗА ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ Li-ion БАТАРЕЙ
ВОЗДУШНЫМ ПОТОКОМ

01.05.02 – математическое моделирование
и вычислительные методы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
Хажмурадов Манап Ахмадович,
доктор технических наук, профессор

Цей примірник дисертаційної роботи
ідентичний за змістом з іншими, поданими
до спеціалізованої вченої ради Д 64.052.02

Вчений секретар спецради Д 64.052.02

Підпис

Л.В. Колесник

Печатка

Харьков–2016

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СОКРАЩЕНИЙ, СИМВОЛОВ И ТЕРМИНОВ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	7
Раздел 1 Управление тепловыми процессами Li-ion батареи.....	14
1.1 Свойства Li-ion аккумуляторов.....	17
1.2 Методы охлаждения Li-ion батарей.....	22
1.3 Охлаждение Li-ion батареи воздушным потоком	23
1.4 Математические модели тепловых процессов в Li-ion батареях	26
1.5 Постановка цели и задач исследования.....	34
Выводы по разделу 1.....	36
Раздел 2 Математическое моделирование и оптимизация параметров воздушного охлаждения Li-ion батареи.....	38
2.1 Математическое моделирование процессов теплообмена и газодинамики.....	38
2.1.1 Процессы тепломассопереноса при воздушном охлаждении.....	39
2.1.2 Математические модели потоков воздуха и теплообмена.....	41
2.1.3 Методы математического моделирования теплообмена и газодинамики в SolidWorks Flow Simulation.....	53
2.2 Математическое моделирование тепловых и воздушных потоков в Li-ion батареях, выбор параметров стенда для исследования эффективности охлаждения Li-ion батарей.....	58
2.2.1 Математическое моделирование процессов теплообмена с плоскими поверхностями элементов батареи.....	60
2.2.2 Результаты численного моделирования процесса охлаждения элементов Li-ion батареи с плоскими поверхностями, выбор зазора между элементами батареи.....	69

2.3 Выбор параметров стенда и измерительной камеры.....	71
Выводы по разделу 2.....	72
Раздел 3 Математическое моделирование процессов теплообмена с высокой эффективностью охлаждения.....	75
3.1 Математическое моделирование воздушного охлаждения с многоканальной периодической структурой поверхностей элементов батареи.....	75
3.2 Оптимизация воздушных потоков для охлаждения Li-ion батареи.....	87
3.3 Математическое моделирование охлаждения Li-ion батареями с помощью тепловой трубки.....	90
3.4 Исследование вычислительного метода для конвективных потоков в замкнутом объеме.....	100
3.5 Анализ системы охлаждения аккумуляторных батарей на основе М-цикла.....	104
Выводы по разделу 3.....	107
Раздел 4 Стенд для исследования эффективности охлаждения Li-ion батареи воздушным потоком.....	109
4.1 Воздушная станция и модуль стабилизации температуры.....	110
4.2 Имитаторы элементов Li-ion батареи.....	112
4.3 Камера для исследования эффективности охлаждения Li-ion батареи воздушным потоком	115
4.4 Многоканальная система регистрации температуры	116
4.5 Охлаждение Li-ion батареи с помощью тепловой трубки.....	121
4.6 Поверхности для улучшения эффективности охлаждения.....	124
4.7 Расчет погрешностей измерений.....	126
Выводы по разделу 4.....	132
Раздел 5 Результаты математического моделирования и экспериментального исследования.....	134
5.1 Исследование эффективности охлаждения батарей воздушным	

ПОТОКОМ.....	135
5.2 Исследование эффективности охлаждения батарей с помощью тепловой трубки.....	145
Выводы по разделу 5.....	148
Выводы.....	150
Список использованных источников.....	153
Приложение А Справка о внедрении результатов кандидатской работы	169

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СОКРАЩЕНИЙ, СИМВОЛОВ И ТЕРМИНОВ

АЦП – аналого-цифровой преобразователь.

КО – конечный объем.

ПИД – пропорционально интегрально дифференциальный регулятор.

T – температура.

T(возд) – температура воздуха.

T_{air} – температура воздуха входящего в зазор между имитаторами.

T_{imitator} – средняя температура на поверхности имитатора.

Φ – физическая величина.

C – величина тока численно равная емкости аккумулятора.

CFD – вычислительная гидрогазодинамика (Computational Fluid Dynamics).

dP(air) – перепад давления воздуха.

ΔT – разность температур.

dT/dt – скорость изменения температуры.

dV/dt – скорость изменения напряжения.

DOD – степень разряженности аккумулятора.

DTCO – предельная температура зарядки батареи.

E – энергия.

\vec{f} – сила.

$\vec{F}(\rho, \rho\vec{v}, \rho E, \dots)$ – вектор потока с компонентами $\rho, \rho\vec{v}, \rho E, \dots$

g – ускорение свободного падения.

H – энтальпия.

I – ток.

I_{min} – минимальный ток.

k – коэффициент теплопроводности.

M – молярная масса – масса одного моля вещества.

m_0 – молекулярная масса – масса молекулы, выраженная в атомных единицах массы.

P, p – давление.

$PHEV$ – гибридный электро – автомобиль с возможностью зарядки батарей от внешнего источника электроэнергии (Plug-in Hybrid Electric Vehicle).

PC – персональный компьютер.

\vec{q} – вектор плотности теплового потока.

Q – количество переданного тепла.

\vec{Q} – источники физических величин.

Q/ITD – эффективность охлаждения.

\vec{S}, S – площадь.

SOC – степень заряженности аккумулятора.

t – время.

TCO – диапазон рабочих температур.

u_i – компоненты вектора скорости.

\vec{u}, \vec{v} – скорость.

\vec{U} – вектор независимых и сохраняющихся физических параметров.

V – напряжение.

W – мощность.

x_i – компоненты координат точки.

xEV – электромобили всех типов.

λ – скрытая теплота парообразования.

μ – вязкость жидкости.

ρ – плотность массы.

Ω – контролируемый объем.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Разработки, исследования Li-ion батареи и их применение в транспортных средствах ведут многие лаборатории мира. Это NREL, TESLA (США), SANDIA (Канада), UFO (Китай), TOYOTA (Япония) и ряд других лабораторий. В Украине ведутся работы во многих исследовательских институтах и технических университетах. Однако в настоящее время недостаточно уделяется внимания исследованиям эксплуатации Li-ion батарей в условиях повышенного тепловыделения.

Одной из актуальных задач современных исследований Li-ion батарей является создание систем управления тепловыми процессами батарей для обеспечения наилучших условий эксплуатации, что дает возможность увеличить ресурс работы, повысить энергоемкость, безопасность, уменьшить вес и стоимости, как батарей, так и их эксплуатацию. Для этих целей необходимы соответствующие исследования эффективности охлаждения с использованием различных методов, включая охлаждение воздушным потоком.

Сокращение времени создания системы управления тепловыми процессами батарей может быть достигнуто, в частности, за счет использования математического моделирования тепловых процессов. Разработка математических моделей Li-ion батареи с системой охлаждения, моделирование тепловых процессов, поиск решений, обеспечивающих наибольшую эффективность охлаждения Li-ion батарей воздушным потоком, сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными является актуальной задачей, которая послужила основой диссертационной работы.

Решению задач гидрогазодинамики и моделированию тепловых процессов посвящены работы – Логвиновича Г.В., Годунова С.К., Богомолва Е.Н., Флетчера К., Хирша Ч. и многих других авторов. Создание высокоэффективных систем охлаждения относится к задачам многокритериальной оптимизации. Методические основы многокритериальной оптимизации были заложены Самарским А.А., Богомолвым Е. Н.,

Андерсоном У., Плетчером Р. и другими учеными. В Украине такие задачи решались Глушковым В.М., Рвачевым В.Л., Петровым Е.Г., Стояном Ю.Г., Хажмурадовым М.А. и другими учеными. Задачи этого класса сводятся к выбору параметров технических систем, обеспечивающих наилучшее решение поставленной задачи. В связи с этим основными научно-техническим заданием является: моделирование тепловых процессов при охлаждении Li-ion батарей; вычисление эффективности охлаждения и проведение исследований на стенде с последующим сравнением результатов моделирования и экспериментальных данных.

Связь с научными программами, планами, темами. Диссертационная работа выполнена в соответствии с планами госбюджетных и конкурсных тем, выполняемых в Национальном Научном Центре «Харьковский физико-технический институт» (ННЦ ХФТИ). Научные результаты, на которых базируется диссертационная работа, получены при выполнении плановых бюджетных программ, заказов Национального научного центра «Харьковский физико-технический институт» и совместного проекта ННЦ ХФТИ с BNL (США): проект III-6-11 «Исследование физических процессов и оптимизация параметров исследовательских установок методами математического моделирования» (№ ГР 0111U009294); проект III-7-11 «Фундаментальные и прикладные исследования по ядерной физике для нужд медицины, народного хозяйства, экологии и энергетики» (№ ГР 0111U009298); совместный проект ННЦ ХФТИ с BNL (США) – BNL-T2-371-UA «Разработка опытного образца системы термостабилизации Li-ion батарей». Диссертант в вышеперечисленных работах выступал в качестве исполнителя, а его научный вклад отображен в диссертации.

Цель и задачи исследования. Целью работы является разработка математических моделей тепловых процессов в системах охлаждения Li-ion батарей воздушными потоками с малыми скоростями, на основании результатов численного моделирования процесса охлаждения батарей определить параметры имитаторов элементов Li-ion батареи и камеры для

исследования эффективности охлаждения Li-ion батарей.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ существующих методов охлаждения Li-ion батарей;
- разработать математические модели тепловых процессов при охлаждении воздушным потоком Li-ion батарей, имеющих на поверхностях элементов сложную многоканальную структуру;
- выполнить математическое моделирование тепловых процессов и воздушных потоков при охлаждении элементов Li-ion батарей, оптимизировать параметры конструкции модулей батареи, воздушных потоков и определить требования к экспериментальной системе охлаждения Li-ion батареи;
- разработать математическую модель процесса охлаждения Li-ion батарей с помощью тепловой трубки;
- разработать систему измерения и обработки данных для многоканальной системы измерения температуры на поверхностях имитаторов Li-ion батарей;
- измерить эффективность охлаждения Li-ion батарей на разработанном стенде, сравнить полученные результаты с данными математического моделирования.

Объект исследования – процесс трехмерного распространения тепла в Li-ion батарее при охлаждении ее воздушным потоком.

Предмет исследований – математические модели и вычислительные методы тепловых процессов при охлаждении Li-ion батарей воздушным потоком, модели охлаждаемых поверхностей Li-ion элементов, тепловые процессы и тепловые трубки.

Методы исследования. В работе используются методы математического моделирования систем с распределенными параметрами для решения краевых задач аэрогидродинамики при охлаждении потоком воздуха поверхностей, численный анализ и методы оптимизации параметров теплофизических процессов в системе охлаждения Li-ion батарей воздушным потоком.

Научная новизна полученных результатов. В результате выполнения диссертационной работы предложены математические модели тепловых процессов при охлаждении воздушным потоком Li-ion батарей со сложной многоканальной структурой поверхностей элементов; на основании результатов моделирования процессов охлаждения батарей определены параметры имитаторов элементов Li-ion батарей и камеры для исследования эффективности охлаждения Li-ion батарей.

При этом получены такие новые результаты:

– впервые выполнено комплексное исследование пространственных полей температуры, давления и скоростей в воздушном потоке при охлаждении Li-ion батарей с многоканальными структурами на поверхностях элементов (поверхности типа «полупины со скругленными кромками», «скрученные ленточки» и «открытые пирамиды»). На основе осреднения температурных полей на поверхностях элементов батареи, для численного и экспериментального исследования распределения температуры, получены эффективности системы охлаждения Li-ion батарей;

– разработана математическая модель тепловой трубки и предложен метод вычисления удельной теплопроводности трубки, основанный на минимизации среднеквадратичного отклонения вычисленных и измеренных температур на поверхности элемента батареи, обеспечили возможность определить эффективность охлаждения Li-ion батареи тепловой трубкой и зависимость удельной теплопроводности тепловой трубки от средней температуры элемента батареи;

– впервые на основе математического моделирования и использования комплекса проблемно-ориентированного программного продукта исследованы потоки в гелиевой ячейке и показано, что скорость конвективных потоков в гелиевой ячейке близка к скорости спиновой диффузии;

– разработаны математические модели многоканальных структур на поверхностях элементов Li-ion батареи и реализованы в виде комплекса проблемно-ориентированного программного продукта для исследования

тепловых процессов при охлаждении воздушным потоком с малой скоростью;

– на основе математического моделирования тепловых процессов при охлаждении Li-ion батареи определены и оптимизированы параметры воздушных потоков стенда для измерения эффективности охлаждения отдельных элементов и модулей Li-ion батареи. Впервые разработаны калориметрическая камера и имитаторы Li-ion батареи с анизотропной теплопроводностью, аналогичной элементам батарей;

– выполнено моделирование процесса охлаждения Li-ion батарей, основанное на использовании психрометрической разности температур (М-цикл). Получены параметры воздушного потока и расхода воды в зависимости от температуры внешней среды.

Практическая значимость полученных результатов. Практическая значимость полученных результатов заключается в том, что они могут найти широкое применение при разработке электромобилей, исследовании нового научного и промышленного оборудования.

Внедрение математических моделей, численных методов, методов измерения и обработки данных подтверждены справкой об их использовании в ННЦ ХФТИ в экспериментальной установке «Мишень поляризованных ядер гелия 3» для моделирования тепловых процессов в гелиевой ячейке, многоканальной системе измерения температуры мишени, системе измерения поляризации ядер гелия 3 и в системе управления адиабатического реверса поляризации.

Разработаны математические модели и метод вычислений с использованием комплекса проблемно-ориентированного программного продукта, в котором интегрированы графический редактор геометрической модели, вычислительные модули процессов аэрогидродинамики, теплопереноса и визуализации результатов вычислений.

Результаты диссертационной работы включены:

– в госбюджетную научно-исследовательскую работу «Исследование физических процессов и оптимизация параметров исследовательских установок

методами математического моделирования» (№ ГР 0111U009294);

– в отчет по совместному проекту ННЦ ХФТИ с BNL (США) «Разработка опытного образца системы термостабилизации Li-ion батарей».

Личный вклад соискателя. Основные результаты диссертации получены автором самостоятельно и опубликованы в научных работах [1 – 12]. В работах опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежит: в [1] – математическая модель тепловых процессов при охлаждении Li-ion батарей; в [2] метод вычислений для усреднения температурных полей на поверхностях элементов батареи; в [12] – оптимизация параметров процесса охлаждения аккумуляторных батарей; в [7] – оптимизация параметров воздушного потока и обоснование требований к новому оборудованию для исследования эффективности охлаждения; в [8] – комплексное исследование эффективности систем охлаждения со сложными многоканальными структурами на поверхностях элементов Li-ion батареи; в [3] – разработка физического проекта на изготовление стенда для исследования эффективности систем охлаждения Li-ion батарей, калориметрических камер и имитаторов элементов батареи; в [4] – математическая модель сложного теплообмена при наличии природной конвекции в гелиевой ячейке; в [5] – анализ работы охладителей воздуха с использованием метода психрометрической разности температур (М-цикл); в [6] – математическая модель тепловой трубки и метод вычисления удельной теплопроводности трубки; в [9] – разработка технического проекта на изготовление тепловой трубки и анализ полученных экспериментальных результатов; в [10] – разработка модели 640 – канальной системы измерения температуры; в [11] – анализ ошибок измерения температуры многоканальной системой.

Апробация результатов диссертации. Основные результаты диссертационной работы докладывались и получили положительную оценку на международных конференциях:

– IV Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии» ИСТ-2015, 21 – 27 сентября, 2015г.,

Харьков [10];

– ASTFE First Thermal and Fluids Engineering Summer Conference (TFESC), (USA, New York, 2015) [6];

– XIII Конференции по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям, 16 – 20 марта, 2015г., Харьков [11];

– ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition (IMECE 2014), (Canada, Montreal, 2014) [9];

– ASME Heat Transfer and Thermal Engineering, (USA, San Diego, California, 2013) [8];

– Міжнародній науковій конференції «Питання оптимізації обчислень (ПОО-XL)», присвяченій 90-річчю від дня народження академіка В.М. Глушкова, (Україна, Крим, Велика Ялта, 2013 р.) [12];

– ASME Heat Transfer in Energy Systems, (USA, Puerto Rico, 2012) [7].

Публикации. Основные результаты, составляющие содержание диссертации, опубликованы в 12 научных работах: в том числе, в 5 статьях [1 – 5] в профессиональных научных журналах, из которых статьи [1, 2, 4] опубликованы в специализированных профессиональных изданиях Украины, статьи [3, 5] опубликованы в международных профессиональных изданиях, 5 работ опубликованы международных изданиях [6 – 9, 12] и 2 в тезисах докладов на научных конференциях [10, 11]. Публикации [2, 3, 5] входят в наукометричную базу SCOPUS. Статья [8] получила сертификат лучшей статьи 2013 года Американского Общества Инженеров Машиностроения (ASME).

РАЗДЕЛ 1

УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫМИ ПРОЦЕССАМИ Li-ion БАТАРЕИ

Аккумуляторные батареи используются в транспорте, энергетике и других отраслях. Использование аккумуляторных батарей в электрических и гибридных автомобилях, позволяет снизить их зависимость от не возобновляемых энергоносителей, таких как нефть, природный газ и уменьшить выбросы парниковых газов и загрязняющих веществ [13 – 15]. Удельная плотность энергии Li-ion батареи достигает 150 Вт час/кг и 400 Вт час/л , т.е. почти в два раза больше удельной энергии и плотности энергии NiMH аккумуляторов. На рис. 1.1 сравниваются энергетические и мощностные характеристики различных типов аккумуляторных элементов.

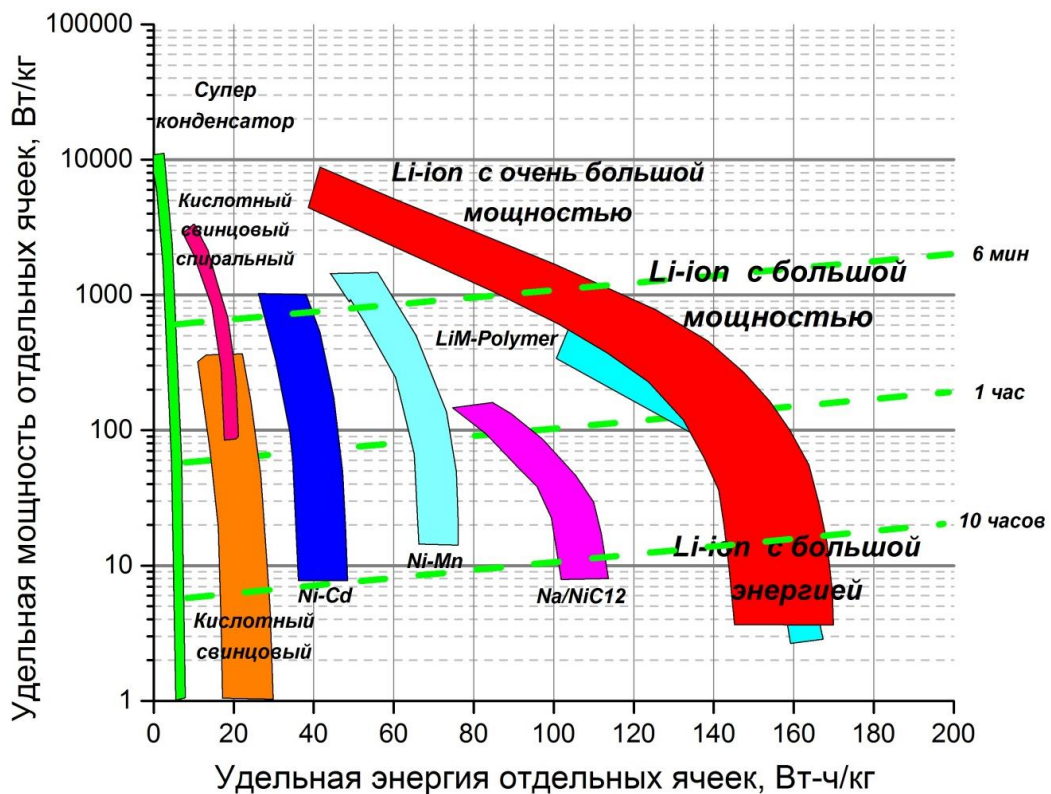


Рисунок 1.1 – Энергетические и мощностные характеристики различных типов аккумуляторных элементов (пунктирными линиями показано время зарядки батарей)

Многие производители электрических и гибридных автомобилей

[16, 17] используют Li-ion батареи с большой емкостью заряда. В табл. 1.1 приведены характеристики Li-ion батареи, используемые некоторыми производителями электротранспорта.

Таблица 1.1 – Характеристики батареи, используемые в электротранспорте

Модель (Производитель электропривода)	Емкость батареи	Мощность двигателя	Максимальная скорость	Время зарядки батареи	Запас хода
Berlingo Electric (Citroen)	23кВт·ч	49кВт (пик.)	110 км/ч	8–15 час.	170км
Peugeot eExpert (Allied Electric)	43кВт·ч	30кВт (длит.) 60кВт (пик.)	105 км/ч	8.5–14.3ч.	155км
Transit Connect Electric (Ford)	28кВт·ч	52кВт (длит.) 105кВт (пик.)	120 км/ч	6–8 час.	80–130км
Boulder 1000-series (Boulder Electric Vehicle)	105кВт·ч	120кВт (длит.) 220кВт (пик.)	120 км/ч	10–12 час.	130–160км
Ford E450 (Motiv Power Systems)	80кВт·ч 100кВт·ч 120кВт·ч	150кВт (пик.)	95 км/ч	8 час.	130–195км
PVI XL (Power Vehicle Innovation)	170кВт·ч	103кВт (длит.)	90 км/ч	6–7 час.	120–160км
Nautilus MX30 (Balqon)	320кВт·ч	242кВт (пик.)	115 км/ч	3–4 час.	240км

Большие Li-ion батареи выполняют в виде нескольких модульных сборок. В одном модуле используется от 8 и более отдельных аккумуляторных элементов. Элементы могут быть включены последовательно или по схеме параллельного включения нескольких групп последовательно включенных

элементов. Наибольшее распространение получили аккумуляторные элементы в форме прямоугольной призмы. Характеристики некоторых таких Li-ion элементов приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2 – Характеристики Li-ion элементов

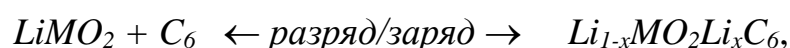
Модель	Размеры, <i>мм</i>	Емкость, <i>А·ч</i>	Напряжение, <i>В</i>	Ресурс, <i>цикл</i>	Температура, <i>°С</i>
EnerDel, Inc. [18].					
CE175-360	172×253×5.8	17.5	3.60	3000	–20 ÷ +55
CP160-365	172×253×5.9	16.0	3.65	3000	–20 ÷ +55
CE210-375	192×253×5.8	21.0	3.75	3000	–20 ÷ +55
CP185-375	192×253×5.8	18.5	3.75	3000	–20 ÷ +55
UFO Source Energy Battery Technology Co., Ltd. [19].					
8067275	7.9×67×273	19.0	3.7	2500	–30 ÷ +55
A055275	10×55×271	21.0	3.7	2500	–30 ÷ +55
90134175	9×134×175	28.3	3.7	2500	–30 ÷ +55
A123 [20, 21]					
AMP20M1HD-A	7.25×160×227	19.6	3.3	3000	–30 ÷ +52
ANP14-M1Ultra-A	7.2×160×227	14	3.3	3000	–30 ÷ +52

Проблемой создания энергоемких аккумуляторных батарей и их эффективного использования занимаются в NREL, TESLA (США), UFO (Китай), TOYOTA (Япония) и ряд других лабораторий [22]. Особенно актуальна эта задача для создания экологически чистого электротранспорта, различного рода летательных аппаратов и др. Наиболее интересными решениями этих вопросов являются те, в которых для функционирования

устройств, применяются батареи с большой энергоемкостью, минимальным весом и стоимостью [23 – 25]. В большинстве случаев аккумуляторные батареи используются, когда оптимальная температура аккумуляторной батареи незначительно выше температуры окружающей среды. В этом случае требуется высокая эффективность охлаждения.

1.1 Свойства Li-ion аккумуляторов

Типичный Li-ion аккумулятор состоит из пары электродов с токовводами, сепаратора и электролита [26]. Конструктивно Li-ion аккумулятор выполнен из свернутых трех лент. В зависимости от вида намотки Li-ion аккумуляторы могут быть иметь вид цилиндра или призмы. Отрицательный электрод называют – анод, положительный – катод. Анод представляет собой алюминиевую фольгу со слоем углеродного материала микро слоистой структуры, а катод – медную фольгу с нанесенным слоем оксида металла аналогичной структуры. Электроды разделены, пропитанным электролитом, пористым сепаратором. Слоистая структура электродов позволяет интеркаляцию ионов лития, т.е. обратимого внедрения ионов лития в слои электродов. Важной особенностью интеркаляции является сохранение целостности структуры электрода. Наблюдается лишь некоторое увеличение параметров решетки материала электродов аккумулятора в одном или нескольких направлениях. В полностью заряженном Li-ion аккумуляторе, анод содержит максимальное количество ионов лития, а катод – наименьшее количество ионов лития. Процессы интеркаляции - деинтеркаляции ионов лития лежат в основе функционирования Li-ion аккумуляторов [27 – 29] и могут быть записаны в виде химических формул:



где $M = V, Cr, Fe, Co$ и Ni .

На рис 1.2 приведено схематическое представление Li-ион аккумулятора.

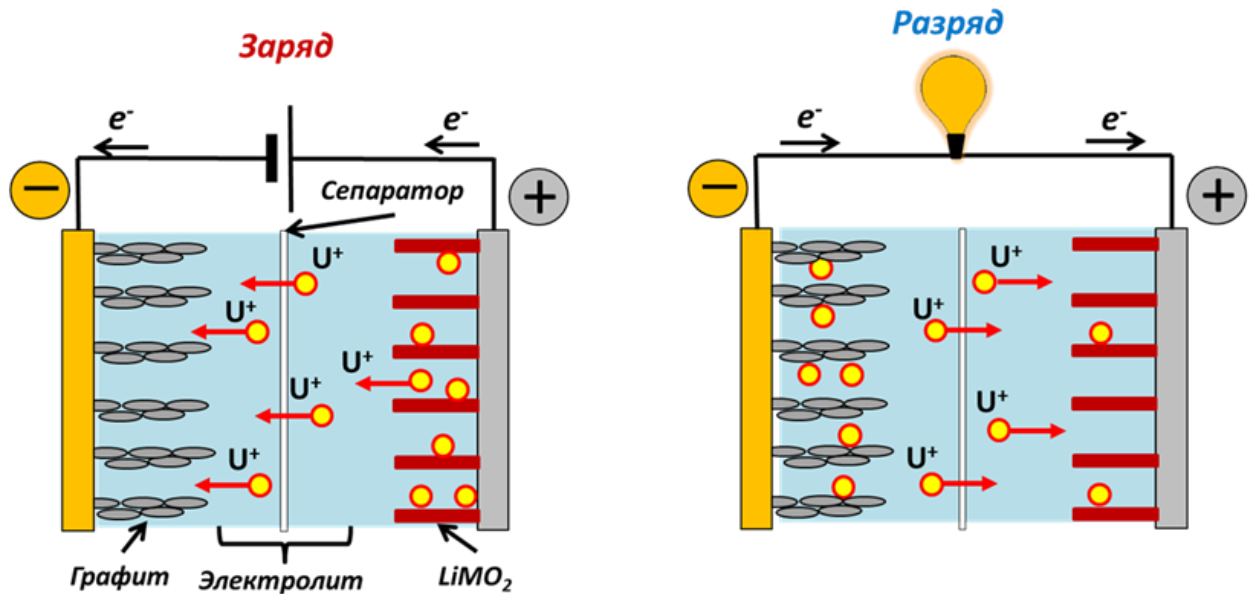


Рисунок 1.2 – Схематическое представление Li-ион аккумулятора

К основным эксплуатационным характеристикам Li-ион аккумуляторов, как и других, относятся:

- геометрическая форма и размеры аккумуляторов;
- электрическая емкость;
- среднее разрядное напряжение;
- степень заряженности аккумулятора, (State Of Charge (*SOC*));
- максимальный ток заряда/разряда;
- минимальное время зарядки;
- диапазон рабочих температур, (Thermal cut-off (*TCO*));
- коэффициент полезного действия;
- ресурс работы;
- срок службы.

За время эксплуатации характеристики аккумуляторов изменяются в худшую сторону. Прежде всего, уменьшается емкость аккумулятора и, соответственно, максимально допустимые токи заряда разряда, увеличивается внутреннее сопротивление аккумулятора, приводящее к увеличению тепловыделения в самом аккумуляторе [30 – 32].

Основные проблемы эксплуатации электромобилей с Li-ion батареями – безопасность и стоимость. Даже просто перевозка таких батарей привела в свое время к возгоранию трех транспортных самолетов, а из 33 случаев возгорания аккумуляторных батарей на борту самолетов, зафиксированных FAA (Федеральное управление гражданской авиации США) с 2009 года, в 80% случаев были виноваты именно литий-ионные устройства. Обе проблемы связаны с тепловыми свойствами Li-ion батарей. Li-ion батареи чувствительны к рабочей температуре [33, 34]. Когда батареи работают при температуре выше $+50^{\circ}\text{C}$, особенно, при высокой степени заряда, возникает необходимость значительно снижения тока в нагрузке из-за многочисленных факторов. На рис. 1.3 приведены факторы, разрушающие Li-ion батарею.

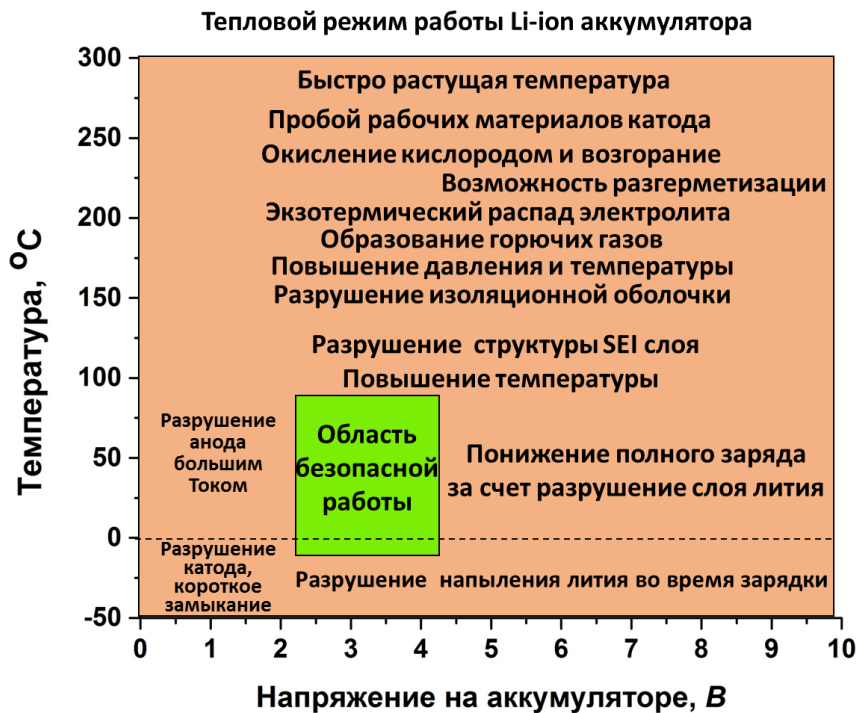


Рисунок 1.3 – Факторы, разрушающие Li-ion батарею

При температуре ниже -10°C уменьшается емкость батареи и, к тому же, необходимо снижать скорость заряда батареи, так как при обычной скорости заряда сокращается срок службы аккумуляторов [35 – 38]. Обычно производитель не рекомендует производить зарядку батареи при температуре ниже 0°C . Рекомендуется вначале вывести батарею в оптимальный тепловой

режим перед зарядкой. Кроме того, неодинаковая температура в объеме батареи приводит к разной степени заряда отдельных ее аккумуляторов, а, следовательно, к уменьшению емкости батареи по сравнению с емкостью отдельных ее элементов [39, 40]. Это часто происходит при использовании быстрого метода зарядки батареи. Поэтому необходимо вводить так называемые *SOC* (State-Of-Charge) алгоритмы для быстрой зарядки батарей [41, 42]. Таким образом, оптимизация температур и градиентов внутри батареи позволяет максимально использовать емкость батареи и продлить ресурс ее эксплуатации [3].

Анализируя влияния температуры на характеристики Li-ion батареи, можно отметить, что наиболее чувствительным к температуре является быстрый режим зарядки [43 – 46], что важно при использовании батарей в транспорте. Кроме того при наборе скорости транспортным средством возникают большие токи разряда батарей. А это приводит к повышенному тепловыделению и безопасная степень увеличения тока разряда определяется емкостью батареи, диапазоном и градиентом температуры как внутри каждого аккумулятора, так и во всей батарее [47, 48].

В промышленно развитых странах приняты программы создания электроприводных и гибридных автомобилей [49 – 52]. Масштабные работы в этой области предусмотрены реализуемой программой «Freedom CAR». Цель программы «Freedom CAR» является разработка автомобилей и легких грузовиков, не создающих выбросы токсичных продуктов в атмосферу. Важное место в этой программе отведено развитию электрических аккумуляторных батарей. Разработаны требования к новым аккумуляторным батареям для гибридных и электроприводных автомобилей [53, 54]. В табл. 1.3 приведены основные планируемые характеристики Li-ion батарей для транспортных средств 2018 года. На рис. 1.4 показано сравнение планируемых характеристик Li-ion батарей по программе «Freedom CAR» с существующими данными в настоящее время. Идеальный вариант – это когда все характеристики приближаются или выше 100% от планируемых.

Таблица 1.3 – Планируемые характеристики Li-ion батарей

Характеристика	Ед.изм.	PHEV-20	PHEV-40	xEV-50
Пиковая нагрузка (2 сек)	<i>кВт.</i>	45	46	120
Коэф. полезного действия	<i>%</i>	90	90	90
Длительность работы (ном. нагр.)	<i>Цикл</i>	300 000	300 000	300 000
Срок службы	<i>год</i>	15	15	15
Максимальный вес	<i>кг</i>	47	120	150
Максимальный объем	<i>литр</i>	150	153	300
Диапазон рабочих температур	<i>°C</i>	-30 – +52	-30 – +52	-30 - +52
Эфф. использ. ем. бат. 30°C – 52°C	<i>%</i>	100	100	100
Эфф. использов. емкости бат.– 0°C	<i>%</i>	50	50	50
Эфф. использ. емкости бат. –30°C	<i>%</i>	10	10	10
Допустимый диапазон температур	<i>°C</i>	-46 – +66	-46 – +66	-46 – +66



Рисунок 1.4 – Диаграмма технических характеристик Li-ion батареи на текущий момент

Из сравнения характеристик Li-ion батарей видно, что наиболее эффективно Li-ion батареи могут использоваться при температурах 30 – 35 °C.

Поэтому стабилизация температурного режима является важной задачей в разработке современных транспортных средств. Кроме того, необходимо прогнозирование и управление электрическими и тепловыми режимами. Для тепловых процессов это температура и скорость нагрева/охлаждения элементов батареи [55, 56].

1.2 Методы охлаждения Li-ion батарей

Выше были рассмотрены факторы, обеспечивающие максимально длительную и безопасную эксплуатацию Li-ion батарей. Существенной проблемой охлаждения Li-ion батарей является плохая теплопроводность, создающая большое тепловое сопротивление между местами выделения тепла и охлаждающей средой [57]. Воздух является самым распространенным теплоносителем, используемым для охлаждения аккумулятора [2], но пассивное воздушное охлаждение не может быть наилучшим способом для поддержания одинаковой температуры во всех элементах батареи и ограничение нежелательного повышения температуры.

Жидкости имеют более высокую теплопроводность и теплоемкость, чем воздух, и, в результате, уменьшается рост температуры в отдельных элементах и градиент температуры между элементами в батарее. Тем не менее, этот способ ограничен, потому что хороший тепловой контакт с поверхностью отдельного элемента приводит к большим внутренним тепловым градиентам в этих элементах, а это приводит тоже к сокращению ресурса работы элемента.

Существуют несколько способов отвода тепла:

- циркуляцией воздушных потоков [58, 59];
- циркуляцией охлаждающей жидкости [60];
- использованием материалов с фазовыми переходами [61 – 63];
- использование тепловых трубок и термосифонов [64 – 67, 7, 9];
- охлаждение при помощи рефрижераторной техники [68];
- при помощи прямого испарения хладагентов в батарее [69];

– установка термоэлектрических охлаждающих элементов [70].

Охлаждение при постоянной температуре отвода тепла (например, при использовании фазовых переходов) также уменьшает градиент температуры в батарее, но добавляется участок с большим дополнительным тепловым сопротивлением между элементами и внешней средой. Таким образом, все существующие способы охлаждения принципиально зависят от внешней поверхности элементов батареи, материала поверхности (его коэффициента теплопередачи) и недостаточно обеспечивают компактность систем охлаждения.

С целью повышения эффективности охлаждения/нагрева батарей, применяют управление тепловыми процессами [71 – 74]. На рис.1.5 приведена структура управления тепловыми процессами Li-ion батареи.

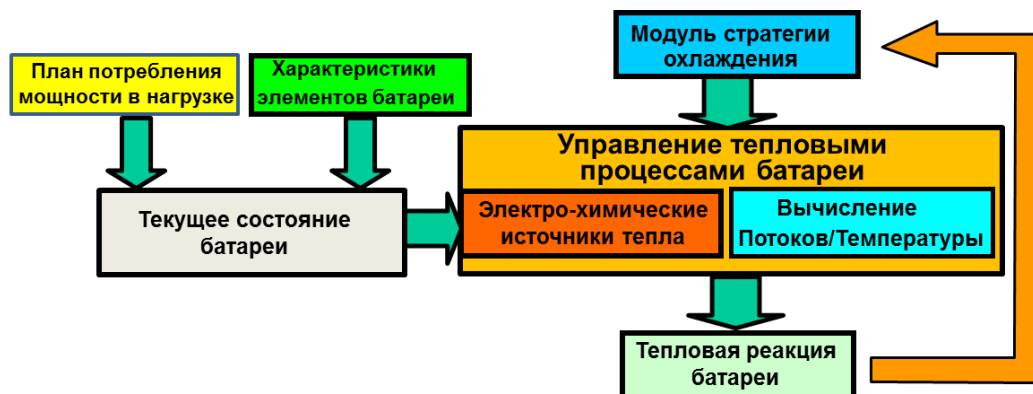


Рисунок 1.5 – Структура управление тепловыми процессами Li-ion батареи

Знание текущего состояния температурного режима и прогнозирование поведения батареи в зависимости от ее степени изношенности, реакцию на изменение режима нагрузки, степени разряженности и других факторов позволяет более полное использование емкости и ресурса батареи, и в итоге увеличить безопасность и уменьшить стоимость эксплуатации батареи.

1.3 Охлаждение Li-ion батареи воздушным потоком

Воздушное охлаждение/нагрев Li-ion батареи характеризуется простотой

и малой стоимостью системы менеджмента тепловыми процессами. При воздушном охлаждении воздух проходит через батарею и, охлаждает или нагревает ее, создавая наилучший тепловой режим эксплуатации. На рис. 1.6 показаны варианты пассивного и активного охлаждения/нагрева батарей.

При пассивном воздушном охлаждении воздух из окружающей среды выполняет наружное охлаждение батареи, нагревается и возвращается снова в окружающую среду.

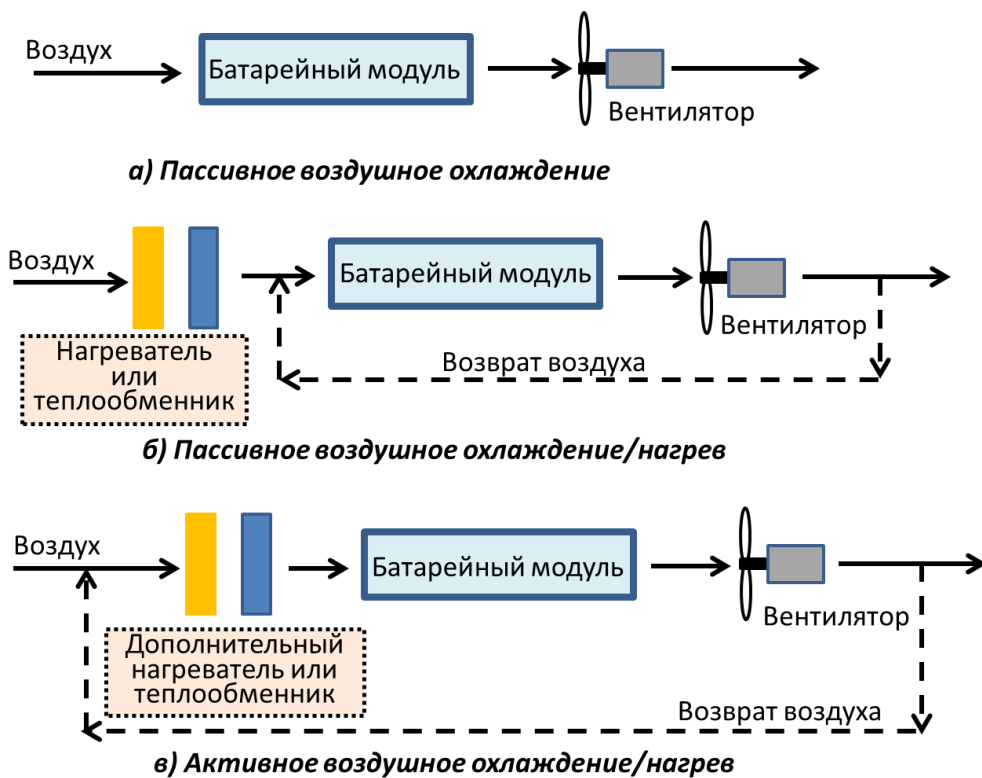


Рисунок 1.6 – Пассивное и активное охлаждение/нагрев Li-ion батареи

У метода охлаждения воздушным потоком есть несколько принципиальных недостатков. Основной недостаток – теплоемкость воздуха ~ 1 Дж/л, что приводит к использованию сравнительно больших потоков.

Процесс охлаждения Li-ion батареи характеризуется набором некоторых физических величин. Это средняя температура батареи, однородность температуры в объеме батареи, температура охлаждающего воздуха, скорость

потока воздуха, давление в разных точках потока и ряд других характеристик.

Наличие в системах управления тепловыми процессами многих факторов, влияющих на эффективность системы, приводит к необходимости моделирования процессов и экспериментальной проверки работы, как всей системы, так и ее отдельных элементов [78, 79]. В случае использования сепараторов необходимо предварительное моделирование процесса охлаждения, так как это удешевляет процесс выбора наиболее эффективных вариантов поверхностей. Вместе с тем при моделировании практически не всегда удается провести расчеты для полного объема батарейного модуля. Особенно в случаях большого количества мелких структур [80]. Такие расчеты занимают много времени и требуют быстродействующих вычислительных комплексов или компьютеров.

Наличие упрощений и ограничений при моделировании тепловых процессов может привести к несоответствию характеристик реального устройства с расчетными величинами. Поэтому необходимы экспериментальные исследования проектируемых устройств, как на стадии разработки отдельных узлов, так и исследование работы всего устройства. Исследования проводят предварительно на стендах и потом в реальных эксплуатационных условиях [81 – 85].

Для испытания Li-ion батареи и элементов разработаны специальные тесты [86]. В таблице 1.4 приведены основные характеристики тестов для проверки характеристик Li-ion батареи, используемых в электро и гибридных автомобилях.

Производители тестового оборудования производят стенды и камеры для проведения одного или нескольких тестов. В настоящее время ведутся работы по исследованию работы Li-ion батареи в условиях быстрого заряда или большой мощности, потребляемой при увеличении скорости движения транспортного средства. В этом случае необходимо дополнительное охлаждение и стабилизация температуры Li-ion батареи.

Таблица 1.4 – Тесты для Li-ion батарей

Тест	Наименование	Назначение
IEC 61960	Техника безопасности	Надежность и безопасность
IEC 62660-2	Надежность и безопасность	Емкость батареи. Стойкость при высоких температурах.
SAE J2464	Основные характеристики перезаряжаемых батарей	Заряд/разряд. Емкостью Тепловая стойкость.
UL 1642 UL 2580	Безопасность Li-Ion батарей при эксплуатации в тяжелых режимах	Вибрация. Ударные перегрузки. Внешнее короткое замыкание. Удары, разрушение.
IEC 62281	Безопасность батарей при периодическом изменении условий	Давление. Температура. Вибрация. Ударные перегрузки. Короткое замыкание. Удары.
UN/DOT 38.3	Транспортировка	Условия транспортировки Li-Ion батарей.

Для исследования эффективности охлаждения батарейного модуля воздушными потоками с малой скоростью потока и однородной по сечению температурой, необходима существенная доработка таких стендов. В ведущих лабораториях используются стенды, разработанных по специальным техническим заданиям и, как правило, в единичных экземплярах.

1.4 Математические модели тепловых процессов в Li-ion батареях

При охлаждении воздушным потоком Li-ion батареи, воздух находится в условиях, при которых отсутствуют в рабочем диапазоне температур фазовые переходы, сверхзвуковые скорости, квантовые эффекты и заметное излучение. Решается задача сопряженного теплообмена [3], в котором основными процессами являются теплопроводность [94] и конвекция [95].

В основу описания процессов теплопроводности положен феноменологический метод. Вещества рассматриваются как сплошные среды.

Такой подход правомерен, если размеры исследуемых объектов во много раз больше по сравнению с размерами молекул и расстояниями между ними. Процесс передачи тепла в пространстве и во времени может иметь место при условии, что в различных точках тела температура неодинаковая [96].

Исследуя процесс передачи тепла в твердых телах, Фурье в 1822 г. экспериментально установил, что количество переданного тепла – Q пропорционально времени – dt , площади сечения – dS , перпендикулярного направлению распространения тепла, и градиенту температуры T :

$$\frac{d^2Q}{dSdt} = \vec{q} = -k \text{ grad}T \quad (1.1)$$

где \vec{q} – вектор плотности теплового потока,

k – коэффициентом теплопроводности, который характеризует способность данного вещества проводить тепло и численно равен количеству теплоты, переданному в единицу времени через единицу поверхности при градиенте температуры, равном единице.

Фурье считал, что коэффициент теплопроводности – k постоянный. В общем случае – k зависит от свойств среды.

Конвективный теплообмен – процесс теплообмена при движении жидкости или газа. При этом одновременно существует перенос тепла за счет конвекции и теплопроводности. Теплообмен между движущимся газом или жидкостью и поверхностью твердого тела называется конвективной теплоотдачей. Величина теплового потока определяется законом Ньютона-Рихмана:

$$Q = \alpha \cdot (t_s - t_l) \cdot S, \quad (1.2)$$

где t_s и t_l – температура поверхности твердого тела и жидкости, соответственно;

S – площадь поверхности; коэффициент пропорциональности – α называется коэффициентом теплоотдачи (α – конвективный коэффициент теплоотдачи).

Теплоотдача – сложный процесс и зависит от многих факторов: размеров и формы твердого тела, режима движения, температуры и скорости движения жидкости и ряда других факторов.

Различают естественную и вынужденную конвекцию. В первом случае газ или жидкость движется за счет разных плотностей холодных и нагретых областей жидкости (например, в поле земного тяготения), во втором – за счет внешних сил (вентилятор, насос и др.). Возможна реализация обоих случаев одновременно.

Тепловые потоки в Li-ion батарее, охлаждаемой потоком воздуха, определяются такими величинами как, отводимая тепловая мощность, температура и величина потока воздуха, средняя температура элементов батареи, теплопроводности используемых элементов, теплоотдача поверхностей элементов, распределение температуры и другие. При этом, чтобы охарактеризовать качество охлаждения различных типов батарей, необходимо использовать минимальное количество параметров, доступных для измерения, и отражающих интегральные характеристики батареи. В качестве таких параметров выбирают полную мощность тепловыделения в батареях, среднюю температуру элементов батареи и температуру потока воздуха.

При наличии в системе охлаждения процессов теплопередачи, конвекции, излучения и других факторов используются такие характеристики качества охлаждения как ITD (Inlet Temperature Difference), $LMTD$ (Log-Mean Temperature Difference), $\varepsilon\text{-}NTU$ (effectiveness-NTU) [75] и другие. Эти характеристики имеют размерность тепловой проводимости ($Вт/К$) и применяются при воздушном и жидкостном охлаждении. Последние две характеристики наиболее подходят при охлаждении поверхностей с однородной температурой. При наличии градиентов температуры на поверхностях охлаждаемых объектов или наличия двух и более параллельных

каналов охлаждения наиболее подходит характеристика качества ITD [75].

Качество (эффективность) охлаждения – ITD , мощность тепловыделения в батарее, увеличивающая среднюю температуру батареи на $1^{\circ}C$ по сравнению с температурой входного потока воздуха:

$$ITD = \frac{\bar{\alpha} \sum_n s_n}{T_{battery} - T_{air}} = \frac{W_{battery}}{T_{battery} - T_{air}}, \quad (1.3)$$

где $W_{battery}$ – тепловая мощность, выделяемая в батарее;

$\bar{\alpha}$ – средний по батарее коэффициент теплоотдачи;

T_{air} – температура входящего воздуха в батарею;

$T_{battery}$ – средняя температура поверхностей элементов батареи.

s_n – площадь поверхности, охлаждаемой потоком воздуха, одного элемента батареи. Суммирование производится по всем элементам батареи.

Обычно батарея состоит из многих однотипных элементов и имеет одинаковые условия охлаждения для отдельных элементов. Кроме того, средняя температура поверхностей элементов мало отличается от средней температуры элементов. По этому, можно рассматривать в качестве модели тепловых процессов батареи тепловые процессы в одном элементе батареи. В этом случае эффективность охлаждения одного элемента батареи определяется как:

$$Q / ITD = W / \Delta T, \quad (1.4)$$

где W – тепловая мощность, выделяемая в одном элементе батареи;

$\Delta T = T_{cell} - T_{air}$;

T_{air} – температура входящего воздуха в зазор между элементами;

T_{cell} – средняя температура поверхности элемента батареи.

Значительно на эффективность охлаждения влияет эффективность отвода тепла от поверхностей отдельных элементов батареи [76, 77]. Для этого используют разделительные перегородки – сепараторы с различной структурой

поверхностей, находящихся в тепловом контакте с поверхностями элементов батареи.

В общем виде математическая модель эффективности охлаждения Li-ion батарей может быть записана:

$$Q/ITD = \Psi(X)_{X \in D_x}, \quad (1.5)$$

$$D_x = \{X/ g(X) > 0, \varphi(X) = 0\},$$

где $\Psi(X)$ – целевая функция;

X – вектор управляемых (конструктивных) параметров;

$g(X)$ и $\varphi(X)$ – функции ограничения;

D_x – допустимая область значений в пространстве управляемых параметров;

$D_x \in R^n$, $n = 1, 2, 3$, в зависимости от решаемой задачи.

С математической точки зрения задача выбора оптимального решения, при которых целевая функция (эффективность охлаждения) $\Psi(X)$ принимает максимальное значение, интерпретируется, как задача поиска экстремума целевой функции путем варьирования управляемыми параметрами (диапазон параметров воздушного потока, средняя температура и градиент температуры в элементах батареи, расстояние между элементами и структура поверхности элементов батареи) в пределах допустимой области:

$$\max_{X \in D_x} \Psi(X). \quad (1.6)$$

Сложность задачи оптимизации системы управления тепловыми процессами обусловлена наличием пяти выходных параметров, которые являются параметрами оптимальности [89, 90]. Поэтому расчет параметров $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, при которых целевая функция (эффективность охлаждения) $\Psi(X)$, принимает максимальное значение, является предметом

параметрической оптимизации [91].

Входными параметрами тепловой модели являются:

- выделяемая тепловая мощность,
- теплотехнические свойства элементов Li-ion батареи,
- размеры батареи, элементов батареи и конструкционные размеры батарейного модуля,
- параметры воздушного потока, такие как температура, скорость потока и термодинамические свойства воздуха,
- структура поверхности элементов батареи.

К ограничениям относятся:

- геометрические размеры области моделирования,
- условия на границах,
- градиент температуры в элементах батареи,
- диапазон параметров воздушного потока.

Оптимизационная задача является многокритериальной. Для сведения многокритериальной задачи к однокритериальной в качестве *частного критерия* определим среднюю температуру поверхности элементов Li-ion батареи.

Средняя температура Li-ion батареи может быть определена из распределения температуры на поверхностях элементов. Тогда задача поиска экстремума $\Psi(X)$ сводится к моделированию тепловых и гидроаэродинамических процессов при прохождении потока воздуха через воздушные каналы батареи элементов. Диапазон температуры входного воздуха и скорость потока определяют оптимальные величины средней температуры и градиента температуры в элементах Li-ion батареи. Для нахождения оптимальных значений параметров воздушного потока проводятся вычисления, с некоторым шагом, для дискретных значений температуры, и потока воздуха.

Температурное поле $Y_1(x_j)$, поля скоростей $Y_2(x_j)$ и давлений $Y_3(x_j)$ в области D , которые возникают при тепловыделении в элементах батареи, в

общем случае, являются решением краевой задачи:

$$AY_i(x_j) = Q, \quad i = (1, 2, 3), j = (1, 2, \dots, m), \quad (1.7)$$

$$g_i(x_k), \quad k = (1, 2, \dots, n), \quad (1.8)$$

где A – дифференциальный оператор в частных производных;

$g_i(x_k)$ – функции ограничений, начальных условий и условий на границах;

m – количество входных параметров;

n – количество ограничений и условий на границах;

Q – функция объемного распределения скорости генерации тепла.

Для решения задача оптимизации используют методы:

- полного перебора,
- отсечений,
- локализации решений,
- последовательных приближений.

Также эффективность охлаждения зависит от компоновки элементов Li-ion батареи – величины зазоров между элементами батареи. Оптимальная величина зазора между элементами батареи может быть найдена в результате моделирования тепловых и гидроаэродинамических процессов для оптимальных параметров входного потока воздуха и набора дискретных значений величины зазора. Минимальная и максимальная величина зазора определяется максимальной скоростью потока воздуха (шум) и размером батарейного модуля (как можно компактней), соответственно. При этом, естественно может потребоваться корректировка оптимальных параметров воздушного потока. Таким образом, могут быть найдены ограничения на два выходных фактора, обеспечивающие оптимальные условия эксплуатации Li-ion батареи.

Следующим шагом будет выполнение моделирования тепловых процессов в Li-ion батареи с многоканальной периодической структурой поверхностей для нахождения эффективности охлаждения Q/ITD . При этом,

диапазон параметров входного потока воздуха, тоже, может корректироваться. Зазор между элементами необходимо оставить минимальным и равным оптимальной величине для плоских поверхностей элементов.

Для оптимизации конструкции батарейного модуля используются поисковые методы оптимизации, основанные на пошаговом изменении управляемых параметров:

$$X_{m+1} = X_m + \Delta X_m, \quad (1.9)$$

где ΔX_m – приращение вектора управляемых параметров:

$$\Delta X_m = h\phi(X_m), \quad (1.10)$$

где X_m – значение вектора управляемых параметров на m – том шаге;

h – шаг;

$\phi(X_m)$ – направление поиска.

Методы оптимизации классифицируются как: многомерная оптимизация, условная оптимизация, одноэкстремальная, оптимизация с локальным экстремумом, оптимизация нулевого порядка (производные не используются). Выбор метода зависит от следующих факторов: способа вычисления направления поиска $\phi(X_m)$, способа выбора шага h , способа выбора окончания поиска.

При оптимизации конструкции батарейного модуля основным фактором является способ вычисления направления поиска. Оптимальный шаг выбирается как для одномерной оптимизации при поиске минимума целевой функции в выбранном направлении $\phi(X_m)$. Поиск прекращается, если на протяжении k подряд шагов траектория поиска остается в малой ϵ – окрестности текущей точки поиска. Условие окончания поиска имеет вид:

$$|X_m - X_{m-k}| < \varepsilon. \quad (1.11)$$

В случае монотонной зависимости целевой функции по каким-то параметрам, поиск прекращается при достижении граничных значений параметра.

В результате, задача поиска максимума целевой функции $\Psi(X)$ решается при нахождении параметров входного потока воздуха, параметров конструкции батарей и видов поверхностей элементов для обеспечения максимального значения эффективности охлаждения.

1.5 Постановка цели и задачи исследования

Разработка и создание новых транспортных средств, накопителей электроэнергии при использовании нетрадиционных источников энергии и других технических средств выдвигает необходимость создания больших энергоемких аккумуляторных батарей. Создание новых систем питания связано с разработками самих источников энергии, систем диагностики, обеспечения наилучших режимов эксплуатации, надежности, ресурса работы, небольшой стоимости и ряда других характеристик.

В диссертационной работе исследуются тепловые процессы в системе управления тепловым режимом Li-ion батареи воздушным потоком. Выбор наиболее эффективного теплового режима является одним из важных факторов при разработке системы управления тепловым режимом батареи. Исследование тепловых процессов в системе управления тепловым режимом батареи и оптимизация параметров системы можно разбить на несколько этапов:

- создание геометрической и математической модели, описание физических процессов объекта проектирования;
- создание или выбор программного обеспечения для решения задачи сопряженного теплообмена;
- оптимизация вычислений и параметров объекта проектирования;

– решение задачи, анализ полученных результатов, корректировка геометрической и математической модели.

Данные об объекте проектирования, условия и режимы работы оборудования являются влияющими факторами. Влияние различных факторов на объект проектирования можно определить, используя методы системного анализа [87, 88]. Выходными факторами разработки системы управления тепловым режимом Li-ion батарей воздушным потоком являются независимые друг от друга:

- компоновка элементов Li-ion батареи;
- параметры воздушных потоков;
- поверхности элементов батареи, улучшающие теплообмен.

Решение задачи оптимизации системы управления тепловыми процессами осуществляется поисковыми методами на основании опыта разработчика и использования литературных данных. Эффективность охлаждения Li-ion батареи зависит от характеристик воздушного потока (температура, скорость и другие факторы), характеристик элементов батареи (размеры, форма, форма охлаждаемой поверхности, теплоемкость, масса, теплопроводность, зависимость выделяемого тепла от температуры, изношенности и другие факторы), конструктивных особенностей сборки элементов Li-ion батареи.

Таким образом, цель данной работы является математическое моделирование процессов охлаждения Li-ion батарей воздушным потоком, с поверхностями, улучшающими теплообмен, оптимизация конструкции батареи и параметров потока воздуха, сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ существующих методов охлаждения Li-ion батарей;
- разработать математические модели тепловых процессов при охлаждении воздушным потоком Li-ion батарей, имеющих на поверхностях

элементов сложную многоканальную структуру;

– выполнить численное моделирование тепловых процессов при охлаждении элементов Li-ion батареи, оптимизировать параметры конструкции модулей батареи, воздушного потока и определить требования к тестовому оборудованию;

– разработать математическую модель процесса охлаждения Li-ion батарей с помощью тепловой трубки;

– измерить эффективность охлаждения Li-ion батарей на разработанном стенде и сравнить полученные эффективности охлаждения с данными моделирования;

– разработать многоканальную систему измерения температуры на поверхностях имитаторов Li-ion;

– разработать метод измерения средней температуры на поверхностях имитаторов Li-ion;

– разработать программные модули обработки данных в пакете LabView для многоканальной системы измерения температуры.

Выводы по разделу 1

Проведенный анализ использования Li-ion батареи позволяет сделать следующие выводы:

– Li-ion батареи в настоящее время наиболее перспективные для применения в гибридных и электроприводных транспортных средствах и авиации;

– эффективность систем теплового управления батареей определяется обеспечением режима эксплуатации, при котором создаются условия минимальной эксплуатационной стоимости при максимальном ресурсе использования. Для этого в системе теплового управления должны быть данные текущего состояния батарей и внешней среды и данные для всего диапазона условий эксплуатации, чтобы прогнозировать режим работы систем

охлаждения или нагрева;

– разработка таких систем связана с исследованием тепловых процессов системы охлаждения путем математического моделирования, верификацией полученных данных с экспериментальными результатами и отбором наилучших технических. Увеличение эффективности охлаждения воздушным потоком может быть достигнуто при использовании поверхностей элементов батареи со сложной многоканальной структурой.

Задача включает в себя.

1. Выполнение моделирования тепловых процессов при охлаждении элементов Li-ion батареи потоком воздуха и определение основных характеристики выходного воздушного потока стенда.

2. Выполнение моделирования процесса охлаждения воздушным потоком Li-ion батареи имеющих сложную многоканальную структуру поверхностей.

3. Моделирования процесса охлаждения Li-ion батарей с помощью тепловой трубки.

4. Разработку стенда для исследования эффективности охлаждения Li-ion батарей.

5. Разработку камеры для исследования процесса охлаждения батареи.

6. Разработку имитаторов элементов Li-ion батареи с теплотехническими характеристиками элементов батареи.

7. Разработку многосекционной тепловой трубки.

8. Разработку многоканальной системы измерения температуры и программных модулей для работы в пакете LabView.

9. Экспериментальное исследование процесса охлаждения модуля Li-ion батарей тепловой трубкой.

10. Экспериментальное исследование процесса охлаждения модуля Li-ion батарей со сложной многоканальной структурой поверхностей ее элементов. Сравнение экспериментальных результатов с расчетами процесса охлаждения Li-ion батарей воздушным потоком.

Основные положения раздела изложены в работах [3, 6, 8].

РАЗДЕЛ 2

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ Li-ion БАТАРЕИ

2.1 Математическое моделирование процессов теплообмена и гидрогазодинамики

Вычислительная гидрогазодинамика – *CFD* (Computational Fluid Dynamics), определяется как набор методологий для компьютерного численного моделирования потоков жидкости или газа [92].

Метод *CFD* основан на дискретизации – замене непрерывной области массивом точек, для которых ищутся решения уравнений, описывающих процесс. Производные в уравнениях аппроксимируются конечными разностями и решение уравнений в частных производных сводится к решению системы алгебраических уравнений [93]. Стационарные задачи обычно приводят к системам уравнений, которые необходимо одновременно решать для всей расчетной области с учетом граничных условий. Маршевые задачи часто описываются системой уравнений, которые можно решать последовательно.

Программные пакеты, в которых используется *CFD*, позволяют проводить точное моделирование гидроаэродинамических задач. Наиболее популярными *CFD*-пакетами являются Ansys CFX, Fluent, FlowVision, Flow-3D, STAR-CD, SolidWorks Flow Simulation. Компоненты *CFD* определяются следующим образом.

1. Выбор математической модели для наиболее точного описания реальной системы.
2. Генерации сетки для дискретизации пространства моделирования и численная модель.
3. Анализ численной модели, определение устойчивости вычислительного процесса и точности решения.
4. Выбор наиболее подходящих методов интегрирования по времени и

методов ускорения сходимости.

5. Графическое представление полученных результатов моделирования для интерпретации полученных результатов.

2.1.1 Процессы тепломассопереноса при воздушном охлаждении

Движение газообразных, жидких и твердых деформированных тел изучается в разделах механики – механике сплошных сред. В механике сплошных сред за основу принимается гипотеза о непрерывном распределении в пространстве среды и ее физических свойств. При описании движения такой среды может быть использован метод Лагранжа, в котором используется описание движения материальных частиц среды и метод Эйлера, основанный на описании поведения сплошной среды в фиксированных точках пространства.

В первом случае кинетические уравнения движения записываются в форме:

$$x_i = x_i(a_1, a_2, a_3, t), \quad (2.1)$$

Во втором случае:

$$u_i = \partial x_i / \partial t = u_i(x_1, x_2, x_3, t), \quad (2.2),$$

где x_i – координаты (a_1, a_2, a_3) i –той частицы как функция времени – t ;

u_i – поле вектора скорости – \vec{u} с проекциями u_1, u_2, u_3 .

В реальных жидкостях при разных скоростях движения слоев жидкости возникает сила внутреннего трения. Эта касательная сила (касательные напряжения), действует в любой точке потока, в плоскости, ориентированной по течению, пропорциональна изменению скорости в направлении нормали к направлению движения (скорость деформации сдвига).

Если в среде касательные напряжения линейно пропорциональны скоростям деформации сдвига, то такие среды называют ньютоновскими жидкостями (несжимаемая жидкость):

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}, \quad (2.3)$$

где τ – касательные напряжения, μ – динамическая вязкость жидкости;

$\frac{du}{dy}$ – градиент скорости, перпендикулярный к касательным напряжениям.

Уравнения динамики жидкости основаны на законах сохранения массы (уравнение неразрывности), количества движения (импульса) и энергии. Применение закона сохранения массы к потоку жидкости, протекающей через бесконечно малый объем дает уравнение сохранения массы:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) = 0, \quad (2.4)$$

где ρ – плотность жидкости, \vec{v} – ее скорость;

$\vec{\nabla}$ – оператор Гамильтона:

$$\vec{\nabla} = \left(\frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k} \right). \quad (2.5)$$

Первый член уравнения (2.4) – изменение плотности в малом объеме, второй – поток массы через поверхность этого объема в единицу времени отнесенные к единице объема.

В гидрогазодинамике система дифференциальных уравнений в частных производных, описывающая движение вязкой несжимаемой жидкости называется уравнения Навье - Стокса [97] и записываются в векторном виде

как:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -(\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \vec{v} + \frac{\mu}{\rho} \vec{\nabla}^2 \vec{v} - \frac{1}{\rho} \vec{\nabla} p + \vec{f}, \quad (2.6)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{v} = 0, \quad (2.7)$$

где \vec{f} вектор внешних сил.

Уравнения Навье - Стокса являются одними из важнейших в гидрогазодинамике и применяются в математическом моделировании. Уравнение (2.6) называется уравнение движения, а (2.7) – неразрывности.

2.1.2 Математические модели потоков воздуха и теплообмена

Уравнения, описывающие поведение физических систем, в большинстве случаев не имеют аналитических решений и, следовательно, ищутся приближенные численные решения [98]. Другой проблемой является сложность подробного описания эволюции системы. Определение пределов приближения расчетов к реальному поведению физических систем определяется существующими вычислительными средствами, и они расширяются с развитием компьютерной техники.

На молекулярном уровне для описания движение отдельных молекул используются фундаментальные переменные, такие как скорость, импульс, энергия, число частиц в единице объема и других переменных, определяющих движение отдельных молекул. В то же время давление, температура, вязкость, представляют собой средние свойства, которые выводятся из других переменных, более основных на этом уровне приближения.

Динамика жидкости начинает существовать, как только взаимодействие между достаточно большим числом частиц становится доминирующим и влияет на движение каждой отдельной частицы. Следовательно,

газодинамика, по существу, изучение интерактивного движения и поведения большого числа отдельных элементов. Существенным шагом в газодинамике является процесс усреднения – нахождения компромисса между требуемым уровнем точности и степени сложности выбранной математической модели.

Пространственный уровень приближения определяет число пространственных переменных, используемых в модели в зависимости от определенных предположений о физическом поведении системы, и использовать одно или двумерное описание, если в этом случае предоставляется достаточно точная информация о поведении потока.

Следующий уровень приближения, «динамический уровень», связан с оценкой относительного влияния различных сил и их компонентов на поведение системы. Поэтому, очень принципиальный шаг в создании математической модели является оценка доминирующих силовых компонентов для упрощения модели. Например, хотя гравитационные силы всегда присутствуют на земле, во многих случаях эти силы имеют лишь незначительное влияние на поведение потока.

В результате решения задач газодинамики в *CFD* появился новый подход и новый взгляд на законы механики жидкости. Несмотря на то, что эти законы могут быть записаны во многих различных математических формах, в *CFD* возникла специфическая форма этих законов, на основе концепции сохранения и законов сохранения [99,100]. Такая форма записи является фундаментальной для *CFD*, поскольку уравнения дискретизируются и основные величины, такие как масса или энергия будут сохраняться и на дискретном уровне. Законы сохранения тесно связаны с концепцией потоков.

Физическая величина – Φ это количественная характеристика, какого то физического явления. Распределение физической величины (массы, скорости, температуры, давления и др.) – совокупность значений этой величины в каждой точке пространства. Если физическая величина характеризуется одним числом (масса, температура, плотность, давление), то такая величина скалярная. Если

физическая величина кроме числового значения, характеризуется и направлением (скорость, ускорение, сила), то она называется векторной.

Скаляр или вектор иногда называют тензором нулевого или первого ранга соответственно. Движение материальной точки или абсолютно твердого тела описывается скалярными и векторными величинами. Для описания динамики движения жидкости требуются использование тензоров более высокого ранга.

В *CFD* основные законы, регулирующие потоки жидкости и газов, представляются в виде концепции сохранения и законов сохранения для контролируемого объема Ω . Закон сохранения для физической величины – Φ в объеме – Ω может быть сформулирован как:

Изменение суммарного количества физической величины в фиксированном объеме равно разнице между входящим и выходящим количеством плюс вклад от генерирующих источников.

Законы, описывающие эволюцию потока жидкости и газа, полностью определяются сохранением следующих трех величин: массы, момента и энергии.

С другой стороны, важно иметь в виду, что другие величины, такие как давление, температура, энтропия, например, не удовлетворяют закону сохранения. Это не означает, что нельзя написать уравнение для этих величин, это просто означает, что уравнения не будут написаны в виде закона сохранения.

Если \bar{U} – плотность воздуха, \bar{F} – тензор потока воздуха, \bar{Q}_V – объемный источник генерации тепла и \bar{Q}_S – источник на поверхности, то для объема – Ω закон сохранения физической величины – Φ можно записать в прямоугольной системе координат в интегральном виде:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \bar{U} d\Omega + \int_S \bar{F} \cdot d\vec{S} = \int_{\Omega} \bar{Q}_V d\Omega + \int_S \bar{Q}_S \cdot d\vec{S}. \quad (2.8)$$

В дифференциальном виде:

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\vec{F} - \vec{Q}_S) = \vec{Q}_V, \quad (2.9)$$

где $\vec{\nabla} = \frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k}$.

Используя общий вид законов сохранения (2.8) и (2.9), можно записать интегральные и дифференциальные уравнения сохранения в неподвижной системе координат для потока плотности массы $\vec{U} = \rho$:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho d\Omega + \int_S \rho \vec{v} \cdot d\vec{S} = 0, \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) = 0, \quad (2.11)$$

и во вращающейся системе координат:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho d\Omega + \int_S \rho \vec{w} \cdot d\vec{S} = 0, \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{w}) = 0, \quad (2.13)$$

где ρ – плотность массы;

\vec{v} – скорость в неподвижной системе координат;

$\vec{v} = \vec{u} + \vec{w}$, \vec{w} – скорость во вращающейся системе координат;

$\vec{u} = \vec{\omega} \times \vec{r}$, $\vec{\omega}$ – угловая скорость;

\vec{r} – радиус вектор.

Для закона сохранения импульса интегральные и дифференциальные

уравнения в неподвижной системе координат будут:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho \vec{v} d\Omega + \oint_S \rho \vec{v} (\vec{v} \cdot d\vec{S}) + \oint_S p \cdot d\vec{S} - \oint_S \vec{\tau} \cdot d\vec{S} = \int_{\Omega} \rho \vec{f} d\Omega, \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial \rho \vec{v}}{\partial t} + \rho (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \vec{v} + \vec{\nabla} p - \vec{\nabla} \vec{\tau} = \rho \vec{f}_e, \quad (2.15)$$

а для вращающейся системе координат:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho \vec{w} d\Omega + \oint_S \rho \vec{w} (\vec{w} \cdot d\vec{S}) + \oint_S p \cdot d\vec{S} - \oint_S \vec{\tau} \cdot d\vec{S} = \\ = \int_{\Omega} \rho [\vec{f}_e - 2(\vec{\omega} \times \vec{w}) - \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r})] d\Omega, \end{aligned} \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial \rho \vec{w}}{\partial t} + \rho (\vec{w} \cdot \vec{\nabla}) \vec{w} + \vec{\nabla} p - \vec{\nabla} \vec{\tau} = \rho [\vec{f}_e - 2(\vec{\omega} \times \vec{w}) - \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r})], \quad (2.17)$$

где $\rho \vec{v}$ плотность вектора \vec{v} ;

$\vec{\tau}$ – тензор вязких напряжений;

\vec{f}_e – внешние объемные силы;

p – давление.

Для закона сохранения энергии интегральные и дифференциальные уравнения в неподвижной системе координат будут:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho E d\Omega + \oint_S (\rho H \vec{v} - k \vec{\nabla} T - \vec{\tau} \cdot \vec{v}) \cdot d\vec{S} = \\ = \int_{\Omega} (\rho \vec{f}_e \cdot \vec{v} + q_H) d\Omega, \end{aligned} \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v} H - k \vec{\nabla} T - \vec{\tau} \cdot \vec{v}) = F_f + q_H, \quad (2.19)$$

где q_H – внешние источники тепла;

$F_f = \rho \vec{f}_e \cdot \vec{v}$ – работа внешних сил;

T – абсолютная температура;

k – коэффициент теплопроводности;

$H = h + \vec{v}^2 / 2$ – полная энтальпия;

$h = (e + p/\rho)$ – энтальпия жидкости;

$E = e + \vec{v}^2 / 2$ – полная энергия (внутренняя + кинетическая);

и во вращающейся системе координат:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho E^* d\Omega + \int_S (\rho \vec{w} \xi - h \vec{\nabla} T - \vec{\tau} \cdot \vec{w}) \cdot d\vec{S} = \int_{\Omega} (\rho \vec{f}_e \cdot \vec{\omega} + q_H) d\Omega, \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial \rho E^*}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{w} \xi - k \vec{\nabla} T - \vec{\tau} \cdot \vec{v}) = F_f^{rel} + q_H, \quad (2.21)$$

где $E^* = e + \frac{\vec{w}^2}{2} - \frac{\vec{u}^2}{2} = E - \vec{u} \cdot \vec{v}$ – полная энергия;

$\xi = h + \frac{\vec{w}^2}{2} - \frac{\vec{u}^2}{2} = H - \vec{u} \cdot \vec{v}$ – полная энтальпия;

$F_f^{rel} = \rho \vec{f} \cdot \vec{w}$ – работа внешних сил в относительной системе координат.

Дифференциальные уравнения сохранения массы, импульса и энергии – основные уравнения, описывающие динамику жидкости, и называют их *уравнением непрерывности, уравнением движения жидкости и первым началом термодинамики*, соответственно. В трехмерном случае уравнения могут быть компактно записаны в виде одного векторного уравнения:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} + \frac{\partial H}{\partial z} = 0, \quad (2.22)$$

где

$$q \equiv \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ E \end{bmatrix}, \quad F \equiv \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p - \tau_{xx} \\ \rho uv - \tau_{xy} \\ \rho uw - \tau_{xz} \\ (E + p - \tau_{xx})u - \tau_{yx}v - \tau_{zx} + \dot{Q}_x \end{bmatrix},$$

$$G \equiv \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho vu - \tau_{yx} \\ \rho v^2 + p - \tau_{yy} \\ \rho vw - \tau_{yz} \\ (E + p - \tau_{yy})v - \tau_{xy}u - \tau_{zy}w + \dot{Q}_y \end{bmatrix},$$

$$H \equiv \begin{bmatrix} \rho w \\ \rho wu - \tau_{zx} \\ \rho wv - \tau_{yz} \\ \rho w^2 + p - \tau_{zz} \\ (E + p - \tau_{zz})w - \tau_{xz}u - \tau_{yz}v + \dot{Q}_z \end{bmatrix},$$

где u, v, w – компоненты вектора скорости $-\vec{v}$;

$$E = \sigma[e + 0.5(u^2 + v^2 + w^2)];$$

$\sigma = \sigma(x, y, z, t)$ – плотность;

$\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yy}, \tau_{yx}, \tau_{yz}, \tau_{zx}, \tau_{zy}, \tau_{zz}$ – компоненты тензора вязких

напряжений;

e – удельная внутренняя энергия;

$p = p(x, y, z, t)$ – давление;

$\dot{Q}_x, \dot{Q}_y, \dot{Q}_z$ – компоненты теплового потока.

Для решения задач в *CFD* используются такие методы, как метод конечных разностей (*KP*), метод конечных объемов (*KO*) и метод конечных элементов (*KЭ*). Метод конечных разностей основан на аппроксимации

производных, входящих в исходные дифференциальные уравнения, их дискретными (разностными) аналогами. Достоинствами (*KP*) являются высокая эффективность и простота реализации. Однако требуется использование достаточно «хорошей» регулярной сетки – почти ортогональной и с плавно меняющимися размерами ячеек. Поэтому применение (*KP*) ограничено сравнительно простой по геометрии расчетных областей.

В методе (*KO*) используются интегральные формулировки законов сохранения массы, импульса, энергии и др. Уравнения сохранения записываются для небольшого контрольного объема. Дискретный аналог уравнений получается суммированием по всем граням выделенного объема потоков массы, импульса и т.д., вычисление которых могут быть выполнены по каким-либо квадратурным формулам [97]. Интегральная формулировка законов сохранения не делает ограничений на форму контрольного объема. Метод (*KO*) используется для дискретизации уравнений гидрогазодинамики на структурированных и неструктурированных сетках с различной формой ячеек и позволяет полностью решить задачу в сложной геометрии расчетной области.

В методе (*KЭ*) решается вариационная задача о минимуме ошибки аппроксимации искомого решения базисными функциями. Эта дополнительная математическая нагрузка, делающая метод (*KЭ*) более сложным, отсутствие явных преимуществ по сравнению с методом (*KO*) и трудностями обеспечения необходимой точности описания тонких пограничных слоев является причиной относительно малой популярности (*KЭ*) в вычислительной гидрогазодинамике.

На рис. 2.1 приведена структура программы математического моделирования в *CFD* с использованием метода (*KO*).

После постройки геометрической модели, для которой необходимо решить гидрогазодинамическое моделирование, определяется область расчетов, строится сетка в этой области, задаются физические характеристики, начальные и граничные условия. Следующими шагами будет выбор алгоритмов расчетов, решение математической модели физических процессов, интерпретация и визуализация расчетов [101].

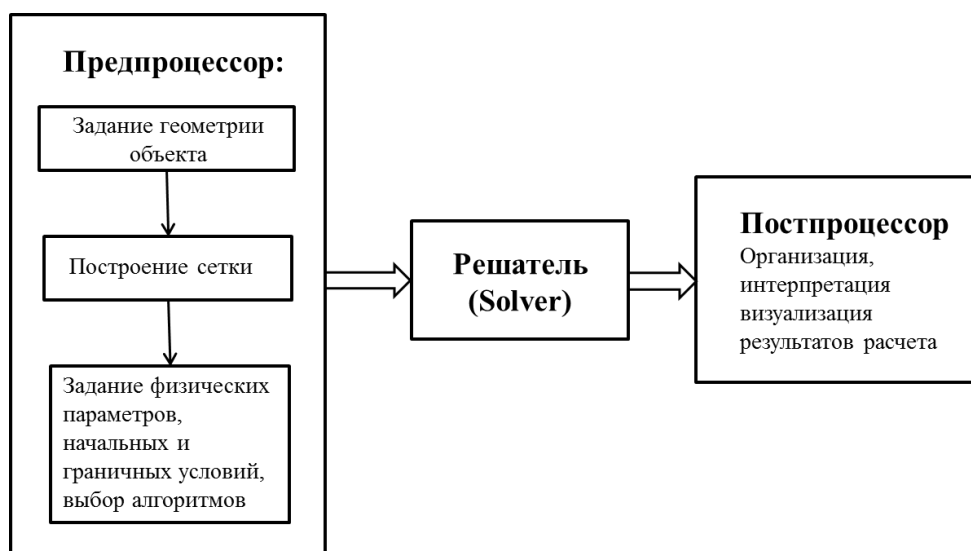


Рисунок 2.1 – Структура программы моделирования в *CFD*

Идеальная сетка является декартовым распределением, где все точки находятся на одинаковом расстоянии и где все ячейки являются идеальными кубиками, с $\Delta x = \Delta y = \Delta z$. Такая сетка обеспечивает использование дискретных формул с максимально возможной точностью. Метод конечных объемов приводит к тем же формулам, что и метод конечных разностей. Такой метод позволяет построить консервативные разностные схемы, т.е. схемы для которых выполняются сеточные аналоги законов сохранения.

Когда в геометрической модели есть изогнутые поверхности, они не могут быть частью декартовых линий сетки. Поэтому необходимо сохранить декартову структуру сетки или ввести криволинейные сетки, чтобы линии сетки соответствовали твердым поверхностям. В первом случае необходимо применить вычисление для неполных ячеек. Во втором случае необходимо генерировать сетки, которые совпадают с поверхностями.

Для описания охлаждения потоком воздуха Li-ion батареей основными математическими уравнениями являются уравнения диффузии, конвекции и уравнения течения (уравнения Навье-Стокса).

Основные уравнения нестационарной газогидродинамики, уравнение сохранения массы, импульса и энергии текучей среды в объеме Ω с площадью

поверхности S могут быть представлены в интегро-дифференциальной форме:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \bar{U} d\Omega + \int_S \bar{F} \cdot d\bar{S} = \int_{\Omega} \bar{Q} d\Omega, \quad (2.23)$$

где t – время;

\bar{U} – вектор скалярных независимых переменных течения в данной области;

\bar{F} – вектор потоков физических величин через поверхность S данной области, элементы которой в этом уравнении – векторы $d\bar{S}$ направленные наружу области по нормали к этой поверхности;

Q – источники, расположенные внутри данной области.

Система уравнений (2.23) приводится к дискретному виду – к алгебраическому, и записывается для (KO) областей дискретного решения [102]. Если дискретное решение определяется в ячейках расчетной сетки (как средняя величина по ячейке)? то контрольным объемом есть сама ячейка.

Для n ячейки величина U_n в этой ячейке имеет следующий алгебраический вид:

$$\frac{\partial}{\partial t} (U_n \Omega_n) = -\sum_{m=1}^M (\bar{F}_m \cdot d\bar{S}_m) + Q_n \Omega_n, \quad (2.24)$$

где Ω_n – объем ячейки (KO) ;

$d\bar{S}_m$ – площадь m – й грани данного (KO) ;

\bar{F}_m – поток через эту грань;

M – число граней контрольного объема;

Q_n – величина источника в данном контрольном объеме.

В декартовой системе координат область решения уравнений разобьем на элементы протяженностью Δx вдоль оси x , шириной Δy вдоль оси y и высотой – Δz вдоль оси z . Узлы сетки пронумеруем символом i по оси x , символом j по

оси y и символом k по оси z . Схема разбиения приведена на рис. 2.2.

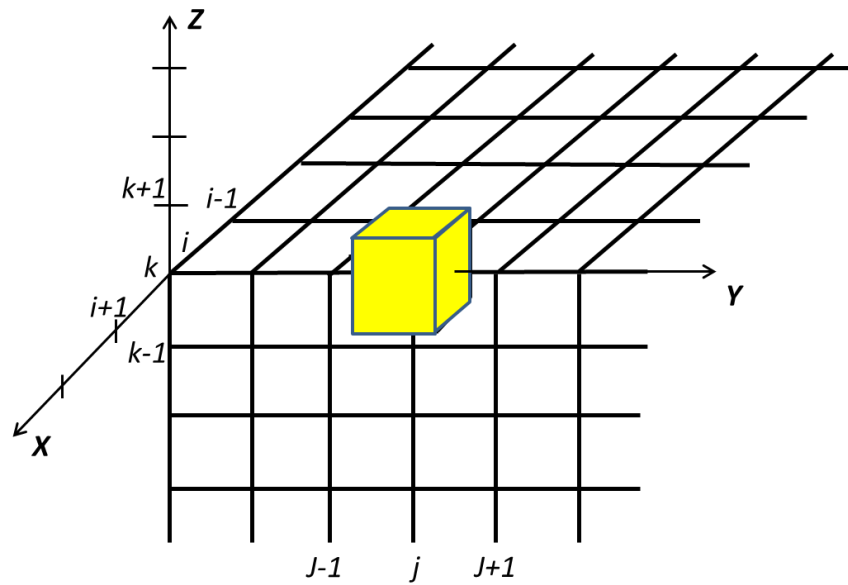


Рисунок 2.2 – Схема дискретизации расчетной области в декартовой системе координат

Для узла с координатами (i, j, k) объем ячейки Ω_{ijk} определяется как параллелепипед с ребрами равными i, j, k и ориентацией граней параллельно осям координатной системы. Центр такой ячейки находится в узле сетки. U – в общем случае функция времени и координат. При численном решении временных задач на конечном интервале времени, выполняется дискретизация по времени. Для этого можно ввести временную сетку $\{0 = t_0, t_1, t_2, \dots, t_\kappa = t\}$ и задача будет решаться для всех $U_n^{t_\kappa}$. В полученных уравнениях операторы дифференцирования (2.24) заменяются на их дискретные аналоги (2.25), (2.26).

Для первой центральной частной производной по x в первом приближении дискретный двумерный аналог будет:

$$(u_x)_{ij} = \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_{ij} = \frac{u_{i+1,j} - u_{i-1,j}}{\Delta x} + O(\Delta x), \quad (2.25)$$

а по y :

$$(u_y)_{ij} = \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_{ij} = \frac{u_{i,j+1} - u_{i,j-1}}{\Delta y} + O(\Delta y). \quad (2.26)$$

Для второй центральной частной производной по x (2.24) дискретный двумерный аналог будет следующий вид:

$$(u_{xx})_{ij} = \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right)_{ij} = \frac{u_{i+1,j} - 2u_{ij} + u_{i-1,j}}{\Delta x} - \frac{\Delta x^2}{12} \left(\frac{\partial^4 u}{\partial x^4} \right)_{ij}, \quad (2.27)$$

соответственно, по y :

$$(u_{yy})_{ij} = \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)_{ij} = \frac{u_{i,j+1} - 2u_{ij} + u_{i,j-1}}{\Delta y} - \frac{\Delta y^2}{12} \left(\frac{\partial^4 u}{\partial y^4} \right)_{ij}. \quad (2.28)$$

Аналог оператора Лапласа $\Delta u = u_{xx} + u_{yy}$ для $\Delta x = \Delta y$ запишется в виде:

$$\Delta u_{ij} = \frac{u_{i+1,j} + u_{i-1,j} + u_{i,j+1} + u_{i,j-1} - 4u_{ij}}{\Delta y} - \frac{\Delta x^2}{12} \left(\frac{\partial^4 u}{\partial x^4} \right)_{ij}. \quad (2.29)$$

Таким образом, заменив операторы дифференцирования на их дискретные параметры, получим n наборов алгебраических уравнений движения и тепломассопереноса.

Вычисления начинаются с заданием начальных условий и условий на границах. На следующем шаге вычисления начинаем с использованием полученных данных. Задача выполняется до достижения критериев сходимости или выполнения заданного числа проходов.

2.1.3 Методы математического моделирования теплообмена и гидрогазодинамики в SolidWorks Flow Simulation

Программный продукт SolidWorks создавался как система автоматизированного проектирования и моделирования в машиностроении. SolidWorks содержит большой набор инструментов для разработки сборок и объектов [103]. В SolidWorks позволяет создавать и модифицировать сборки, имеет много трансляторов из CAD – систем, а также из универсальных графических форматов.

В SolidWorks интегрированы расчетные модули семейства Simulation:

- SolidWorks Simulation;
- SolidWorks Motion;
- SolidWorks Flow Simulation.

В SolidWorks входит ряд других моделей, обеспечивающих статические проверки, связь с базой данных стандартных изделий и свойств материалов и другие. Для моделирования тепловых процессов и гидрогазодинамики используется SolidWorks Flow Simulation [104].

При работе с SolidWorks Flow Simulation можно выделить пять основных функций:

- создание геометрии;
- генерация сетки;
- задание физических свойств;
- решение системы;
- визуализация результатов.

SolidWorks Flow Simulation позволяет изучать потоки для различных жидкостей и различных видов теплопередачи:

- внешние и внутренние потоки жидкости;
- стационарные и зависящие от времени потоки жидкости;
- сжимаемый газ и несжимаемые потоки жидкости;
- дозвуковые, околосзвуковые и сверхзвуковые потоки газа;

- свободная, принудительная и смешанная конвекция;
- потоки жидкости с приграничным слоем, включая эффекты шероховатости стенок;
- ламинарные и турбулентные потоки жидкости;
- различные жидкости и многокомпонентные тела;
- потоки жидкостей с движущимися/вращающимися поверхностями и/или частями;
- теплообмен в жидкостях, твердых и рыхлых средах или без сопряженного теплообмена и/или наличием контакта с тепловым сопротивлением и/или теплопередачи излучением между твердыми телами (некоторые тела могут быть прозрачными для излучения) и/или объемные (поверхностные) источники тепла и др.;
- нагрев токами в проводящих телах;
- разные теплопроводности в твердых средах (изотропная, однонаправленная, двухосная/асимметричная или ортогональная);
- потоки жидкости и теплопередача в пористых средах;
- потоки не ньютоновской жидкости;
- потоки сжимаемой жидкости;
- реальные газы;
- кавитация в несжимаемых потоках воды;
- равновесная объемная конденсация воды из потока и воздействие на поток жидкости и теплопередачу;
- относительная влажность в газах и смеси газов;
- двух фазные потоки (жидкость и частицы);
- границы с периодической структурой.

SolidWorks Flow Simulation позволяет устанавливать различные свойства потока на впускных и выпускных отверстиях модели. В таблице 2.1 приведен набор характеристик потоков на входных и выпускных отверстиях модели.

Flow Simulation включает следующие функции для просмотра результатов:

- эпюры, эпюры трехмерных профилей, эпюры вырезов, эпюры поверхностей;
- анимации, траектории потока, цели, изометрические поверхности;
- исследование частиц, эпюры XY, отчеты, параметры точки, поверхности и объема.

Таблица 2.1 – Характеристики потоков на входных и выпускных отверстиях модели

Для впускных и выпускных отверстий	Только для впускного отверстия
Масса и объем	Профиль скорости потока, линия завихрения или вектор
Объемный расход	Температура
Скорость	Состав (для сборок)
Число Маха	Параметры турбулентности
Статическое давление	
Общее давление	
Давление среды	
Давление на стенке	

При выполнении моделирования воздушного охлаждения в расчетном модуле SolidWorks Flow Simulation необходимо задать условия задачи, максимально приближенные к реальной конструкции и провести расчеты [12]. Расчетная методика содержит, во-первых, математическую модель рассчитываемых физических процессов и, во-вторых, способ решения этой математической задачи. Математические модели воздушного охлаждения представляют собой изначально краевые задачи, отражающих законы физики и механики с привлечением полуэмпирических и эмпирических констант и зависимостей.

Для выполнения моделирования в Flow Simulation создается трехмерная геометрическая модель исследуемого объекта. В Flow Simulation задаются

свойства среды, условия на границах, точность решения и геометрические размеры расчетной зоны. Flow Simulation автоматически анализирует геометрию объекта – внутреннюю или внешнюю, в зависимости от задачи.

В общем случае решить аналитически задачу динамики жидкости, используя систему дифференциальных уравнений, не представляется возможным. В SolidWorks Flow Simulation решение таких задач осуществляется численно, с использованием дискретизации, на конечные объемы (*КО*) [105]. Разбивка на *КО* осуществляется прямоугольной сеткой в прямоугольной системе координат со сторонами *КО* ортогональными осям Декартовой системы координат. Центры *КО* находятся на узлах сетки. Величины всех физических переменных рассчитываются для узлов сетки, а на гранях *КО* рассчитываются потоки массы, импульса, энергии, которые используются для расчета значений необходимых физических переменных.

Если в ходе решения задачи возникают большие градиенты, то в этих зонах сетка измельчается. Из расчета исключается область, занятая телом. Дискретизация на конечные объемы (*КО*) позволяет значительно ускорить расчеты без ухудшения точности и достоверности.

Дифференциально-интегральные уравнения (2.30) законов сохранения для *КО* преобразуются к дискретной форме (2.31):

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \vec{U} \cdot d\Omega + \int_S \vec{F} \cdot dS = \int_{\Omega} \vec{Q} \cdot d\Omega \quad , \quad (2.30)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\vec{U} \cdot \Omega) + \sum_S \vec{F} \cdot \vec{S} = \vec{Q} \cdot \Omega \quad , \quad (2.31)$$

где \vec{U} – вектор физических параметров;

Ω – величина *КО*;

\vec{F} – потоки;

S – площадь поверхности граней ячейки;

\bar{Q} – источники физической величины.

В ячейках, пересекающихся границей твердого тела и жидкости, вводятся дополнительные внутренние грани, и используется специальная процедура расчета граничных условий для этих граней.

Потоки \bar{F} , конвективные члены, операторы градиентов и дивергенции рассчитываются с использованием аппроксимаций второго порядка точности.

Дискретизация по времени осуществляется с шагом, который зависит от величины самой физической величины так и от шага дискретизации по пространству. Для расчета значений физических величин в следующем временном слое $(n+1)$ по известным значениям для предыдущего слоя (n) используется следующая система уравнений:

$$\frac{\bar{U}^* - \bar{U}^n}{\Delta t} + A_h(\bar{U}^n, p^n) \bar{U}^* = Q^n, \quad (2.32)$$

$$L\delta p = \frac{\text{div}_h(\bar{\rho u})^*}{\Delta t} + \frac{1}{\Delta t} \frac{\rho^* - \rho^n}{\Delta t}, \quad (2.33)$$

$$\rho^* = \varphi(p^n + \delta p, T^*, \eta^*), \quad (2.34)$$

$$(\bar{\rho u})^{n+1} = (\bar{\rho u})^* - \Delta t \cdot \text{grad}_h \delta p, \quad (2.35)$$

$$p^{n+1} = p^n + \delta p, \quad (2.36)$$

$$(\rho T)^{n+1} = (\rho T)^*; (\rho \kappa)^{n+1} = (\rho \kappa)^*; (\rho \varepsilon)^{n+1} = (\rho \varepsilon)^*; (\rho \eta)^{n+1} = (\rho \eta)^*, \quad (2.37)$$

$$\rho^{n+1} = \varphi(p^{n+1}, T^{n+1}, \eta^{n+1}), \quad (2.38)$$

где $\vec{U} = (\rho\vec{u}, \rho T, \rho k, \rho \varepsilon, \rho \eta)$ – вектор всех независимых переменных, кроме давления – p ;

\vec{u} – вектор скорости;

k – кинетическая энергия и ε – энергия диссипации турбулентности;

$\eta = (\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n)$ – вектор концентрации компонентов текучей среды;

$\delta p = p^{n+1} - p^n$ – поправка давления;

* – обозначает промежуточные значения переменных (между $n+1$ и n).

Дискретные операторы $A_h, \text{div}_h, \text{grad}_h, L_h = \text{div}_h \text{grad}_h$ аппроксимируют дифференциальные операторы с точностью второго порядка.

Сначала решаются уравнения (2.32) относительно промежуточных значений. Затем решается эллиптическое уравнение (2.33) относительно поправки δp . Значение всех остальных \vec{U} находится из (2.35 – 2.38).

Стационарные решения получаются в результате многократного повторения процесса решения задачи по времени. Количество проходов определяется исходя из получения дисперсии значений получаемых результатов меньше заданной величины, которая устанавливается либо вручную, либо автоматически, исходя из количества ячеек дробления.

Результаты расчетов сохраняются для всего заданного объема и могут быть представлены графически в виде зависимостей, распределений и т. д. заданных параметров.

2.2 Математическое моделирование тепловых и воздушных потоков в Li-ion батареях, выбор параметров стенда для исследования эффективности охлаждения Li-ion батарей

Математическое моделирование тепловых процессов при разработке теплового управления Li-ion батарей является важным этапом для нахождения необходимых технических решений и оптимизации параметров систем охлаждения транспортных средств [106].

Моделирование позволяет определить возможные характеристики разработки и уменьшить ее стоимость. Одной из необходимых характеристик системы воздушного охлаждения является применение наиболее эффективных конструктивных решений для передачи тепла, выделяемого в Li-ion батарее в поток воздуха. Li-ion батареи для электрических транспортных средств, как правило, состоят из большого числа отдельных элементов, размещенных в общем корпусе. С целью оптимизации времени вычисления в *CFD* – модели используются следующие упрощения:

- наличие однотипных элементов Li-ion батареи позволяет рассматривать тепловые процессы в зазоре только между двумя элементами батареи,
- симметрия теплоточков в элементах батареи позволяет рассматривать тепловые процессы в объеме равном половине элемента батареи,
- периодичность многоканальной структуры на поверхности элементов позволяет использовать при моделировании часть поверхности элемента батареи с ограниченным числом повторяющихся структур.

На рис. 2.3 приведена *CFD* – модель Li-ion батареи.

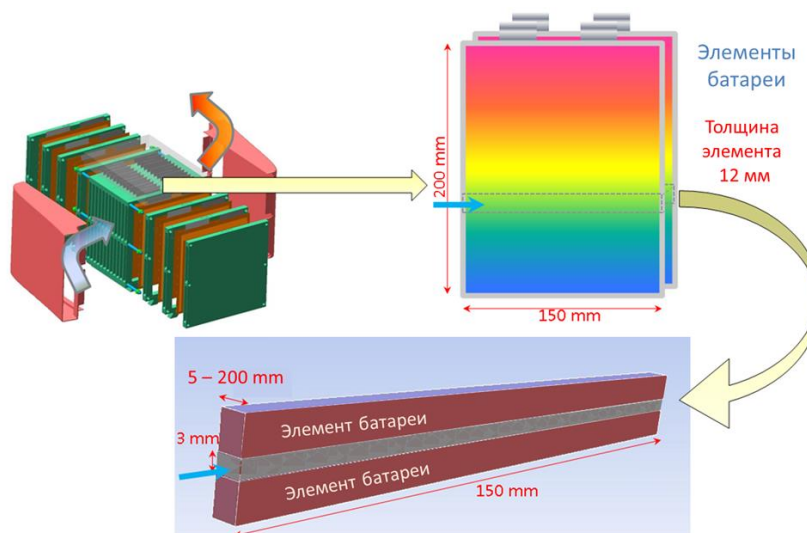


Рисунок 2.3 – *CFD* – модель Li-ion батареи

Для экспериментальной проверки результатов моделирования тепловых

процессов воздушного охлаждения Li-ion батарей необходима разработка стенда, в котором создаются потоки воздуха с заданными характеристиками.

2.2.1 Математическое моделирование процессов теплообмена с плоскими поверхностями элементов батареи

При воздушном охлаждении Li-ion батареи моделируется сопряженный теплообмен [8]. Внутри элементов батареи – теплопередача за счет теплопроводности, на поверхности – конвекция и диффузия, в потоке – теплообмен в движущемся воздухе. Простая геометрия (гладкие поверхности) является отправной точкой для исследований теплоотдачи.

Математическая модель батареи воспроизводит тепловые свойства реального элемента батареи, в частности, она имеет анизотропную теплопроводность [1, 5]. Элементы батареи имеют вид прямоугольных параллелепипедов со сторонами $150 \times 200 \times 12$ мм с теплопроводность $60 \text{ Вт}/(\text{м}\times\text{К})$ в продольных направлениях и $1 \text{ Вт}/(\text{м}\times\text{К})$ в поперечном направлении. Теплоемкость $0,8 \text{ кДж}/\text{кг}$. Тепловыделение в каждой ячейки модели 15 Вт .

Кроме того, чтобы уменьшить время вычислений рассматривался только внутренний объем половины каждого элемента батареи. Такое рассмотрение возможно для системы имеющей свойства симметрии. В этом случае в каждую половинку элемента батареи подавались тепловые мощности по 7.5 Вт , с однородным распределением по объему.

Основная генерация тепла в элементах батареи происходит при химической реакции вследствие заряда/разряда, нагреве электродов и электролита при прохождении через них тока (омический нагрев). Математические модели генерации тепла в элементах батарей приведены в [38, 42,44, 45]. В зависимости от задачи, в них используются те или иные упрощения, не влияющие на результат.

Зависимость тепловой мощности, генерируемой в элементах батареи, от

внутреннего сопротивления аккумулятора (первый член в уравнении) и изменения энтропии (второй член в уравнении) представлена уравнением [37]:

$$Q = I(U_0 - U) - I \left(T \frac{dU_0}{dT} \right), \quad (2.39)$$

где U_0, U – разность потенциалов на электродах элемента при отсутствии тока нагрузки и при токе нагрузки $-I$, соответственно;

T – температура элемента батареи.

На рис. 2.4 приведена геометрическая модель элемента Li-ion батареи.

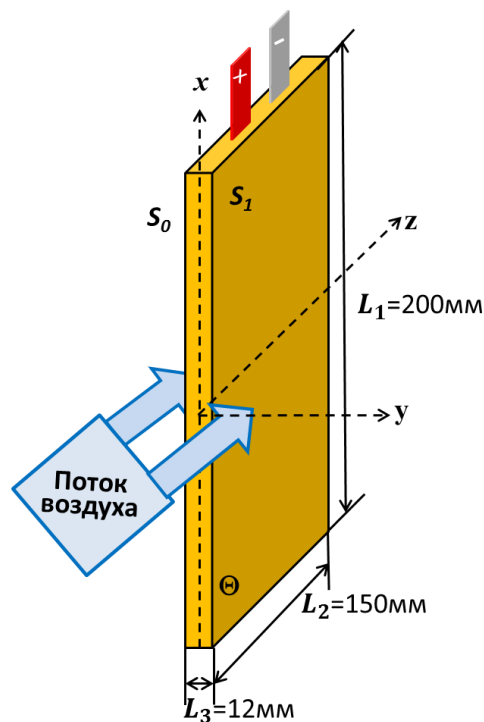


Рисунок 2.4 – Геометрическая модель элемента Li-ion батареи

Объем Θ ограничен шестью плоскостями:

- $Z = 0$ при $-0.5L_1 \leq X \leq 0.5L_1$, и $0 \leq Y \leq 0.5L_3$;
- $Z = L_2$ при $-0.5L_1 \leq X \leq 0.5L_1$, и $0 \leq Y \leq 0.5L_3$;
- $Y = 0$ при $X = 0.5L_1$, и $0 \leq Z \leq L_2$;
- $Y = 0.5L_3$ при $X = -0.5L_1$, и $0 \leq Z \leq L_2$;

– $X = -0.5L_1$ при $0 \leq Y \leq 0.5L_3$, и $0 \leq Z \leq L_2$;

– $X = 0.5L_1$ при $0 \leq Y \leq 0.5L_3$, и $0 \leq Z \leq L_2$;

Дифференциальное уравнение теплопередачи внутри элемента батареи в стационарном режиме и однородной генерации тепла для трехмерного случая может быть записано [46]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q - q_{conv} = 0, \quad (2.40)$$

при $0 \leq x \leq L_1$, $0 \leq y \leq L_2$, $0 \leq z \leq L_3$,

где $T(x, y, z)$ – температура;

k_x, k_y, k_z – компоненты теплопроводности;

q – скорость генерации тепла в единице объема аккумулятора;

q_{conv} – удельная скорость отвода тепла через поверхности аккумулятора путем конвекции;

L_1, L_2, L_3 – длина, ширина и толщина аккумулятора, соответственно.

Граничные условия для поверхности ΔS_1 – конвективный теплообмен.

$$\begin{cases} (\vec{q} \vec{n}) \Big|_{\Delta S_{cell}} = 0, \\ (\vec{q} \vec{n}) \Big|_{\Delta S_1} = \alpha(T_{cell} - T_{air}), \end{cases} \quad (2.41)$$

где $\vec{q} = -k\Delta T_{cell}$ – тепловой поток в элементе батареи;

k – теплопроводность;

\vec{n} – нормаль к внешней поверхности элемента;

α – конвективный коэффициент теплоотдачи;

T_{air} – температура воздуха в зазоре;

T_{cell} – температура элемента батареи.

Для остальных поверхностей ΔS_0 – адиабатические граничные условия.

Коэффициент теплоотдачи зависит от параметров движения воздуха и физических свойств элементов батареи.

Геометрическая модель Li-ион батареи из двух элементов с гладкими поверхностями представлена на рис. 2.5.

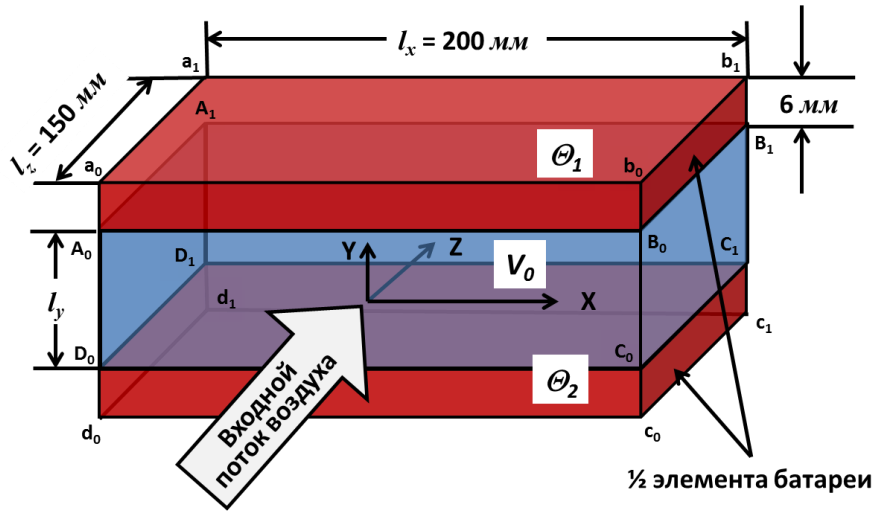


Рисунок 2.5 – Геометрическая модель Li-ион батареи из двух элементов с гладкими поверхностями

Объемы Θ_1 и Θ_2 соответствуют половинным объемам элементов батареи и представляют собой прямоугольные параллелепипеды:

$$\Theta_1 = \Theta(A_0, A_1, B_1, B_0, a_0, a_1, b_1, b_0), \quad (2.42)$$

и

$$\Theta_2 = \Theta(D_0, D_1, C_1, C_0, d_0, d_1, c_1, c_0). \quad (2.43)$$

Объем Θ_1 ограничен шестью плоскостями и определяется уравнениями:

$$\begin{aligned} & - Y = 0.5l_y \text{ при } -0.5l_x \leq X \leq 0.5l_x, \text{ и } 0 \leq Z \leq l_z; \\ & - Y = 0.5l_y + 0.5h \text{ при } -0.5l_x \leq X \leq 0.5l_x, \text{ и } 0 \leq Z \leq l_z; \\ & - Z = 0 \text{ при } -0.5l_x \leq X \leq 0.5l_x, \text{ и } 0.5l \leq Y \leq 0.5l + 0.5h; \\ & - Z = l_z \text{ при } -0.5l_x \leq X \leq 0.5l_x, \text{ и } 0.5l \leq Y \leq 0.5l + 0.5h; \\ & - X = -0.5l_x \text{ при } 0.5l_y \leq Y \leq 0.5l_y + 0.5h, \text{ и } 0 \leq Z \leq l_z; \\ & - X = 0.5l_x \text{ при } 0.5l_y \leq Y \leq 0.5l_y + 0.5h, \text{ и } 0 \leq Z \leq l_z; \end{aligned} \quad (2.44)$$

где h – толщина элемента батареи. $h = 12 \text{ мм}$,

l_x – длина элемента батареи. $l_x = 200 \text{ мм}$,

l_y – величина зазора между элементами батареи. $l_y = 2, 3, 4$ мм,

l_z – ширина элемента батареи. $l_z = 150$ мм,

Аналогично для объема Θ_2 можно записать следующие уравнения:

$$\begin{aligned}
 & - Y = -0.5l_y \text{ при } -0.5l_x \leq X \leq 0.5l_x, \text{ и } 0 \leq Z \leq l_z; \\
 & - Y = -0.5l_y - 0.5h \text{ при } -0.5l_x \leq X \leq 0.5l_x, \text{ и } 0 \leq Z \leq l_z; \\
 & - Z = 0 \text{ при } -0.5l_x \leq X \leq 0.5l_x, \text{ и } -0.5l_y \geq Y \geq -0.5l_y - 0.5h; \\
 & - Z = l_z \text{ при } -0.5l_x \leq X \leq 0.5l_x, \text{ и } -0.5l_y \geq Y \geq -0.5l_y - 0.5h; \\
 & - X = -0.5l_x \text{ при } -0.5l_y \geq Y \geq -0.5l_y + 0.5h, \text{ и } 0 \leq Z \leq l_z; \\
 & - X = 0.5l_x \text{ при } -0.5l_y \geq Y \geq -0.5l_y - 0.5h, \text{ и } 0 \leq Z \leq l_z.
 \end{aligned} \tag{2.45}$$

Область воздушного зазора между элементами батареи представляет собой прямоугольный параллелепипед с объемом – V_0 :

$$V_0 = V(A_0, B_0, C_0, D_0, A_1, B_1, C_1, D_1) . \tag{2.46}$$

Объем – V_0 (зазор между элементами батареи) ограничен шестью плоскостями:

Плоскости 1 и 7;

$$\begin{aligned}
 & - Z = 0 \text{ при } -0.5l_x \leq X \leq 0.5l_x, \text{ и } -0.5l_y \leq Y \leq 0.5l_y; \\
 & - Z = l_z \text{ при } -0.5l_x \leq X \leq 0.5l_x, \text{ и } -0.5l_y \leq Y \leq 0.5l_y; \\
 & - X = -0.5l_x \text{ при } -0.5l_y \leq Y \leq 0.5l_y, \text{ и } 0 \leq Z \leq l_z; \\
 & - X = 0.5l_x \text{ при } -0.5l_y \leq Y \leq 0.5l_y, \text{ и } 0 \leq Z \leq l_z.
 \end{aligned} \tag{2.47}$$

Поток тепла из элементов батареи направлен в воздушный зазор. Характер движения воздуха в зазоре определяется числа Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{u_{air} l_z}{\nu} , \tag{2.48}$$

где ν – кинематическая вязкость.

Для модели с зазором 3 мм и скорости потока воздуха 3 м/сек число Рейнольдса – 700. При таком значении число Рейнольдса поток воздуха

ламинарный и применение каких либо выступов и острых кромок не приводит к турбулентности потока. Кроме того, наличие малого перепада давления в потоке воздуха при прохождении его через зазор и отсутствие внешних сил позволяют использовать уравнения Навье-Стокса для стационарного движения несжимаемой жидкости. Система уравнений стационарного пространственного течения имеет следующий вид в декартовой системе координат:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial(\rho\rho_i)}{\partial x_i} = 0, \\ \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \tau_{ij} = 0, \\ \frac{\partial q_i}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i \varepsilon) - \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} u_j) = 0, \end{array} \right. \quad (2.49)$$

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right), \quad (2.50)$$

$$q_i = -k \frac{\partial T}{\partial x_i}, \quad (2.51)$$

$$\varepsilon = c_v T + \frac{u_k u_k}{2}, \quad (2.52)$$

$$p = \rho R T, \quad (2.53)$$

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & (i = j) \\ 0 & (i \neq j) \end{cases}, \quad (i, j, k = 1, 2, 3), \quad (2.54)$$

где u – скорость среды;

T – давление, ρ – плотность среды;

T – температура среды;

R – газовая постоянная;

q_i – диффузионный тепловой поток;

ε – полная энергия единичной массы среды;

μ – коэффициент динамической вязкости;

τ_{ij} – тензор вязких сдвиговых напряжений;

δ_{ij} – дельта-функция Кронекера;

c_v – удельная теплоемкость при постоянном объеме.

Граничные условия для поверхностей воздушного зазора: на границе с элементами батареи ΔS_1 – конвективный теплообмен, на боковых границах – ΔS_0 ставились адиабатические граничные условия, на границе входа воздушного потока – ΔS_{in} температура и скорость воздуха, а для границ выхода ΔS_{out} – давление на выходе.

Температура и граничные условия воздушного потока будут:

$$\begin{cases} \left(\vec{u}_{air} \vec{n} \right)_{\Delta S_0} = 0, \\ \left(\vec{u}_{air} \vec{n} \right)_{\Delta S_{in}} = -u_{in}, \\ \left(\vec{q} \vec{n} \right)_{\Delta S_1} = \alpha(T_{air} - T_{cell}), \\ T_{air} |_{\Delta S_{in}} = -T_{in}, \\ P_{air} |_{\Delta S_{out}} = P_0, \end{cases} \quad (2.55)$$

где $\vec{q} = -k\nabla T_{cell}$ – тепловой поток в элементе батареи;

\vec{n} – нормаль к внешней поверхности элемента;

α – конвективный коэффициент теплоотдачи;

\vec{q} – удельный тепловой поток через поверхность элемента батареи S_1 ;

T_{air} – температура воздуха в зазоре;

T_{cell} – температура элемента батареи;

u_{air} – скорость воздуха между элементами батареи – ΔS_{in} ;

P_0 – атмосферное давление на выходе – S_{out} ;

T_{in} , u_{in} – температура и скорость потока воздуха на входе в зазор между элементами, соответственно. Знак минус при u_{in} показывает движение потока воздуха навстречу нормали к поверхности.

Начальные условия и ограничения математической модели:

- геометрические размеры области моделирования – $200\text{мм} \times 150\text{мм} \times (12\text{мм} + l_y)$, $L_y = 2 \div 4 \text{ мм}$;
- скорость входного потока – $u_{in} = 2 - 4 \text{ м/сек}$;
- температура входного потока – $T_{in} = 10 - 35 \text{ }^\circ\text{C}$;
- диапазон допустимой средней температуры элемента батареи $T_{cell} = 25 \div 35 \text{ }^\circ\text{C}$;
- отклонение температуры в элементе батареи от средней $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$;
- суммарный тепловой поток через $S_1 - Q = 7.5 \text{ Вт}$, $P_0 = 101325 \text{ Па}$;
- избыточное давление на входе в батарею (до 200 Па);
- эффективность охлаждения $Q/ITD \geq 1.5 \text{ Вт/}^\circ\text{C}$ на один элемент;
- теплотехнические свойства элементов Li-ion батареи: теплопроводность в направлении плоскости элемента – 60 Вт/(м К) , и 1 Вт/(м К) перпендикулярно плоскости.

Эффективность охлаждения одного элемента батареи с плоскими поверхностями:

$$Q/ITD = Q/\Delta T = \Psi(Q, \Delta T, l, u_{in}), \quad (2.56)$$

$$\Delta T = \bar{T}_{cell} - T_{in}, \quad (2.57)$$

где Q – тепловая мощность, выделяемая в одном элементе батареи;

T_{in} – температура входящего воздуха в зазор между элементами;

\bar{T}_{cell} – средняя температура поверхности элемента;

l – расстояние между элементами;

u_{in} – скорость потока воздуха на входе в зазор.

Перепад давления в потоке воздуха при прохождении в зазоре между элементами:

$$\Delta P = P_{in} - P_0, \quad (2.58)$$

где P_{in} – давление на входе в зазор;

P_0 – атмосферное давление на выходе из батареи.

Средняя температура поверхности, давление и скорость потока воздуха на входе определялось осреднением результатов моделирования распределений температуры, давления и скоростей в объеме зазора между элементами батареи с помощью программного пакета SolidWorks Flow Simulation:

$$\begin{cases} T_{ijk} = T(x_i, y_j, z_k, u_{in}, T_{in}, l, (q_{conv})_{ijk}), \\ p_{ijk} = p(x_i, y_j, z_k, u_{in}, T_{in}, l, (q_{conv})_{ijk}), \\ u_{ijk} = u(x_i, y_j, z_k, u_{in}, T_{in}, l, (q_{conv})_{ijk}), \end{cases} \quad (2.59)$$

где $i = (1, 2, 3 \dots m)$, $j = (1, 2, 3 \dots n)$, $k = (1, 2, 3 \dots r)$;

m, n, r – количество ячеек разбиения объема воздуха между элементами батареи по координатам x, y, z – соответственно;

$(q_{conv})_{ijk}$ – плотность теплового потока в воздушном зазоре.

Средняя температура поверхности:

$$\overline{T}_{cell} = \frac{1}{S_1} \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^r T_{ijk} (\Delta S_1)_{ijk}, \quad \text{при } y_j = l/2. \quad (2.60)$$

Давление во входном потоке воздуха:

$$\overline{P}_{in} = \frac{1}{S_{in}} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n p_{ijk} (\Delta S_{in})_{ijk}, \quad \text{при } z_k = 0. \quad (2.61)$$

Расчеты распределения температуры во всем объеме элементов батареи и зазоров выполнялись в SolidWorks Flow Simulation с граничными условиями, определяемыми свойствами используемых материалов и среды в области температур моделирования. Средняя температура поверхности элемента батареи и перепад давления воздуха на участке между входным и выходным сечением щелей вычислялась для скоростей потоков входного воздуха (1, 2, 3 и 4 м/сек) и зазоров (2, 3 и 4 мм) при температуре входного потока воздуха 25 °С.

Пример распределения температуры на поверхности элемента батареи приведены на рис. 2.6.

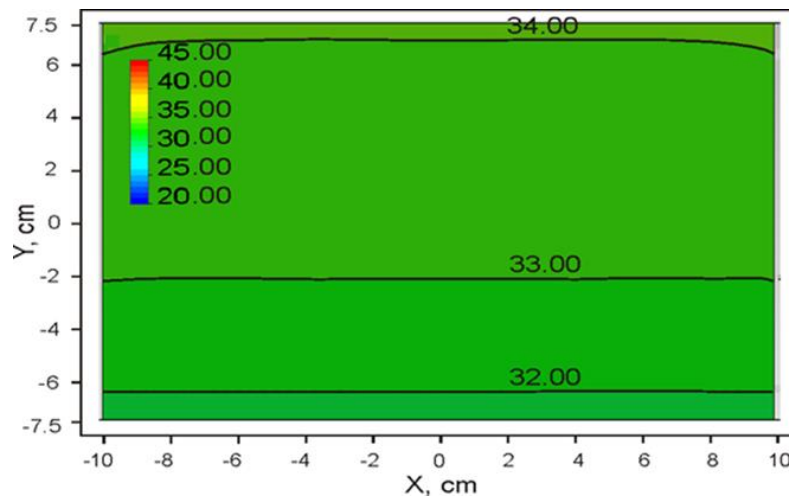


Рисунок 2.6 – Распределение температуры на поверхности элемента батареи для зазора 3 мм и скорости потока воздуха 2 м/сек

2.2.2 Результаты численного моделирования процесса охлаждения элементов Li-ion батареи с плоскими поверхностями, выбор зазора между элементами батареи

Предварительное численное моделирование процесса охлаждения элементов с плоскими поверхностями выполнялось для температуры воздуха во входном потоке 25 °С. Варьируемыми параметрами для численного моделирования были, скорость воздуха на входе в зазор между элементами Li-

ион батарей, размер зазора.

Зависимость эффективности охлаждения Li-ion батареи от величины скорости воздушного потока и величины зазора между элементами батареи приведена на рис. 2.7 и в табл. 2.2.

Расчетные значения перепада давления воздуха на участке между входным и выходным сечением щелей приведены в табл. 2.3 и на рис. 2.8.

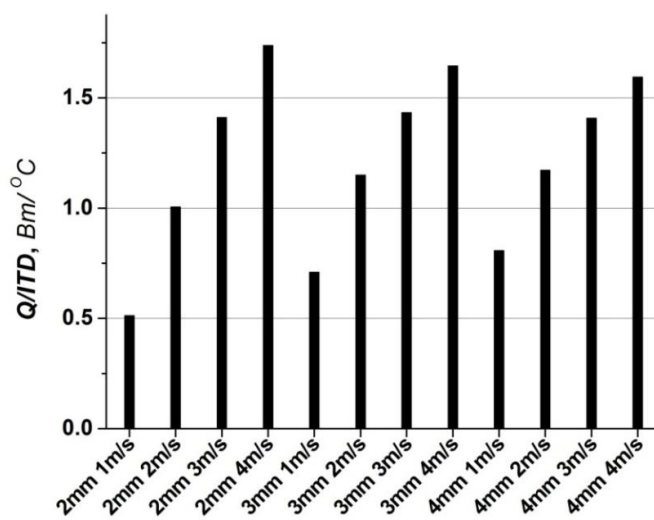


Рисунок 2.7 – Расчетные значения Q/ITD

Таблица 2.3 – Перепад давления воздуха на элементах батареи

Скорость потока воздуха, м/сек	$\Delta p_{calc}, Pa$		
	Расстояние между элементами, мм		
	2	3	4
1	10.322	4.477	2.73
2	20.415	9.444	6.15
3	31.865	15.25	10.34
4	44.682	21.821	15.2

Полученные данные показывают, что:

– эффективность охлаждения для потока воздуха с входной температурой $25^{\circ}C$ растет в зависимости от скорости потока, и ее максимум ограничен максимально допустимой скоростью потока 4 м/сек;

– эффективность охлаждения, в зависимости от размера зазоров между элементами батареи, возрастает, при увеличении зазора с 2 мм до 3 мм, и остается на таком же уровне при дальнейшем увеличении зазора;

– максимальный перепад давления в потоке воздуха не превышает 40 Pa.

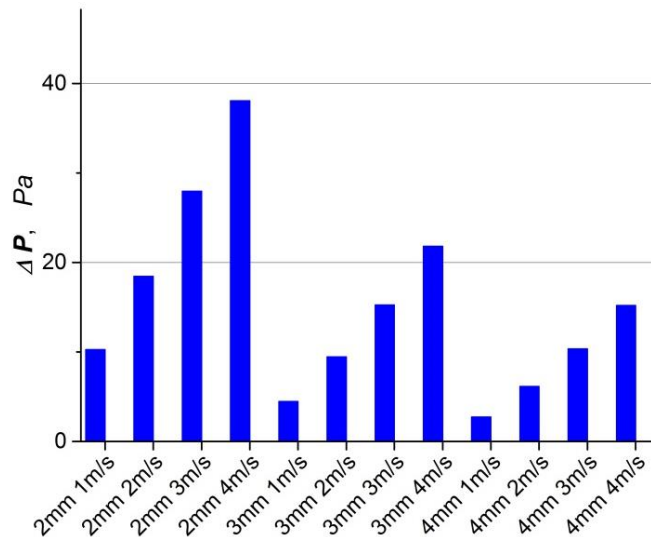


Рисунок 2.8 – Перепад давления воздуха на элементах батареи

2.3 Выбор параметров стенда и измерительной камеры

На основании результатов моделирования, для моделирования тепловых процессов с высокой эффективностью охлаждения выбран зазор между элементами батареи – 3 мм, как зазор, обеспечивающий небольшой перепад давления при величине эффективности охлаждения элементов близкой к максимальной (рис. 2.7 и рис. 2.8).

Величина максимального воздушного потока может быть рассчитана как произведение потока в одном зазоре на максимальное количество элементов в сборке. При использовании до 10 элементов необходим воздушный поток до 40 м³/час. В этом случае необходим рефрижератор охлаждения воздуха до –20 °С с эффективной мощностью охлаждения не менее 700 Вт без учета теплопритоков в модуле охлаждения воздуха.

При исследованиях процессов охлаждения перепад давления воздуха

между входом и выходом в измерительную камеру может достигать до 3000 *Pa*. С учетом перепадов давления в модуле стабилизации температуры и в воздуховодах воздушная станция должна обеспечивать выходное давление потока воздуха не менее 4000 – 5000 *Pa*.

Для измерений эффективности с точностью не менее 5% необходимо стабилизировать температуру потока воздуха с точностью не менее 0.2 °C и величину потока с точностью не менее 1%.

Требования, предъявляемые к измерительной камере:

- максимальное количество датчиков температуры – 400;
- точность измерения температуры $\pm 0,1$ °C;
- теплообмен с окружающей средой не более 1% от суммарной выделяемой мощности в имитаторах элементов Li-ion батарей.

Выводы по разделу 2

1. При воздушном охлаждении Li-ion батарей происходят процессы сопряженного теплообмена. Такие процессы описываются законами физики, как теплопередача, теплоотдача, диффузия, конвекция естественная и принудительная. Аналитически решить задачу охлаждения не представляется возможным. Законы физики описываются дифференциальными уравнениями, не имеющие, в общем случае, аналитического решения.

2. Вычислительная гидрогазодинамика – *CFD* (Computational Fluid Dynamics), определяется как набор методологий для компьютерного численного моделирования потоков жидкости или газа. Преимущества *CFD* перед экспериментальной гидрогазодинамикой это уменьшение времени предварительной подготовки при проектировании и при разработке, возможность моделирования условий течений, трудновоспроизводимых в эксперименте, получение более широкой и подробной информации о физических величинах потока. Метод *CFD* основан на дискретизации – замене непрерывной области массивом точек, для которых ищутся решения уравнений,

описывающих процесс. Производные в уравнениях аппроксимируются и решение уравнений в частных производных сводится к решению системы алгебраических уравнений. Стационарные задачи обычно приводят к системам уравнений, которые необходимо одновременно решать для всей расчетной области с учетом граничных условий. Маршевые задачи описываются системой уравнений, которые можно решать последовательно.

3. В *CFD* получил развитие метод конечных разностей (*KP*), возник и достиг высокого совершенства метод конечных объемов (*KO*), сформировалось направление, связанное с задачами динамики жидкости и газа – метод конечных элементов (*KЭ*). Метод (*KP*) основан на аппроксимации входящих в исходные дифференциальные уравнения производных их дискретными (разностными) аналогами. Достоинствами метода (*KP*) являются высокая эффективность и простота реализации, а также возможность построения схем высокого порядка точности. Однако подавляющее большинство приложений (*KP*) ограничено случаями сравнительно простых по геометрии расчетных областей. Метод (*KЭ*) относится к методам дискретного анализа и базируется на физической дискретизации рассматриваемого объекта. Реальная конструкция заменяется дискретной моделью связанных между собой элементов с конечным числом степеней свободы. Так как число возможных дискретных моделей для континуальной области неограниченно велико, то основная задача заключается в том, чтобы выбрать такую модель, которая лучше всего аппроксимирует данную область. Видимо, эта дополнительная математическая нагрузка, делающая метод (*KЭ*) более сложным и отсутствие явных преимуществ по сравнению с (*KO*) при описания тонких пограничных слоев является причиной низкой популярности (*KЭ*) в вычислительной гидрогазодинамике. Метод (*KЭ*) является очень ресурсоемким методом с точки зрения затрат вычислительных ресурсов.

4. Метод (*KO*) занимает лидирующее положение в разработках вычислительных средств, которые ориентированы на решение задач гидрогазодинамики и конвективного теплообмена в областях сложной

геометрии.

5. В настоящее время SolidWorks FlowSimulation является одним из приложений, позволяющих решать задачи вычислительной гидрогазотермодинамики в рамках систем автоматизированного проектирования. SolidWorks FlowSimulation базируется на достижениях вычислительной газогидродинамики и позволяет рассчитывать достаточно широкий круг инженерных задач. Движение и теплообмен текучей среды моделируется с помощью уравнений Навье-Стокса, описывающих в нестационарной постановке законы сохранения массы, импульса и энергии.

6. Охлаждение воздушным потоком Li-ion батареи связано с решением задачи сопряженного теплообмена, в котором основными процессами являются теплопроводность и конвекция. При моделировании тепловых процессов в SolidWorks с модулем SolidWorks Flow Simulation используется метод *CFD*, который основан на дискретизации – замене непрерывной области массивом точек, для которых ищутся решения уравнений, описывающих процесс. Основные законы, регулирующие потоки жидкости и газов, представляются в виде концепции сохранения и законов сохранения для контролируемого объема.

7. Выполнено моделирование тепловых процессов при охлаждении воздушным потоком элементов Li-ion батареи с гладкими поверхностями. Получены средние, минимальные и максимальные температуры элементов и разность входных и выходных давлений воздуха при прохождении его через батарею для зазоров 2, 3, 4 мм, для потоков воздуха 1, 2, 3, 4 м/сек и входной температуры 25 °С. Выбран зазор 3 мм, как оптимальный с точки зрения наилучшей эффективности охлаждения при небольшой скорости потока воздуха. Определена производительность стенда: необходим максимальный поток воздуха – 80 л/сек с выходным давлением до 5000 Pa.

Основные положения раздела изложены в работах [3, 8, 12].

РАЗДЕЛ 3

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА С ВЫСОКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ОХЛАЖДЕНИЯ

3.1 Математическое моделирование воздушного охлаждения с многоканальной периодической структурой поверхностей элементов батареи

Эффективность охлаждения Li-ion батарей воздушным потоком, прежде всего, определяется коэффициентом теплоотдачи поверхности элементов батареи во внешнюю среду. При потоках воздуха с малой скоростью потока (ламинарные потоки) для повышения коэффициента теплоотдачи основными методами являются:

- увеличение поверхности элементов батареи, соприкасающейся с воздушным потоком,
- использование различных структур в потоке воздуха для перемешивания слоев воздуха.

Основными недостатками при этом являются – необходимость использования материалов с высокой теплопроводностью, значительное увеличение размеров и веса, повышение мощности вентиляционной системы для создания воздушных потоков, технологическая сложность создания разветвленных поверхностей и структур перемешивания слоев воздуха, не очевидность получения оптимального результата.

В связи с этим математическое моделирование тепловых процессов позволяет произвести выбор наиболее подходящих решений. Наиболее интересными задачами математического моделирования есть задачи использования различных структур в потоке воздуха для перемешивания слоев воздуха. В этом случае высокая эффективность охлаждения может быть достигнута без существенного изменения конструкции аккумуляторов и использования материалов с высокой теплопроводностью.

Для решения задачи моделирования процессов теплообмена с высокой эффективностью охлаждения с целью уменьшения времени вычислений будут использоваться поверхности с периодической структурой [2, 4]. В этом случае математическая модель может быть ограничена частью поверхности элемента Li-ion батарей, содержащей все характерные элементы структуры. Кроме того размеры структур выбраны близкими к величине зазора между отдельными элементами батареи, чтоб не сильно увеличивать сопротивление потоку воздуха и максимально перемешивать слои воздуха.

Были рассмотрены поверхности типа «полупины со скругленными кромками», «скрученные ленточки» и «открытые пирамиды». Геометрическая модель поверхности типа «полупины со скругленными кромками» представлена на рис. 3.1.

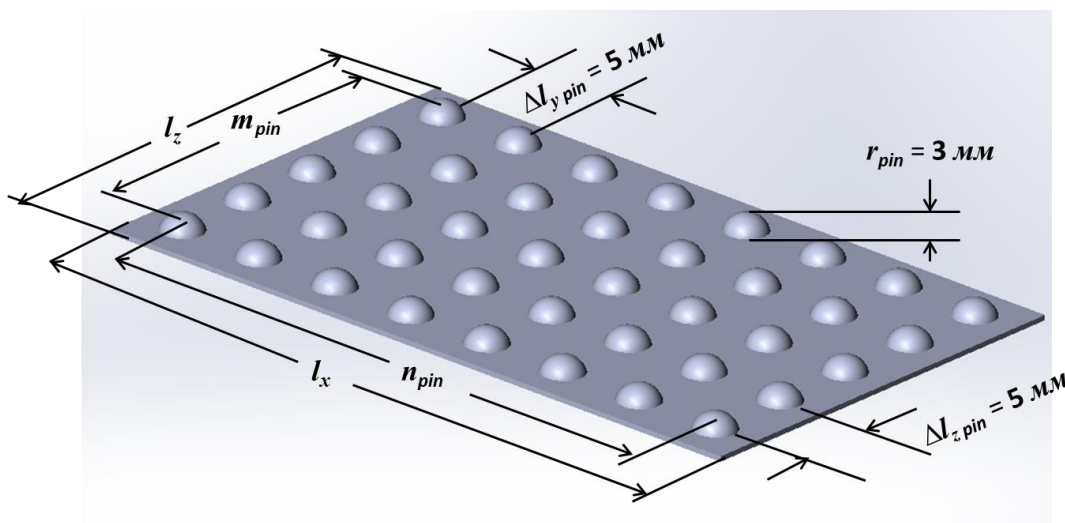


Рисунок 3.1 – Геометрическая модель поверхности типа «полупины со скругленными кромками»

На поверхностях элементами батареи равномерно распределены полусферы. Уравнение для полусфер на одной поверхности элемента батареи:

$$(x - x_n)^2 + (y - 0.5l_y)^2 + (z - z_m)^2 = r_{pin}^2 \quad \text{при } y \leq 0, \quad (3.1)$$

где $x_n = \pm \Delta l_{x \text{ pin}} \left(\frac{n-1}{2} \right)$; $(n = 1, 3, 5 \dots n_{\text{pin}})$; n_{pin} – количество дорожек по x ;
 $z_m = 0.5 \Delta l_{z \text{ pin}} + (m-1) \Delta l_{z \text{ pin}}$; $m = (1, 2, 3, \dots, m_{\text{pin}})$;
 $m_{\text{pin}} \leq \frac{l_z - \Delta l_{z \text{ pin}}}{\Delta l_{z \text{ pin}}} < m_{\text{pin}} + 1$; m_{pin} – количество полусфер по z ;

а для другой поверхности:

$$(x - x_n)^2 + (y - 0.5l_y)^2 + (z - z_m)^2 = r_{\text{pin}}^2 \quad \text{при } y \geq 0, \quad (3.2)$$

где $x_n = \pm \Delta l_{x \text{ pin}} \left(\frac{n+1}{2} \right)$; $(n = 1, 3, 5 \dots n_{\text{pin}} - 1)$;
 $z_m = \Delta l_{z \text{ pin}} + (m' - 1) \Delta l_{z \text{ pin}}$; $m = (1, 2, 3, \dots, m_{\text{pin}})$;
 $m_{\text{pin}} \leq \frac{l_z - 1.5 \Delta l_{z \text{ pin}}}{\Delta l_{z \text{ pin}}} < m'_{\text{pin}} + 1$; m'_{pin} – количество полусфер по z ;

Размеры полусфер и расстояние между ними выбраны из результатов предварительного анализа как обеспечивающие максимальную эффективность охлаждения и допустимый перепад давления.

Ширина воздушного канала для заданного числа дорожек элементов между элементами батареи:

$$l_x = \Delta l_{x \text{ pin}} n_{\text{pin}}. \quad (3.3)$$

Объем воздушного канала между элементами батареи ограничен шестью плоскостями – уравнения (2.47) и, дополнительно, полусферами на поверхностях элементов батареи, уравнения (3.1 и 3.2).

Остальные размеры воздушного канала, элементов батареи, удельная тепловая мощность, генерируемая в элементах батареи, граничные условия и ограничения аналогичные, как в случае гладких поверхностей элементов батареи.

Так как поверхности представляют периодически повторяющуюся

структуру, то с целью увеличения скорости вычислений, при вычислениях ограничивалась ширина дорожки от трех до девяти периодически повторяющихся структур, в направлении перпендикулярном потоку воздуха. Длина дорожки вдоль потока воздуха соответствовала ширине элемента батареи – 150 мм. Количество периодически повторяющихся структур N_{pin} определялось из условия:

$$T_{imitator}^{N_{pin}} - T_{imitator}^{N_{pin}-1} < \varepsilon, \quad (3.4)$$

где $T_{imitator}$ – средняя температура имитатора;

ε – допустимая погрешность расчетного значения $T_{imitator}$.

Второй рассматриваемой моделью, с перемешиванием слоев воздуха, является геометрия «скрученные ленточки». На рис. 3.2 показана геометрия модели поверхности типа «скрученные ленточки».

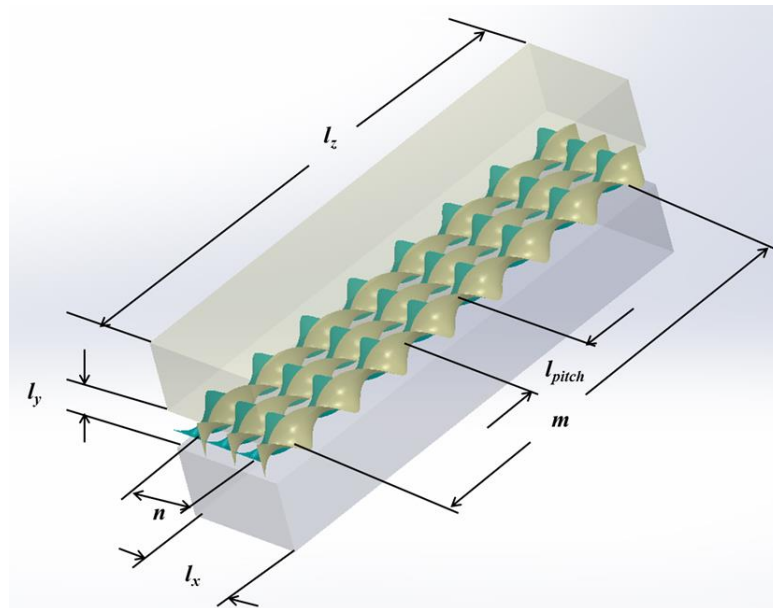


Рисунок 3.2 – Геометрическая модель поверхности типа «скрученные ленточки»

В зазоре между элементами батареи располагаются ленточки, границы которых представляют собой две винтовые поверхности (геликоиды). Они образованы движением отрезков прямых линий, вращающихся вокруг

перпендикулярной к ним оси. Ось проходит через середину этих отрезков. Одновременно отрезки перемещаются поступательно с постоянной скоростью вдоль этой оси. Начальное положение второго отрезка сдвинуто по z на расстояние равное толщине ленточки – δ_{rib} .

Уравнение для одной правовинтовой поверхности ленточки:

$$\begin{cases} x_1 = x_1(r, t) = r \cdot \cos t, \\ y_1 = y_1(r, t) = r \cdot \sin t, \\ z_1 = z_1(r, t) = t, \end{cases} \quad 0 \leq t \leq 2\pi m_h, \quad -\frac{l_y}{2} \leq r \leq \frac{l_y}{2}, \quad (3.5)$$

где m_h – число витков ленточки;

$$m_h = \frac{l_z}{l_{pitch}};$$

l_{pitch} – шаг скручивания.

Уравнение для другой правовинтовой винтовой поверхности:

$$\begin{cases} x_2 = x_2(r, t) = r \cdot \cos t, \\ y_2 = y_2(r, t) = r \cdot \sin t, \\ z_2 = z_2(r, t) = t + \delta_{rib}, \end{cases} \quad 0 \leq t \leq 2\pi m_h, \quad -\frac{l_y}{2} \leq r \leq \frac{l_y}{2}, \quad (3.6)$$

где δ_{rib} – толщина ленточки.

Уравнение для торцевых поверхностей:

$$\begin{cases} x_3 = 0.5l_y \cdot \cos t, \\ y_3 = 0.5l_y \cdot \sin t, \\ z_3 = t + \sigma, \end{cases} \quad \begin{cases} 0 \leq t \leq 2\pi m_h, \\ 0 \leq \sigma \leq \delta_{rib}, \end{cases} \quad (3.7)$$

$$\begin{cases} x_4 = -0.5l_y \cdot \cos t, \\ y_4 = -0.5l_y \cdot \sin t, \\ z_4 = t + \sigma, \end{cases} \quad \begin{cases} 0 \leq t \leq 2\pi m_h, \\ 0 \leq \sigma \leq \delta_{rib}, \end{cases} \quad (3.8)$$

При создании массива, для того, чтобы соседние ленточки хорошо прилегли одна к другой, они повернуты на 90° и имеют левовинтовое скручивание. Уравнения для левовинтовых поверхностей ленточек следующие:

$$\begin{cases} x_5 = x_5(r, t) = r \cdot \cos t, \\ y_5 = y_5(r, t) = r \cdot \sin t, \\ z_5 = z_5(r, t) = t. \end{cases} \quad 0 \leq t \leq 2\pi m_h, \quad -\frac{l_y}{2} \leq r \leq \frac{l_y}{2}, \quad (3.9)$$

$$\begin{cases} x_6 = x_6(r, t) = r \cdot \cos(t + \pi/2), \\ y_6 = y_6(r, t) = -r \cdot \sin(t + \pi/2), \\ z_6 = z_6(r, t) = t + \delta_{rib}. \end{cases} \quad 0 \leq t \leq 2\pi m_h, \quad -\frac{l_y}{2} \leq r \leq \frac{l_y}{2}, \quad (3.10)$$

$$\begin{cases} x_7 = (l_y/2) \cdot \cos(t + \pi/2), \\ y_7 = -(l_y/2) \cdot \sin(t + \pi/2), \\ z_7 = t + \sigma, \end{cases} \quad \begin{matrix} 0 \leq t \leq 2\pi m_h, \\ 0 \leq t \leq \delta_{rib}. \end{matrix} \quad (3.11)$$

$$\begin{cases} x_8 = -(l_y/2) \cdot \cos(t + \pi/2), \\ y_8 = (l_y/2) \cdot \sin(t + \pi/2), \\ z_8 = t + \sigma, \end{cases} \quad \begin{matrix} 0 \leq t \leq 2\pi m_h, \\ 0 \leq t \leq \delta_{rib}. \end{matrix} \quad (3.12)$$

Количество периодически повторяющихся структур n_{rib} определялось из условия (3.4). В таком случае ширина воздушного канала будет:

$$l_x = l_n n_{rib}. \quad (3.13)$$

Шаг, направление винта и расстояние между осями вращения выбраны для получения максимальной эффективности охлаждения и допустимого перепада давления.

Воздушный канал между элементами батареи ограничен шестью плоскостями – уравнения (2.47) и, дополнительно, поверхностями скрученных

ленточек расположенных в канале, уравнения (3.9 – 3.12).

Начальные условия и ограничения для параметров воздушного канала и элементов батареи, как и в случае для гладких поверхностей элементов батареи. Граничные условия поверхностей ленточек – адиабатические.

Третьей рассматриваемой моделью является геометрия «открытые пирамиды». На рис. 3.3 показана геометрия модели поверхности типа «открытые пирамиды».

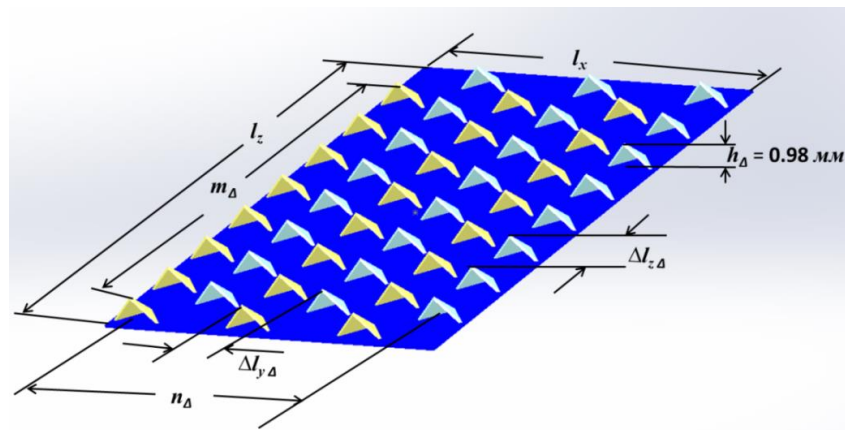


Рисунок 3.3 – Геометрическая модель поверхности типа «открытые пирамиды»

На поверхностях элементами батареи равномерно распределены структуры в виде пирамид без одной боковой грани. Пирамиды ориентированы так чтоб существующие грани были симметричны направлению потока воздуха, а отсутствующая грань была со стороны входного потока. Уравнение для одной из плоскостей пирамиды может быть записано как плоскость, проходящая через три точки с координатами $X(x_0, y_0, z_0)$, $Y(x_1, y_1, z_1)$, $Z(x_2, y_2, z_2)$:

$$\begin{vmatrix} x - x_0 & x_1 - x_0 & x_2 - x_0 \\ y - y_0 & y_1 - y_0 & y_2 - y_0 \\ z - z_0 & z_1 - z_0 & z_2 - z_0 \end{vmatrix} = Ax + By + Cz + D = 0 . \quad (3.14)$$

Поверхность «открытые пирамиды» состоят из пяти плоскостей: двух

наружных треугольных граней, двух внутренних граней и торцевой поверхности. Торцевая поверхности образована из поверхности передней грани, в которой сделан вырез. Используемые в расчетах координаты точек, через которые проходили плоскости и ограничения поверхностей плоскостей, приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Координаты точек, через которые проходили плоскости

Поверхность	$x_0, мм$	$y_0, мм$	$z_0, мм$	$x_1, мм$	$y_1, мм$	$z_1, мм$	$x_2, мм$	$y_2, мм$	$z_2, мм$
Наружная правая грань	2	0	-0.3	0	0.98	0	0	0	1.7
	$0 \leq x \leq 2, -0.3 \leq y \leq 1.7, 0 \leq z \leq 0.98$								
Наружная левая грань	-2	0	-0.3	0	0.98	0	0	0	1.7
	$-2 \leq x \leq 0, -0.3 \leq y \leq 1.7, 0 \leq z \leq 0.98$								
Внутренняя правая грань	1.7	0	-0.3	0	0.71	0	0	0	1.4
	$0 \leq x \leq 1.7, -0.3 \leq y \leq 1.4, 0 \leq z \leq 0.71$								
Внутренняя левая грань	-1.7	0	-0.3	0	0.71	0	0	0	1.4
	$-1.7 \leq x \leq 0, -0.3 \leq y \leq 1.4, 0 \leq z \leq 0.71$								
Передняя грань	-2	0	-0.3	0	0.98	0	2	0	-0.3
	$-2 \leq x \leq 2, 0 \leq y \leq 0.98, -0.3 \leq z \leq 0$								
Вырез	-1.7	0	-0.3	0	0.71	0	1.7	0	-0.3
	$-1.7 \leq x \leq 1.7, 0 \leq y \leq 0.71, -0.3 \leq z \leq 0$								

Поверхности «открытые пирамиды» распределены на поверхностях элементов батареи в виде дорожек. При чем, соседние дорожки сдвинуты по оси z на половину шага между элементами в дорожке. Расположение элементов структуры на одной поверхности элементов батареи можно записать как:

$$A(x - x_n) + B(y + 0.5\Delta l_{y\Delta}) + C(z - z_m) + D = 0 \quad \text{при } y \leq 0, \quad (3.15)$$

где $x_n = \pm \Delta l_{x\Delta} \left(\frac{n-1}{2} \right)$, $(n = 1, 2, 3..n_\Delta)$;

n_Δ – количество дорожек по x ;

$z_m = 0.5 \Delta l_{z\Delta} \left(1 + \left| \sin \frac{(n-1)\pi}{4} \right| \right) + (m-1) \Delta l_{z\Delta}$, $(m = 1, 2, 3..m_\Delta)$;

$m_\Delta \leq \frac{l_z - 1.5 l_{z\Delta}}{\Delta l_{z\Delta}} < m_\Delta + 1$;

m_Δ – количество пирамид по z ;

$\Delta l_{x\Delta} = 5\text{мм}$, $\Delta l_{z\Delta} = 5\text{мм}$.

а для другой поверхности:

$$A(x - x_n) + B(y - 0.5 \Delta l_{y\Delta}) + C(z - z_m) + D = 0, \quad \text{при } y \geq 0, \quad (3.16)$$

где $x_n = \pm \Delta l_{x\Delta} \left(\frac{n'-1}{2} \right)$, $(n' = 2, 4, 6..n_\Delta - 1)$;

$z_m = 0.5 \Delta l_{z\Delta} \left(1 + \left| \sin \frac{(n'-2)\pi}{4} \right| \right) + (m-1) \Delta l_{z\Delta}$, $(m = 1, 2, 3..m_\Delta)$;

$m \leq \frac{l_z - 1.5 l_{z\Delta}}{\Delta l_{z\Delta}} < m_\Delta + 1$.

Количество периодически повторяющихся структур n_Δ определялось из условия (3.4). Ширина воздушного канала для структур «открытые пирамиды»:

$$l_x = l_r n_\Delta. \quad (3.17)$$

Воздушный канал между элементами батареи ограничен шестью плоскостями – уравнения (2.47) и, дополнительно, поверхностями скрученных ленточек расположенных в канале, уравнения (3.9 – 3.12).

Параметры воздушного канала и элементов батареи, как и в случае для гладких поверхностей элементов батареи. Начальные условия и ограничения

для параметров воздушного канала и элементов батареи, как и в случае для гладких поверхностей элементов батареи.

В результате моделирования получены средние, минимальные и максимальные температуры поверхностей элементов батареи и разность входных и выходных давлений воздуха при прохождении его через элементы. Параметры расчетных сеток для различных структур приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2 – Параметры расчетных сеток

Модель поверхности элемента батареи	Число ячеек разбиения				
	Жидкость	Твердое тело	Частичные	Усеченные	Всего
Полупины со скругленными кромками	257283	78831	167197	–	503311
Скрученные ленточки	46306	14120	67194	52	127620
Открытые пирамиды	48296	12096	53552	1873	113944

На рис. 3.4 и рис. 3.5 показаны потоки и температуры в зазорах между элементами батареи для поверхностей типа «полупины со скругленными кромками» и «скрученные ленточки», соответственно.

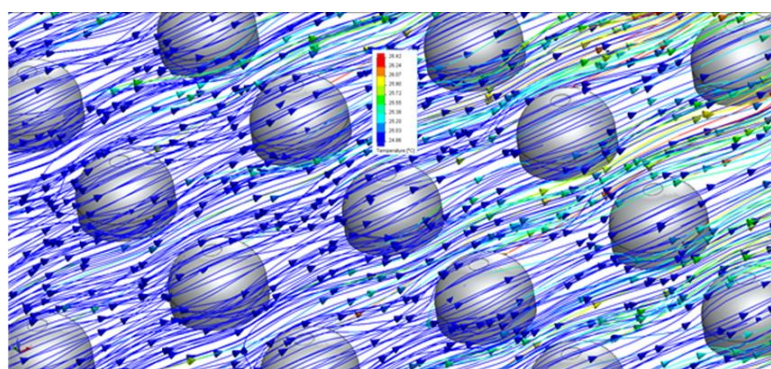


Рисунок 3.4 – Траектории и температура воздуха в зазорах между элементами батареи для поверхностей типа «полупины со скругленными кромками»

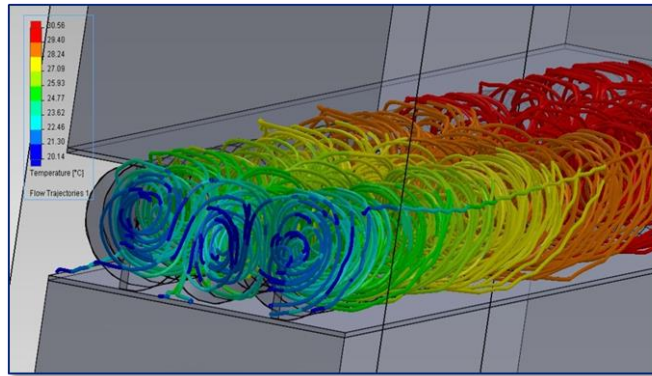


Рисунок 3.5 – Траектории и температура воздуха в зазорах между элементами батареи для поверхностей типа «скрученные ленточки»

В табл. 3.3 приведены расчетные значения эффективности охлаждения элементов батареи с поверхностями типа «полушины со скругленными кромками» в зависимости от температуры и скорости потока воздуха.

Таблица 3.3 – Эффективности охлаждения элементов батареи с поверхностями типа «полушины со скругленными кромками»

Температура	$Q/ITD_{calc}, Bm^{\circ}C$			
	Скорость потока воздуха, м/сек			
	1	2	3	4
10	0.65	1.36	2.04	2.69
15	0.64	1.34	2.01	2.65
20	0.63	1.32	1.99	2.62
25	0.62	1.30	1.96	2.59
30	0.61	1.29	1.93	2.56
35	0.60	1.27	1.91	2.53
40	0.59	1.25	1.88	2.50
Среднее значение Q/ITD_{calc}	0.62	1.30	1.96	2.59
Точность расчета, %	3	3	3	3

В табл. 3.4 приведены расчетные значения эффективности охлаждения

элементов батареи в зависимости от скорости потока на входе в батарею.

Таблица 3.4 – Расчетные значения средней эффективности охлаждения

Тип поверхности	$Q/ITD_{calc}, Bm/°C$			
	Скорость потока воздуха, м/сек			
	1	2	3	4
Гладкие	0.71	1.15	1.43	1.64
Полупины со скругленными кромками	0.62	1.30	1.96	2.59
Скрученные ленточки	0.85	1.69	2.57	3.42
Открытые пирамиды	0.91	1.84	2.81	3.79

В табл. 3.5 приведены расчетные значения перепада давления в потоке воздуха.

Таблица 3.5 – Расчетные значения перепада давления в потоке воздуха при прохождении его через элементы батареи

Тип поверхности	p_{calc}, Pa			
	Скорость потока воздуха, м/сек			
	1	2	3	4
Гладкие	4.48	9.44	15.25	22.82
Полупины со скругленными кромками	16.73	47.72	89.85	145.98
Скрученные ленточки	28.06	58.62	94.22	132.96
Открытые пирамиды	112.06	390.66	836.5	1449.8

Высота и размеры основания пирамид, расстояние между ними выбраны для получения оптимальной эффективности охлаждения при наименьшем перепаде давления в потоке воздуха. Погрешность вычислений эффективностей охлаждения элементов батареи при температуре 10 – 40 °C

расчетного значения Q/ITD_{calc} не превышает 3% [2,4,8]. Погрешность вычислений перепада давления для этих температур не превышает 2%.

Кроме приведенных выше результатов моделирования могут определяться и другие, такие как: максимальные, минимальные и усредненные температуры на поверхностях элементов батареи, распределение температуры и локальных скоростей в зазоре между элементами и ряд других характеристик.

3.2 Оптимизация воздушных потоков для охлаждения Li-ion батареи

Для нахождения температуры и скорости воздушного потока на входе в зазор между элементами Li-ion батареи было выполнено численное моделирование тепловых процессов для допустимой области значений параметров и ограничений.

Диапазон температуры входного воздуха ограничен 10 – 40 °C. Скорость потока воздуха 1 – 4 м/сек, как таковой, что не создает большого уровня шума и большой перепад давления при прохождении через батарею. Расстояние между элементами составляло 2 – 4 мм, как незначительно увеличивающее размеры батареи. В табл. 3.6 приведены диапазоны варьируемых входных параметров и шаг их изменения.

Таблица 3.6 – Диапазоны варьируемых входных параметров в модели охлаждения Li-ion батареи.

Параметр	Диапазон изменения	Величина шага изменения
Температура входного потока воздуха	10 – 40 °C	5°С
Скорость потока воздуха	1 – 4 м/сек	1 м/сек
Величина зазора между элементами	2 – 4 мм	1 мм

Для вычисления Q/ITD вычислялась – $T_{imitator}$, как средняя интегральная температура, из распределения температуры на поверхности элемента [3, 8].

На рис. 3.6 и рис. 3.7 приведены зависимость эффективности охлаждения Li-ion батареи от величины скорости входного воздушного потока и перепада давления в потоке воздуха для некоторых видов поверхностей элементов батареи.

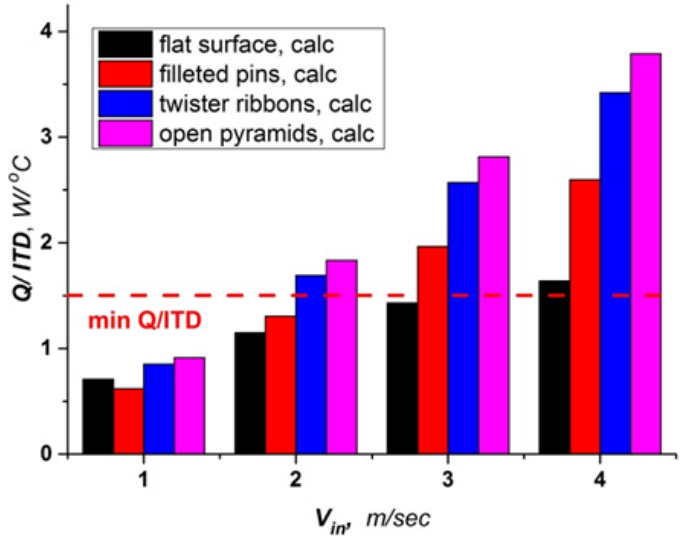


Рисунок 3.6 – Расчетные значения Q/ITD от скорости воздушного потока

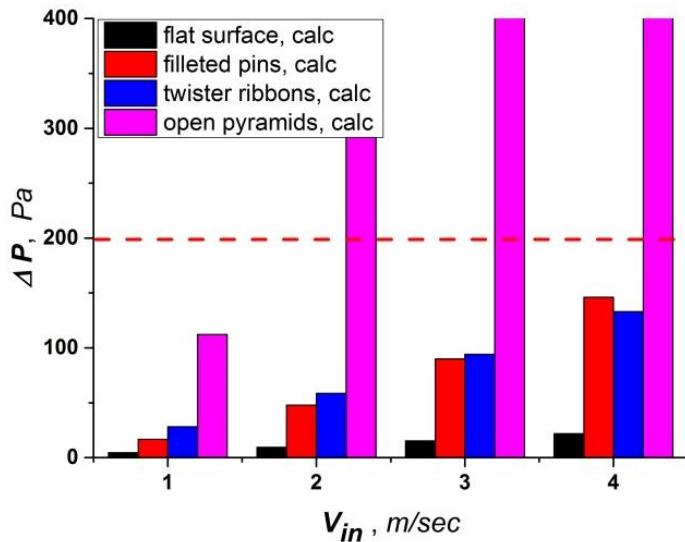


Рисунок 3.7 – Перепад давления в потоке воздуха от скорости потока

На рис. 3.8 приведена зависимость разности максимальной и минимальной температур поверхности элемента батареи от скорости потока воздуха при средней температуре поверхности 30 °C.

На рис. 3.9 приведена зависимость температуры входного потока от

скорости для получения средней температуры поверхности $30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

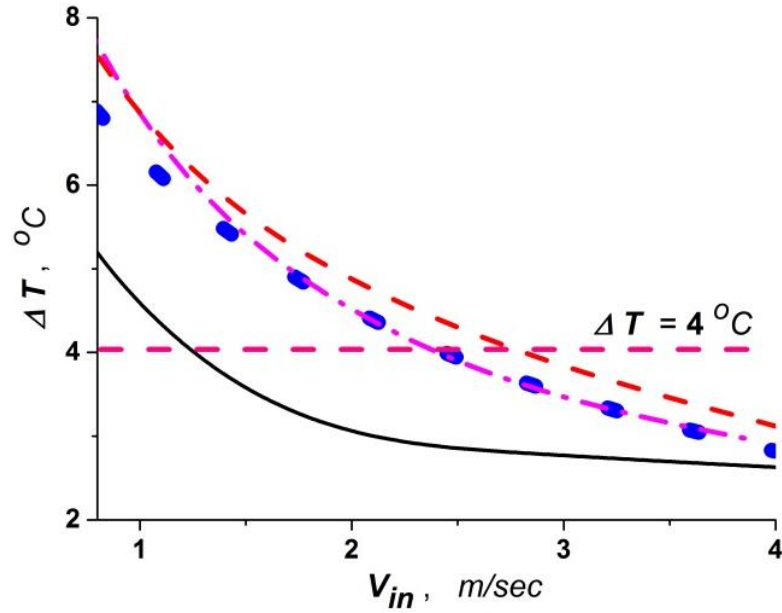


Рисунок 3.8 – Зависимость перепада температуры на поверхности элемента батареи от скорости потока при средней температуре поверхности $30\text{ }^{\circ}\text{C}$

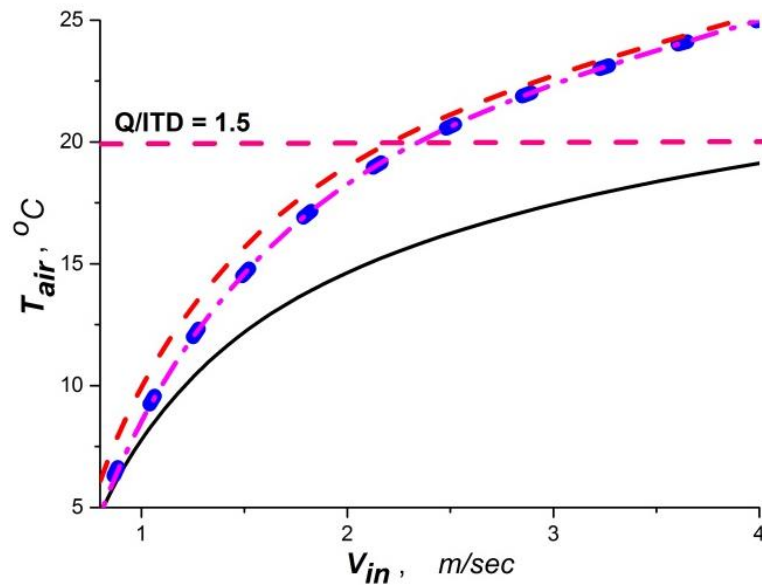


Рисунок 3.9 – Зависимость температуры входного потока от скорости для получения средней температуры поверхности $30\text{ }^{\circ}\text{C}$

Скорость воздушного потока, которая удовлетворяет граничным условиям:

– эффективности охлаждения – $D/ITD \geq 1.5\text{ Bm}/(\text{м }^{\circ}\text{C})$ и больше в $1.5 \div 2$ чем для плоских поверхностей,

- перепад давления – $\Delta P \leq 200 Pa$ (за исключением поверхностей «открытые пирамиды»),
- разности максимальной и минимальной температуры на поверхности элемента батареи – $\Delta T \geq 4 ^\circ C$,
- отсутствие шума.

Оптимальный диапазон температур и скоростей входного потока воздуха для рассмотренных видов поверхностей – $20 \div 25 ^\circ C$ и $2.5 \div 4 м/сек$, соответственно, для рассмотренных видов поверхностей.

3.3 Математическое моделирование охлаждения Li-ion батарей с помощью тепловой трубки

Использование распределенного воздушного охлаждения Li-ion батарей создает определенное усложнение конструкции (распределение потока воздуха, размещение воздухопроводов, надежность крепления элементов батареи и другие). При применении охлаждения элементов батареи с помощью внешнего радиатора необходимо обеспечить передачу тепла от элементов к радиатору. Для этого необходимы материалы с высокой теплопроводностью или охлаждение циркулирующей жидкостью.

Использование теплоты кипения позволит значительно уменьшить размеры батареи. Одной из задач исследований является изучение эффективности охлаждения Li-ion батарей с помощью тепловой трубки [6]. Эффективность охлаждения батареи зависит от теплопроводности тепловой трубки, температуры и величины потока воздуха, охлаждающего тепловую трубку.

Для вычисления величины теплопроводности тепловой трубки она была заменена сплошным материалом с высокой теплопроводностью. Подбиралась теплопроводность этого материала так, чтоб расчетные и экспериментально измеренные значения средних температур поверхностей элементов батареи были равны для одинаковых температур входного потока воздуха. В этом

случае, теплопроводность тепловой трубки соответствует теплопроводности сплошного материала. На рис. 3.10 показана геометрическая модель тепловой трубки.

Математическая модель, в общем виде, тепловых процессов охлаждения батарей тепловой трубкой определяется уравнением (1.2), а граничные условия – типом и конкретными размерами тепловой трубки. Разделим математическую модель на три части: теплопередача в элементах батареи и тепловой трубке и охлаждение радиатора тепловой трубки потоком воздуха.

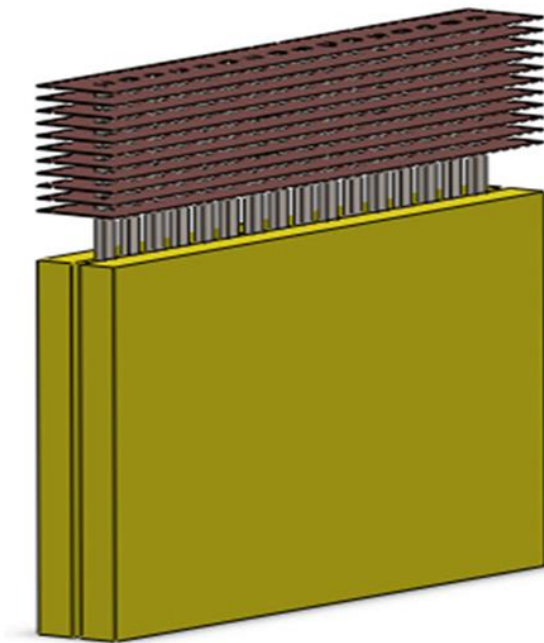


Рисунок 3.10 – Геометрическая модель тепловой трубки

Уравнение теплопроводности (диффузии) без источников генерации тепла в области тепловой трубки:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \omega^2 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (3.18)$$

где $\omega = \sqrt{\frac{k}{\gamma\rho}}$, k – теплопроводность;

ρ – плотность и γ – теплоемкость.

Тепловые потоки на границах тепловой трубки с элементами батареи:

$$\vec{q}_{cell} = \begin{cases} Q(x, y, z, W, V) = \frac{W}{V}, & (x, y, z) \in S_{cell}, \\ 0, & (x, y, z) \notin S_{cell}, \end{cases} \quad (3.19)$$

и радиатора охлаждения:

$$\vec{q}_{rad} = \begin{cases} Q(x, y, z, W, V) = \frac{W}{V}, & (x, y, z) \in S_{rad}, \\ 0, & (x, y, z) \notin S_{rad}, \end{cases} \quad (3.20)$$

На остальных границах ставились адиабатические условия. Все параметры элементов батареи, воздушного потока, начальные условия и ограничения были аналогичны предыдущим моделям.

Тепловая трубка представляет собой сборку из 16 тонких тепловых трубок, которые соединены в области кипения и в области конденсации жидкости [7]. К рабочей жидкости предъявляются определенные требования при рабочей температуре:

- высокая удельная теплоемкость упругих паров,
- сравнительно невысокое давление упругих паров,
- максимальное значение удельной теплоты испарения,
- иметь жидкую фазу в диапазоне температур окружающей среды.

В качестве рабочей жидкости в тепловой трубке использовал сжиженный бутан, так как он имеет при рабочей температуре небольшое давление упругих паров 2 – 3 атм. и теплоту испарения – 395 Дж/г, плотность 0.6 г/см³.

Сечение парового канала 2×4 мм. Длина испарительной части канала 150 мм. Полная длина канала до конденсирующей части тепловой трубки 170 мм. Подводимая тепловая мощность к испарительной части каждой тонкой тепловой трубке 0.93 Вт. На всех стенках нагреваемой части тепловой трубки в качестве граничных условий был задан поток массы газа, соответствующий

массе бутана, определяемой мощностью нагрева и теплотой испарения.

Для расчета давления газа в одной тонкой тепловой трубке и скорости потока, в зависимости от температуры газа в охлаждаемой части тепловой трубки, в математической модели, аналогичной (2.48) были заданы, в качестве граничного условия, давление насыщенных паров бутана, и поток массы газа, соответствующий испарению при подводимой мощности 15Вт . Остальные граничные условия были адиабатические. Моделирование работы тепловой трубки и процессов охлаждения Li-ion батареи осуществлялось при помощи пакета SolidWorks 2011 с модулем SolidWorks Flow Simulation. На рис. 3.11 показаны распределения давления и скорости паров бутана в тепловой трубке.

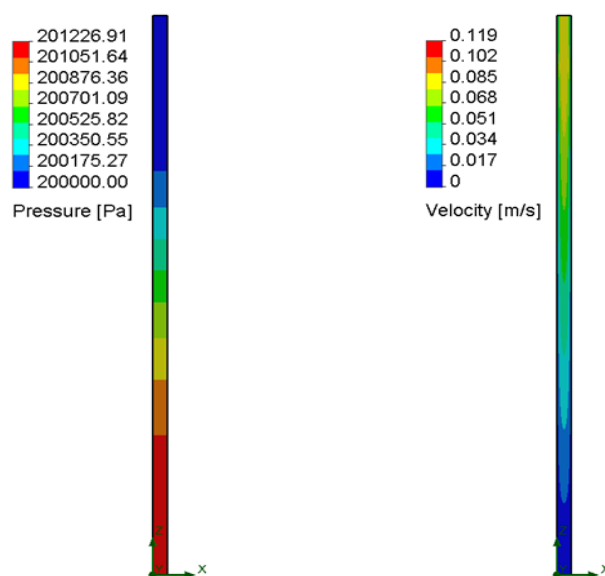


Рисунок 3.11 – Распределения давления и скорости паров бутана в тепловой трубке

Для контроля ошибок дискретизации использовались расчетные сетки, содержащие 48384, 176640 и 573120 ячеек, контрольным параметром была средняя скорость по сечению трубки. В соответствии с методикой, приведенной в [98], индекс сходимости (GCI) составил 3,65%.

Тепловые трубки, построенные по принципу термосифона, имеют ограничение по передаваемой мощности обусловленное затоплением конденсатора [107]. Это ограничение дается соотношением:

$$Q_{max} = Ku(\rho_v)^{0.5} [g(\rho_l - \rho_v)\sigma_l]^{0.25}, \quad (3.21)$$

где ρ_l и ρ_v – плотности жидкости и пара, соответственно;

σ_l – коэффициент поверхностного натяжения жидкости;

g – ускорение свободного падения;

Ku – число Кутателадзе.

Число Кутателадзе определялось согласно формуле, приведенной в [107]:

$$Ku = 0.16 \{1 - \exp[-(d_e/l_e)(\rho_l/\rho_v)^{0.13}]\}, \quad (3.22)$$

где d_e , l_e – диаметр и длина парового канала.

Для нашей тепловой трубки ограничение передаваемой мощности составляет 1.189 Вт при необходимой мощности 0.93 Вт.

При моделировании радиатор охлаждался потоком воздуха в продольном направлении. На рис. 3.12 приведено расчетное распределение температуры на поверхности элемента Li-ion батареи и радиатора для скорости воздуха 4 м/сек.

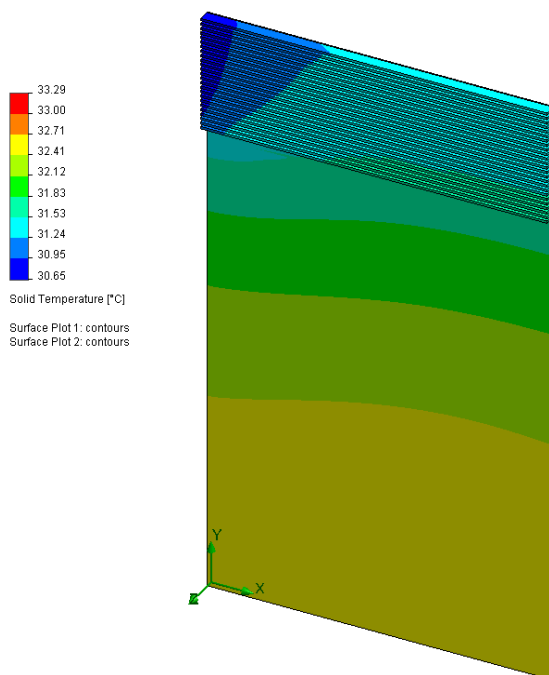


Рисунок 3.12 – Распределение температуры на поверхности элемента Li-ion батареи и радиатора

Входная температура воздуха составляла 25 °С. Температура поверхности составила 31 – 33 °С. В табл. 3.7 приведены вычисленные температуры поверхности элементов батареи и теплопроводность тепловой трубки.

Таблица 3.7 – Вычисленные температуры поверхности элементов батареи и теплопроводность тепловой трубки

$T(\text{возд}), ^\circ\text{C}$	$q, \text{Вт}/(\text{мК})$	$T(\text{мин}), ^\circ\text{C}$	$T(\text{макс}), ^\circ\text{C}$	$T(\text{сред}), ^\circ\text{C}$
9.0	1100	17.1	21.8	20.3
20.0	1450	27.6	31.9	30.4
30.2	2400	37.0	40.5	39.2
38.6	2600	45.4	48.8	47.6

Эффективность охлаждения батареи зависит от теплопроводности тепловой трубки и эффективности охлаждения радиатора потоком:

$$(Q/ITD)^{-1} = (Q/ITD_{\text{radiator}})^{-1} + q^{-1}, \quad (3.23)$$

где Q/ITD_{radiator} определяется как:

$$Q/ITD_{\text{radiator}} = \frac{Q}{T_{\text{radiator}} - T_{\text{air}}}, \quad (3.24)$$

и T_{radiator} – средняя температура поверхности радиатора, полученная в результате моделирования.

Второй член в правой части уравнения (3.23) соответствует средней тепловой проводимости вдоль тепловой трубки:

$$q = Q/\Delta T, \quad (3.25)$$

где ΔT разность средней температуры поверхности элемента батареи и средней температуры радиатора.

Величина q была вычислена из уравнения (3.23) на основании ранее полученных значений (Q/ITD) и $(Q/ITD)_{\text{radiator}}$. На рис. 3.13 показана температурная зависимость (Q/ITD) , $(Q/ITD)_{\text{radiator}}$ и q .

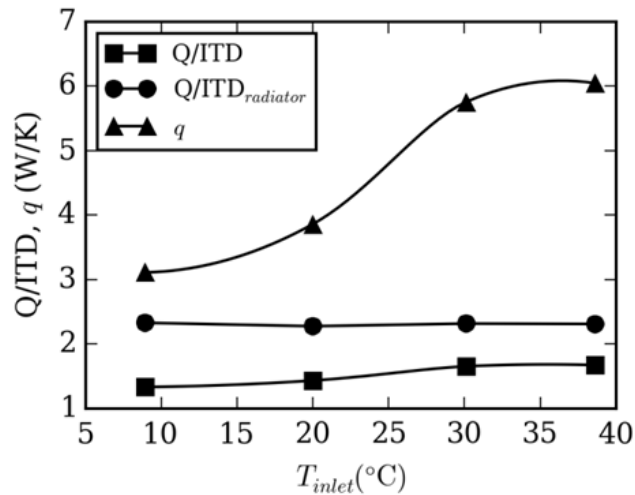


Рисунок 3.13 – Температурная зависимость Q/ITD , Q/ITD_{radiator} и q

Для расчета теплопроводности поверхности перехода жидкость – пар воспользуемся кинетической теорией испарения и конденсации из [107]

Поток тепла через поверхность раздела жидкость пар можно записать как:

$$Q/A = j^+ - j^- , \quad (3.26)$$

где A площадь поверхности;

j^+ и j^- – потоки тепла с поверхности жидкости в пар и обратно.

Считая пар, идеальным газом, для потока тепла можно записать:

$$j = \frac{m_0 \lambda n \langle v \rangle}{4} , \quad (3.27)$$

где m_0 молекулярная масса;

λ – скрытая теплота парообразования;

n – концентрация;

$\langle v \rangle$ – средняя скорость молекул пара.

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}}, \quad (3.28)$$

где k – константа Больцмана;

T – температура газа.

Для идеального газа:

$$n = \frac{P}{kT}, \quad (3.29)$$

где P – давление газа.

Используя (3.29) можно записать поток (3.25) в виде:

$$j = \lambda \sqrt{\frac{M}{2\pi RT}} P, \quad (3.30)$$

где M – молярная масса газа;

$R=8.31 \text{ J/(mol K)}$ – удельная газовая постоянная.

Можно считать, что слой пара над жидкостью имеет ту же самую температуру T_l и давление P_l что и испаряющаяся жидкость. Тогда:

$$j^+ = \lambda \sqrt{\frac{M}{2\pi RT_l}} P_l. \quad (3.31)$$

Для пара вдали от поверхности жидкости:

$$j^- = \lambda \sqrt{\frac{M}{2\pi RT_v} P_v} , \quad (3.32)$$

где T_v и P_v температура и давление пара.

Для нашей рабочей температуры с достаточной точностью можно заменить T_l и T_v в (3.31), в (3.32) температурой насыщенного пара T_s . Подставив (3.31) и (3.32) в (3.26) получим:

$$Q = \lambda A \sqrt{\frac{M}{2\pi RT} \Delta P} , \quad (3.33)$$

где $\Delta P = P_l - P_v$ – перепад давления на переходе жидкость – пар.

Используя соотношения Клауса - Клайперона для идеального газа:

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\lambda M}{RT_s^2} P . \quad (3.34)$$

Можно записать (3.33) как:

$$Q = \frac{\lambda^2}{\sqrt{2\pi}} \left(\frac{M}{R}\right)^{\frac{3}{2}} A \frac{P}{T_s^{\frac{5}{2}}} \Delta T . \quad (3.35)$$

Окончательно, теплопроводность перехода пар - жидкость будет:

$$q = \frac{Q}{\Delta T} = \frac{\lambda^2}{\sqrt{2\pi}} \left(\frac{M}{R}\right)^{\frac{3}{2}} A \frac{P}{T_s^{\frac{5}{2}}} , \quad (3.36)$$

Уравнение (3.36) описывает температурную зависимость тепловой

проводности тепловой трубки типа термосифон.

Как видно на рис. 3.13, эффективность охлаждения всей системы также определяется и зависимостью (3.36). Количественное сравнение между температурной зависимостью q , приведенной на рис. 3.13 и в уравнении (3.36) не проверялось. Уравнение (3.36) дает только температурную зависимость для перехода жидкость - пар и для реальной геометрии могут быть существенные отличия. Поэтому может быть только качественная оценка. Нормировочный коэффициент был выбран таким, чтоб теплопроводность в (3.36) стала равна теплопроводности q представленной на рис. 3.14 при температуре потока воздуха равной 9°C . Значения P и T_s в (3.36) для всех экспериментальных значений брались из данных фазовой диаграммы бутана [108].

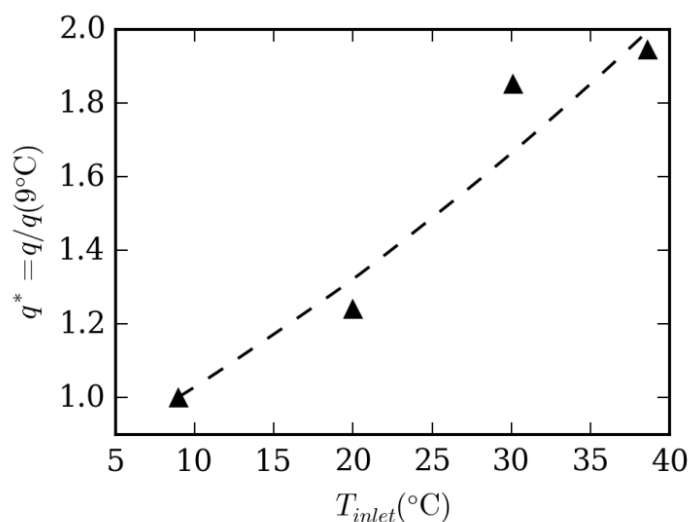


Рисунок 3.14 – Сравнение относительных изменений теплопроводности тепловой трубки

На рис. 3.14 сравниваются относительные изменение теплопроводности тепловой трубки в зависимости от температуры входного воздуха для теплопроводностей, полученных из экспериментальных данных (сплошные треугольники) и расчета по кинетической модели испарения и конденсации газа (пунктирная линия).

3.4 Исследование вычислительного метода для конвективных потоков в замкнутом объеме

Вычислительный метод на основе комплекса проблемно-ориентированного программного продукта был использован для прикладной задачи математического моделирования тепловых процессов и естественной конвекции в оптической ячейке гелия - 3.

На рис. 3.15 показана геометрическая модель тепловой камеры с ячейкой для оптической накачки поляризации.

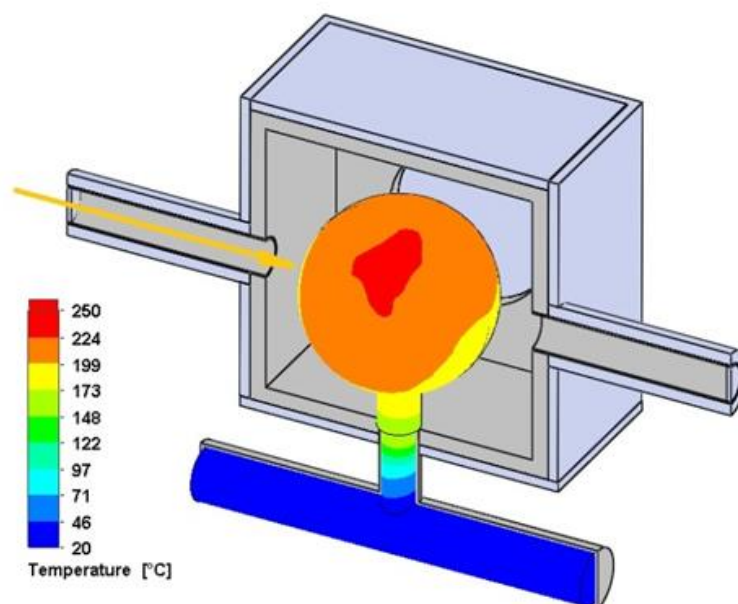


Рисунок 3.15 – Модель тепловой камеры с ячейкой для оптической накачки поляризации. Стрелкой показано направление потока воздуха

Тепловая камера имеет внешний размер $150 \times 150 \times 150$ мм и изготовлена из шести керамических пластин толщиной 8 мм. В противоположных стенках камеры сделаны окна диаметром 80 мм для прохождения света лазерного излучения. Толщина стекол 6 мм. Для входа и выхода воздушного потока и переходной трубки между двумя частями ячейки гелия - 3 имеются отверстия диаметром 20 мм.

Внутри тепловой камеры расположена стеклянная сфера, соединенная

трубкой с внешним цилиндрическим объемом, в котором изучаются спиновые эффекты при взаимодействии электронного пучка ускорителя с поляризованными ядрами гелия – 3 [4]. Толщина всех элементов гелиевой ячейки 2 мм.

Математическая модель тепловых процессов и газогидродинамики в тепловой камере представляет совокупность уравнений Навье-Стокса (2.49 – 2.54). В гелиевой ячейке при наличии сил гравитации уравнения (2.49) будут иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho\rho_i)}{\partial x_i} &= 0, \\ \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \tau_{ij} &= \rho g_i, \\ \frac{\partial q_i}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i \varepsilon) - \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} u_j) &= 0, \end{aligned} \quad (3.37)$$

где g_i – ускорение свободного падения.

В стенках камеры и стенках гелиевой ячейки тепловые процессы описываются уравнением теплопроводности без источников генерации тепла (уравнение 3.18). В качестве элементов, имитирующих тепловыделение, в ячейку добавлены равномерно расположенных по диаметру лазерного пучка 32 тонких нагревателя ($D = 3\text{мм}$). Генерация тепла учитывалась как граничное условие для нагревателей – равномерное выделение тепла по поверхности. Расчеты производились для суммарного тепловыделения 0, 5, 10, 15 Вт.

Граничные условия при моделировании выбирались следующим образом. На границе тепловой камеры с внешней средой и внешней части ячейки задавался коэффициент теплоотдачи $10 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{K})$, который соответствует охлаждению слабо конвективным потоком внешнего воздуха. Температура на внешней поверхности теплоизоляции и внешней части ячейки составляла 20°C .

Температура воздуха на входе в тепловую камеру составляла 195°C и объемный расход составлял 3 л/сек. На выходе задавалось давление, равное

атмосферному. Начальное давление гелия в ячейке было 4 атм. при 20°C .

Моделирование процессов конвекции в гелиевой ячейке осуществлялось при помощи пакета SolidWorks Flow Simulation. В качестве теплотехнических и термодинамических характеристик для применяемых материалов и газов использовались данные, включенные в базу данных SolidWorks Flow Simulation.

В результате моделирования получены объемные распределения температуры, давлений, величины и компонентов потоков газов в тепловой камере и ячейке. На рис. 3.16 показано распределения температуры в тепловой камере и гелиевой ячейке при одностороннем тепловыделении 15 Ватт на входе пучка лазерного излучения. Стрелкой показано направление излучения лазерных диодов.

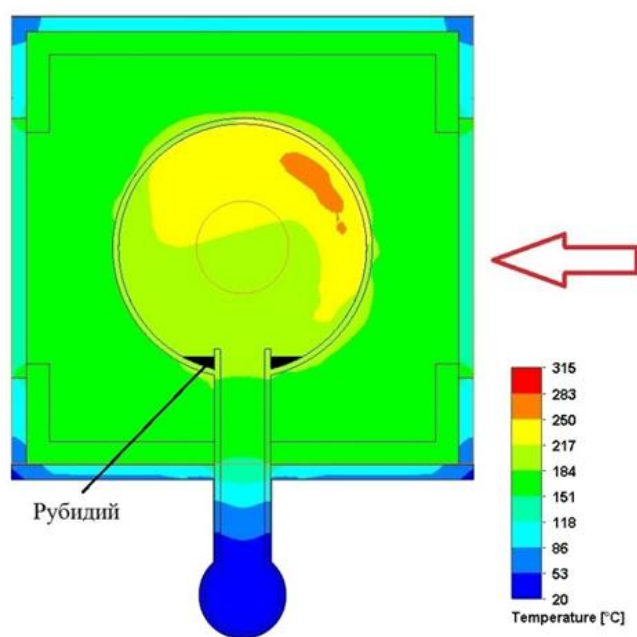


Рисунок 3.16 – Распределение температуры в тепловой камере и ячейке в сечении, проходящем через центр ячейки

На рис. 3.17 и рис. 3.18 приведены зависимости температуры и величин компонентов скоростей конвективных потоков при однородном а) и одностороннем б) выделении тепла, соответственно, при поглощении мощности лазерного излучения для 1 – 15 Вт.

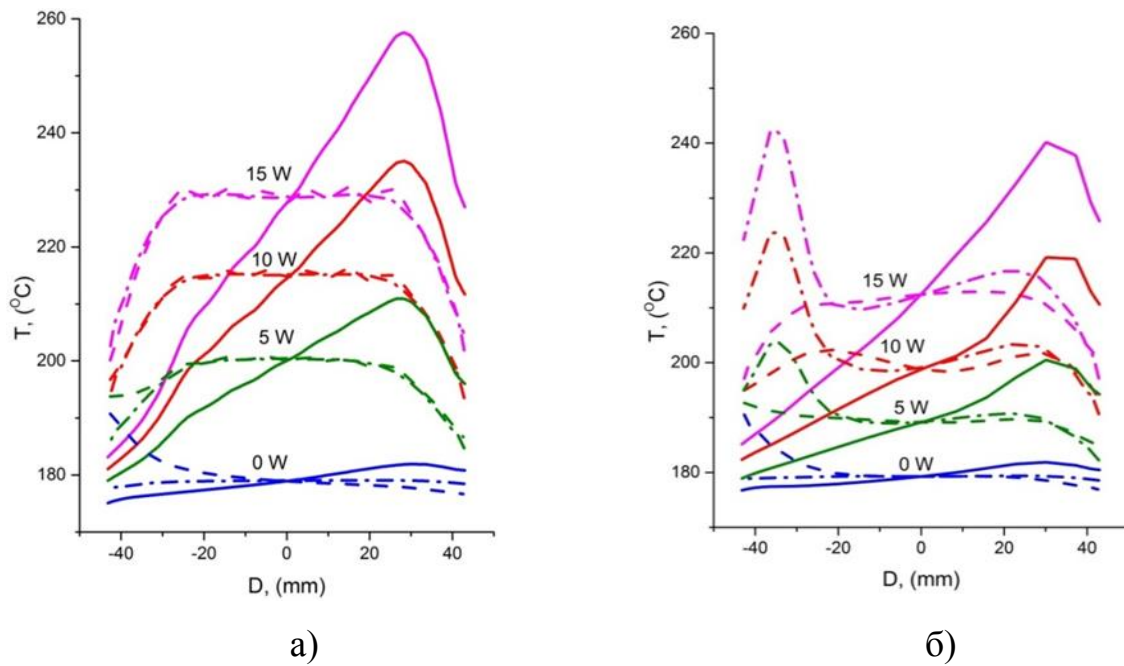


Рисунок 3.17 – Зависимость температуры в ячейке при однородном а) и одностороннем б) выделении тепла

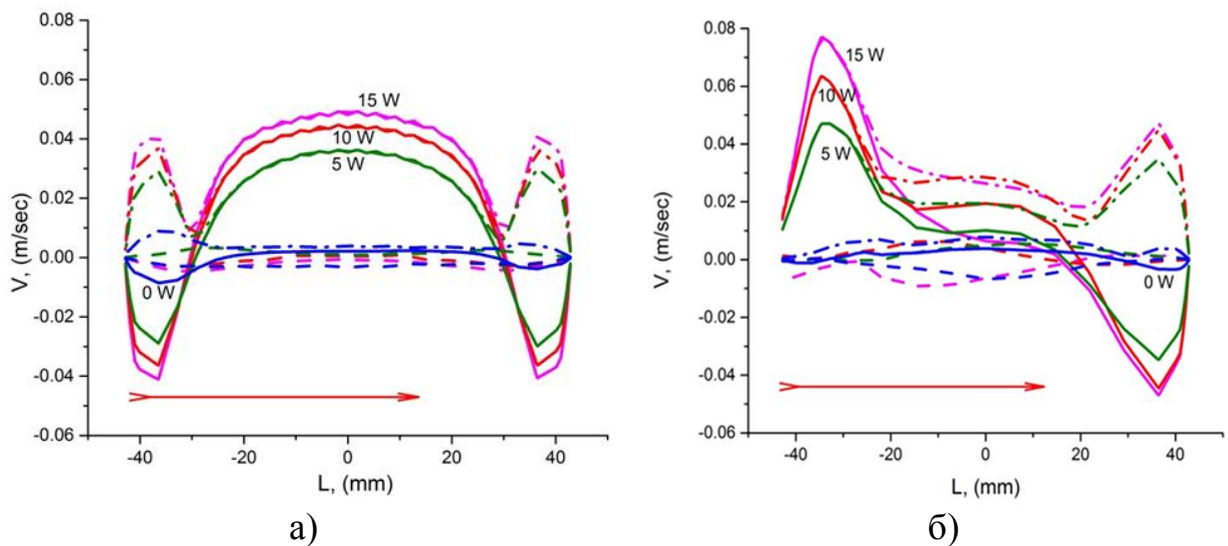


Рисунок 3.18 – Зависимость величины компонентов скорости конвективного потока гелия на оси пучка лазерного излучения при однородном а) и одностороннем б) выделении тепла

Линии на рисунках: сплошная – в вертикальном направлении; пунктирная – в направлении лазерного излучения; штрих пунктирная – в горизонтальном направлении. Стрелкой указано направление излучения лазерных диодов.

Характер конвекции гелия сильно отличается от длины области

поглощения мощности. Отсутствие нулевых компонентов скорости конвективных потоков во всем объеме ячейке свидетельствует об эффективном перемешивании гелия, приводящего к получению более однородной поляризации ядер гелия по всему объему ячейки

3.5 Анализ системы охлаждения аккумуляторных батарей на основе М-цикла

В настоящее время значительное внимание уделяется разработке экологически чистых транспортных средств: электроавтомобилей и гибридных автомобилей. Практически все ведущие автомобильные компании имеют в своем модельном ряду автомобили такого типа.

Одним из перспективных методов отвода тепла от аккумуляторной батареи является использование так называемого М-цикла (Maisotsenko-Cycle) [5, 61]. Данный термодинамический цикл основан на использовании психрометрической разности температур и обеспечивает охлаждение газа или жидкости практически до температуры, соответствующей точке росы входящего рабочего потока воздуха.

В теплообменных установках, на основе М-цикла, используется принцип косвенного испарения жидкости. Система сообщающихся каналов для сухого и влажного воздуха обеспечивает эффективное насыщение рабочего потока воздуха водяным паром, соответственно, увеличивая отвод тепла от охлаждаемого газа или жидкости. Процесс испарения жидкости происходит при постоянном давлении, поэтому в системе охлаждения на основе М-цикла нет необходимости использовать компрессоры для сжатия воздуха.

Для расчета необходимых характеристик теплообменника на основе М-цикла рассмотрим термодинамику процесса охлаждения входящего воздуха. При этом в качестве входных параметров рассмотрим наиболее тяжелый тепловой режим: температура воздуха на входе в теплообменник $T_{in} = 50^{\circ}\text{C}$, относительная влажность воздуха 30%, что соответствует точке росы 19°C .

Теплообменник должен обеспечивать температуру воздуха на выходе $T_{out} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, перепад температуры воздуха составляет $\Delta T = T_{in} - T_{out} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Согласно расчетам, для аккумуляторной батареи с тепловыделением $1,5\text{ кВт}$ состоящей из 100 элементов расход воздуха при скорости обдува элемента 3 м/с составляет $\dot{V} = 0,18\text{ м}^3/\text{с}$. Тогда необходимую тепловую мощность теплообменника W можно определить из соотношения:

$$W = c_{P,air} \rho_{air} \dot{V} \Delta T, \quad (3.38)$$

где $c_{P,air}$ – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении;

ρ_{air} – плотность воздуха.

Расчет по формуле (3.38) дает значение тепловой мощности теплообменника $W = 6900\text{ Вт}$. Поскольку данная тепловая мощность обеспечивается испарением воды, то расход воды дается соотношением:

$$\dot{m}_{water} = \frac{W}{(\lambda_{water} + c_{water} \Delta T)}, \quad (3.39)$$

где λ_{water} – удельная теплота парообразования воды;

c_{water} – удельная теплоемкость воды.

Обычно можно пренебречь вторым слагаемым в знаменателе, описывающим нагрев водяного пара, по сравнению с первым, соответствующим испарению.

Из уравнения (3.39) массовый расход воды при заданных условиях составляет $\dot{m}_{water} = 0,003\text{ кг/с}$. Соответствующий объемный расход будет составлять $10,8\text{ л/ч}$. Рабочий цикл теплообменника представлен на рис. 3.19.

Линия 1-2-3 представляет собой идеальный М-цикл. В данном цикле абсолютная влажность воздуха возрастает от начального значения $f_1 = 16\text{ г/м}^3$ до значения $f_3 = 83\text{ г/м}^3$. Тогда объемный расход воздуха через теплообменник

должен составлять:

$$\dot{V}_{air} = \frac{m_{water}}{f_2 - f_1} . \quad (3.40)$$

Подстановка численных значений дает $\dot{V}_{air} = 0.045 \text{ м/с}$.

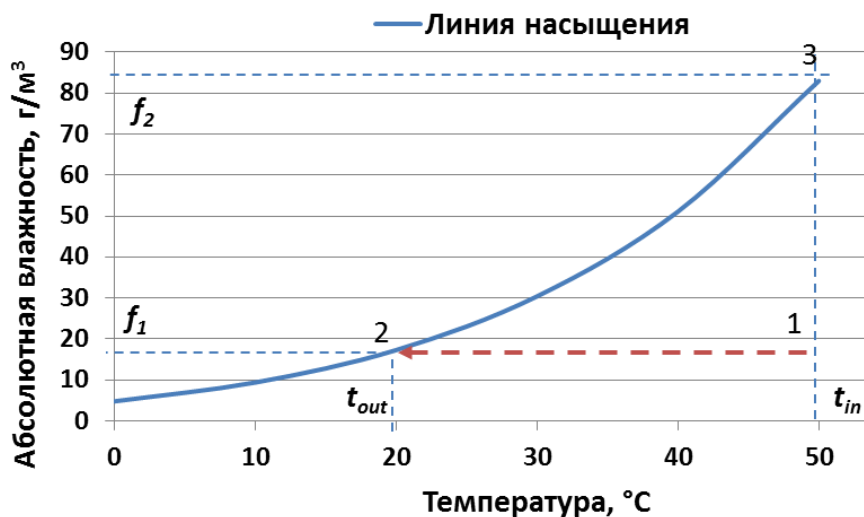


Рисунок 3.19 – Психрометрическая диаграмма рабочего цикла теплообменника

Результаты расчетов показывают, что на основе М-цикла возможно создание компактного теплообменника для системы охлаждения аккумуляторной батареи. Необходимо отметить, что полученные значения соответствуют предельному режиму работы теплообменника. При этом наиболее критичным параметром оказывается довольно высокий расход воды, тогда как воздушный поток через теплообменник составляет лишь 25% от воздушного потока, охлаждающего аккумуляторную батарею. При снижении температуры входящего потока тепловая мощность, необходимая для охлаждения, и, соответственно, расход воды будут уменьшаться. Так, при $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ тепловая мощность и расход воды уменьшаться в три раза.

При использовании теплообменников данного типа необходимо учитывать ограничение по допустимому значению влажности воздуха. При эксплуатации системы охлаждения во влажном климате необходимо

предусмотреть устройство осушения входящего воздуха. При этом достаточно обеспечить осушение воздуха, проходящего через теплообменник.

Выводы по разделу 3

1. Выполнено моделирование тепловых процессов при охлаждении воздушным потоком элементов Li-ion батареи с некоторыми поверхностями типа «полупины со скругленными кромками», «скрученные ленточки» и «открытые пирамиды», получены средние, минимальные и максимальные температуры элементов и разность входных и выходных давлений воздуха при прохождении его через батарею. Также были получены траектории движения воздуха и локальные температуры в зазорах между элементами батареи. На основании результатов моделирования получены расчетные значения зависимости эффективностей охлаждения батареи от характеристик входного потока воздуха.

2. По результатам моделирования процессов охлаждения воздушным потоком элементов Li-ion батареи можно сделать вывод - применение сложных многоканальных структур на поверхностях элементов батареи позволяет увеличить эффективность охлаждения в 1.5 – 2 раза или, для заданной эффективности охлаждения, уменьшить скорость потока воздуха в зазорах между элементами батареи более чем на 30%. Уменьшение скорости потока воздуха, в зазорах между элементами батареи, позволяет уменьшить мощность вентилятора и создаваемый шум.

3. Выполнено моделирование работы тепловой трубки и процессов охлаждения Li-ion батареи при помощи пакета SolidWorks с модулем SolidWorks Flow Simulation. При сравнении расчетных данных распределения температур на поверхности элементов батареи с экспериментальными результатами была определена эффективная теплопроводность тепловой трубки и зависимость теплопроводности трубки от температуры входного воздушного потока. С повышением температуры входного потока воздуха

теплопроводность тепловой трубки растет и достигает величины $2500 \text{ Вт}/(\text{м}\times\text{К})$. Моделирование теплового режима охлаждения Li-ion батареи с помощью тепловой трубки показывает, что наибольшее переходное тепловое сопротивление возникает на участке охлаждения радиатора тепловой трубки потоком воздуха.

4. Анализ процесса охлаждения на основе М-цикла показывает, что возможно создание компактного теплообменника для понижения температуры входного потока воздуха для системы охлаждения аккумуляторной батареи. Однако, из-за сравнительно большого расхода воды такие устройства желательно использовать стационарно на станциях подзарядки батарей.

Основные положения раздела изложены в работах [2, 4 – 7, 9].

РАЗДЕЛ 4

СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ Li-ion БАТАРЕЙ ВОЗДУШНЫМ ПОТОКОМ

Для исследования характеристик охлаждения Li-ion батареи потоком воздуха выбрана модульная конструкция стенда, состоящего из камеры для исследуемых объектов, внешней системы стабилизации температуры воздушного потока, системы воздухопроводов, датчиков температуры, величины потока и скорости воздуха, контроллеров управления мощностью рефрижератора и нагревателей, системы стабилизации температуры выходного потока воздуха и многоканальной системы измерения температуры. Блок-схема стенда представлена на рис. 4.1.

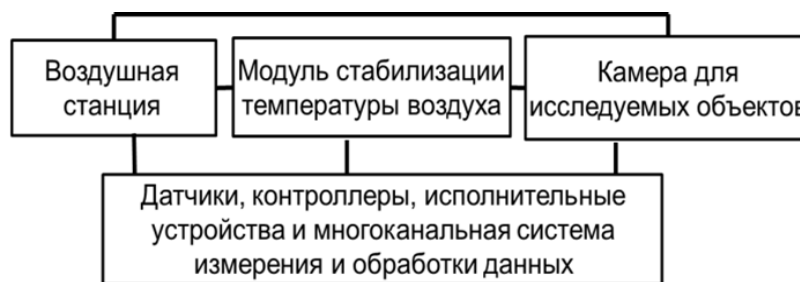


Рисунок 4.1 – Блок-схема стенда для исследования характеристик охлаждения Li-ion батареи воздушным потоком

Модули системы стабилизации температуры потока воздуха разработаны в виде самостоятельно функционирующих узлов с автономной стабилизацией параметров [1].

Необходимый поток воздуха создается с помощью воздушной станции. В качестве входящего воздуха в воздушную станцию может использоваться как внешний воздух, так и выходящий из камеры для исследуемых объектов. Для получения заданной температуры и поддержание ее с необходимой стабильностью используется модуль стабилизации температуры воздуха.

Контроль, периодическая запись и предварительная обработка получаемых данных температуры в камере осуществляется многоканальной автоматизированной системой измерения.

4.1 Воздушная станция и модуль стабилизации температуры

Воздушная станция представляет собой модуль с двумя вентиляторами разной производительности [8]. Коммутация входов и выходов вентиляторов осуществляется вентилями, которые обеспечивают подключение одного из вентиляторов для получения прямого или инвертированного потока воздуха. Воздушная станция обеспечивает подачу воздуха с давлением до 7000 Па и потоком до $80 \text{ м}^3/\text{час}$.

Воздух, поступающий из воздушной станции в модуль стабилизации температуры, охлаждается или нагревается в этом модуле для получения необходимой температуры потока воздуха, входящего в камеру для исследуемых объектов. На рис. 4.2 приведена схема модуля стабилизации температуры.

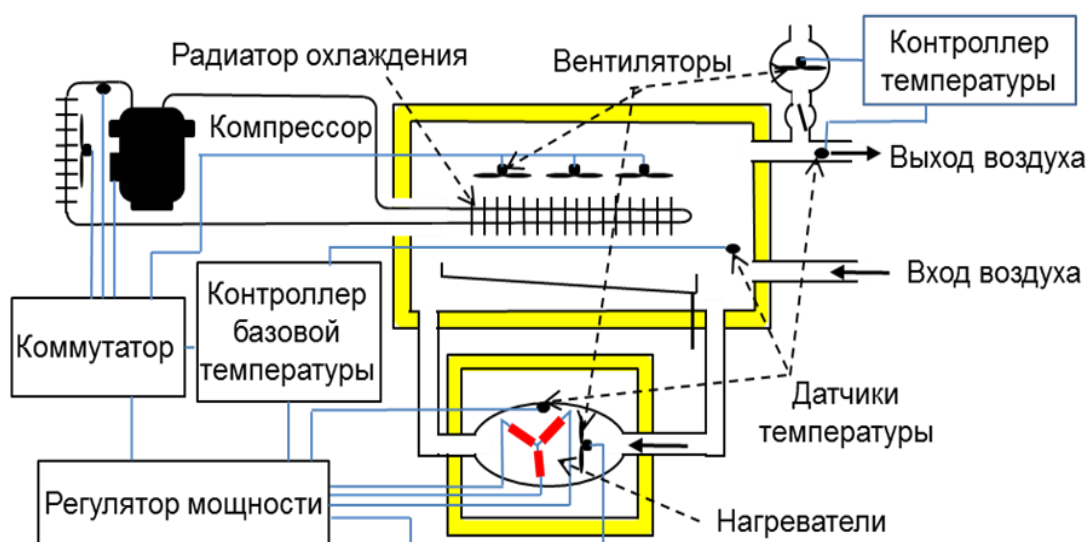


Рисунок 4.2 – Блок - схема модуля стабилизации температуры потока воздуха
(Стрелками показано направление потоков воздуха)

Модуль стабилизации температуры содержит буферную камеру, объемом 1.5 м^3 в которой происходит охлаждение или нагрев воздуха. Для получения температуры воздуха ниже температуры воздуха в окружающей среде используется тепловой насос - компрессорный рефрижератор, принцип работы которого основан на поглощении тепла при кипении низкотемпературнокипящей жидкости. Мощность охлаждения рефрижератора 2.5 кВт при температуре $-20 \text{ }^\circ\text{C}$. Поверхность радиатора охлаждения в буферной камере – 6 м^2 . Компрессорный агрегат оснащен датчиками входного и выходного давления и температуры корпуса, которые блокируют работу рефрижератора при выходе давления за допустимые пределы и перегреве компрессора. Перед теплообменником установлен автоматический терморегулирующий вентиль. Управляется рефрижератор контроллером температуры с пропорционально интегрально дифференциальным (ПИД) регулятором. На рис. 4.3 приведен общий вид стенда для исследования характеристик охлаждения Li-ion батареи воздушным потоком.



Рисунок 4.3 – Общий вид стенда для исследования характеристик охлаждения Li-ion батареи воздушным потоком

4.2 Имитаторы элементов Li-ion батареи

Выделение тепла в Li-ion батарее зависит от степени заряда батареи, тока заряда/разряда, срока и режима эксплуатации, температуры батареи. Для тестирования работы стенда исследовались эффективности охлаждения Li-ion батареи с тепловыделением, соответствующему наиболее тяжелому режиму эксплуатации. Кроме того трудно подобрать несколько идентичных элементов батареи для исследования, с хорошей точностью, распределения температуры в объеме батареи и эффективности охлаждения сборки элементов батареи. Поэтому были использованы имитаторы [1, 5] элементов батареи с теплотехническими свойствами элементов Li-ion батареи.

На рис. 4.4 показана конструкция имитаторов Li-ion аккумуляторов.

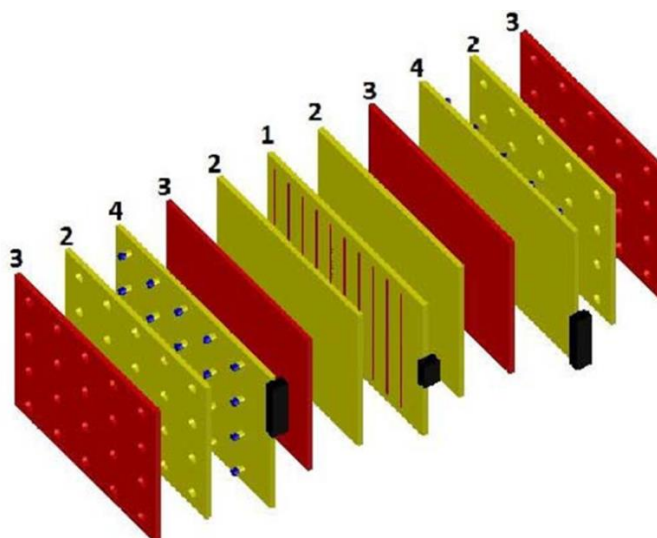


Рисунок 4.4 – Конструкция имитаторов Li-ion аккумуляторов

Имитаторы представляют собой склеенные сборки из медных и стеклотекстолитовых пластин, склеенных термостойким клеем с теплопроводностью $2.3 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

Для обеспечения теплопроводности равной $60 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ в плоскости имитатора суммарная толщина медных пластин (3) составила 1.8 мм и вес 0.48 кг . Далее, были рассчитаны необходимые плотность и теплоемкость стеклотекстолитовых пластин для получения средней плотности и

теплоемкости имитатора близкими к свойствам Li-ion аккумуляторов. Из существующих материалов наиболее подходящим является стеклотекстолит с удельной плотностью 1.6 г/см^3 , теплоемкостью $1.45 \text{ Дж/(г}\times\text{град)}$ и теплопроводностью $0.3 \text{ Вт/(м}\times\text{К)}$. Применение такого материала обеспечивает удельную плотность 2.7 г/см^3 и удельную теплоемкость $0.76 \text{ Дж/(г}\times\text{град)}$, что находится в соответствии со свойствами Li-ion аккумуляторов, используемых в транспортных средствах.

Теплопроводность такого имитатора перпендикулярно поверхностям имеет величины $0.4 - 0.45 \text{ Вт/(м}\times\text{К)}$, что в два раза меньше требуемого. Для получения теплопроводности $1 \text{ Вт/(м}\times\text{К)}$ по толщине имитатора все наружные и внутренние медные пластины соединены с помощью медных проводов, равномерно распределенных по площади. Сечение этих проволочек выбрано таким, чтобы обеспечить необходимую поперечную теплопроводность.

На внутренней диэлектрической пластине (1) имитатора намотан нагреватель из провода с высоким удельным сопротивлением. В собранном виде нагреватель обеспечивает выделение 15 Вт тепла, однородно по площади, в каждом имитаторе.

На диэлектрической пластине (4) равномерно расположены по 20 датчиков температуры типа ТМП36 в корпусе для поверхностного монтажа.

Выводы датчиков подключены к 40 контактным разъемам с помощью проводящих дорожек на плате. Между нагревателем, медными пластинами и платами с датчиками температуры расположены тонкие диэлектрические пластины (2). На рис. 4.5 показаны расположения датчиков и нагревателей в имитаторе элемента Li-ion батареи и общий вид имитатора.

Для исследования эффективности охлаждения батареи имитаторы собирались в модули, состоящие из 2 – 10 имитаторов и помещались в камеру. Расстояние между имитаторами в модуле выбиралось $2 \div 4 \text{ мм}$ для получения максимальной эффективности охлаждения в зависимости от допустимых скоростей потока воздуха и тепловой мощности, выделяемой в имитаторах. На рис. 4.6 показана сборка из 6-ти имитаторов.

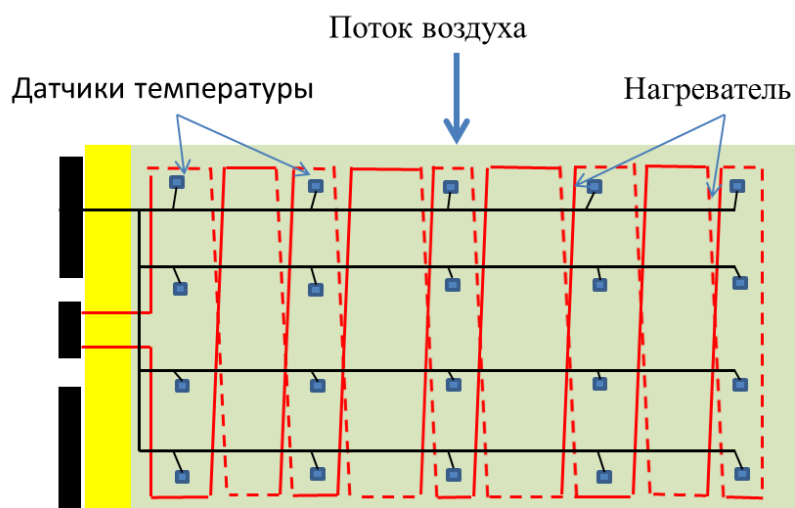


Рисунок 4.5 – Расположения датчиков и нагревателей в имитаторе элемента Li-ion батареи

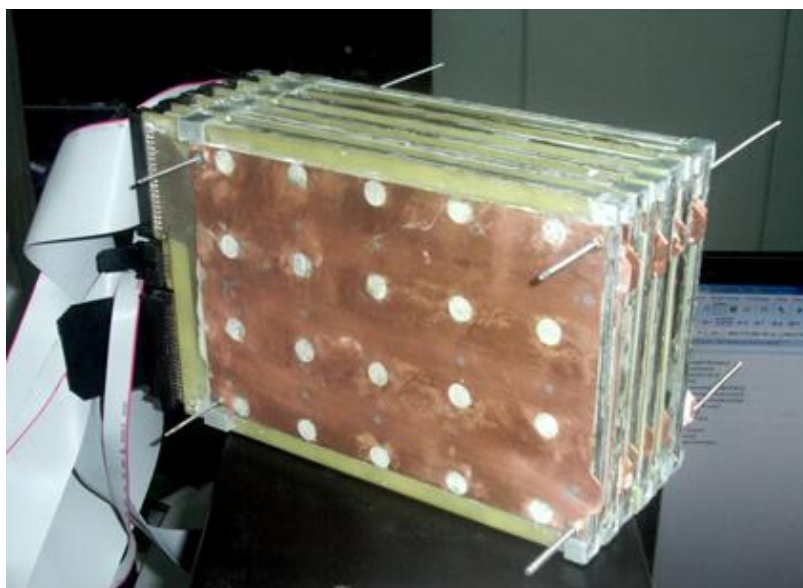


Рисунок 4.6 – Сборка из 6-ти имитаторов

В нагреватели имитаторов подавался ток от регулируемых источников стабилизированного напряжения. Раздельная подача мощности в имитаторы позволяет независимо подбирать величину мощности в каждом внутреннем в сборке имитаторе и устанавливать половинные мощности в крайних имитаторах, при необходимости.

4.3 Камера для исследования эффективности охлаждения воздушным потоком Li-ion батарей

Конструкция камеры для исследуемых объектов, типы и расположение датчиков зависят от того, какие тепловые и иные характеристики объектов будут исследоваться [1, 5]. На рис. 4.7 приведена схема камеры для исследования тепловых характеристик Li-ion батареи, охлаждаемой потоком воздуха.

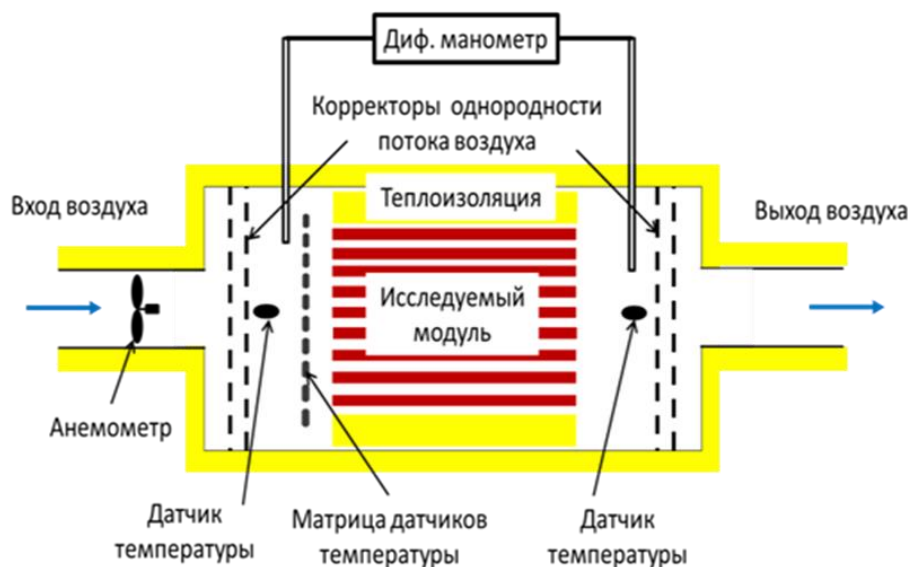


Рисунок 4.7 – Схема камеры для исследуемых объектов

В камере для исследуемых объектов в середине размещен исследуемый модуль. На входном и выходном потоке воздуха в камере установлены корректоры однородности потока воздуха, представляющие собой наборы перфорированных перегородок.

Для измерения распределения температуры воздуха во входном потоке, в камере перед исследуемым модулем установлена матрица из датчиков температуры. Отдельные прецизионные датчики температуры установлены перед и после исследуемого модуля. В трубке подачи воздуха в камеру установлен анемометр для измерения величины потока воздуха. Для измерения перепада давления воздуха при прохождении его через исследуемый модуль

используется дифференциальный манометр. С помощью этого манометра измеряется также и однородность давления во входном потоке воздуха. Для этого измерительные трубки могут перемещаться в камере.

С целью уменьшения внешних теплопритоков все воздухопроводы, камера модуля стабилизации температуры и камера для исследуемых объектов теплоизолированы. На рис.4.8 показана калориметрическая камера для сборки из шести имитаторов Li-ion батареи.



Рисунок 4.8 – Калориметрическая камера для шести имитаторов

4.4 Многоканальная система регистрации температуры и обработки данных

Система регистрации температуры и записи результатов в РС состоит из датчиков температуры, многоканальных аналоговых мультиплексоров, аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и персонального компьютера (РС) [1, 10, 11]. В качестве датчиков температуры могут использоваться датчики разного типа, в которых принцип преобразования основан на том, что измеряемая температура преобразуется в электрическую величину. В качестве

таких датчиков использовались датчики типа TMP36 и терморезисторы PT100 и PT1000 с необходимыми источниками питания.

В качестве АЦП была использована PC карта NI PCI-6225, состоящая из 80 канального 16 - разрядного АЦП, двух цифро-аналоговых преобразователей и цифровых портов [109]. Максимальная скорость измерения АЦП для одноканального режима 250 кГц . Для N каналов – $250 \text{ кГц}/N$.

Для увеличения каналов измерения было изготовлено 4 дополнительных 20 – канальных аналоговых мультиплексора с коммутацией на 8 направлений. В таких 20 – канальных мультиплексорах используются по 20 аналоговых мультиплексоров MAX4581 [110]. На рис. 4.9 представлена блок схема многоканальной системы регистрации температуры.

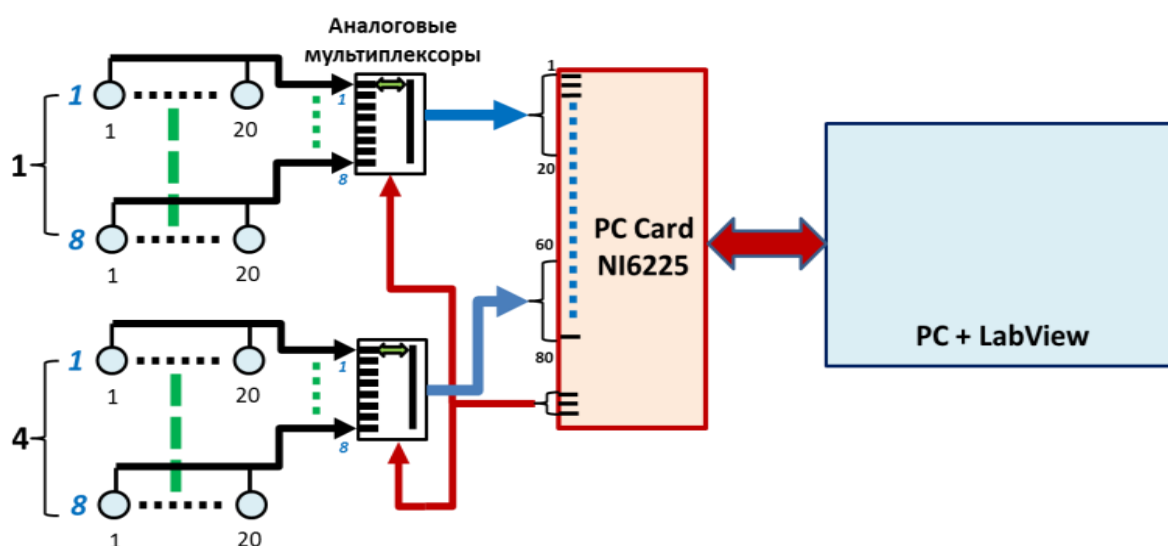


Рисунок 4.9 – Блок-схема многоканальной системы регистрации температуры

Программное обеспечение системы регистрации температуры состоит из программного модуля, выполнено в среде LabView [111] и дополнительной программы для детального анализа результатов, записанных в файл. Программа LabVIEW состоит из двух частей:

- блочной диаграммы, описывающей логику работы виртуального прибора;

– лицевой панели, описывающей внешний интерфейс виртуального прибора. Задачи, выполняемые при измерении и записи температуры, представлены на рис. 4.10.



Рисунок 4.10 – Задачи, выполняемые программой в среде LabVIEW

Программное обеспечение LabView содержит набор драйверов для работы с различными приборами, ряд модулей математической и логической обработки получаемой информации и элементов передачи, записи и визуализации этой информации. В LabView используется визуальный специализированный язык программирования «G». Назначение языка «G»: сбор данных, управление инструментами, обработка сигналов, автоматизация. Последовательность выполнения операторов определяется наличием данных на входах этих операторов (не порядком их следования). Операторы, не связанные по данным, выполняются параллельно в произвольном порядке.

Для конкретных задач создается блок-диаграмма работы [1,11]. На рис. 4.11 приведена блок-диаграмма LabView для математической и логической обработки и представления результатов на мониторе.

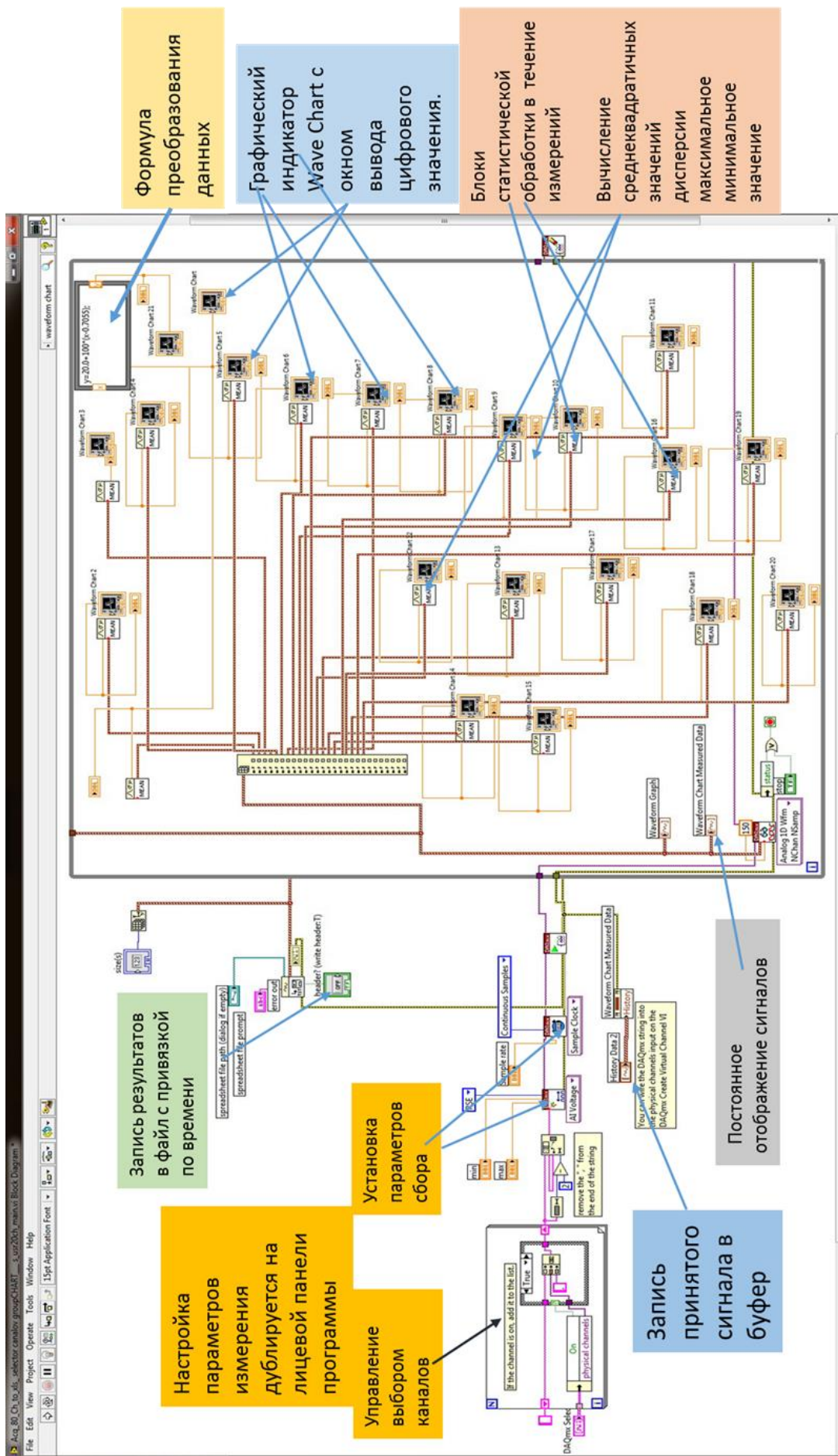


Рисунок 4.11 – Блок-диаграмма LabView для обработки и представления данных

Программа LabVIEW состоит из двух частей:

- блочная диаграмма, описывает логику работы виртуального прибора;
- лицевая панель, описывает внешний интерфейс виртуального прибора, содержит средства ввода-вывода: кнопки, переключатели, светодиоды, шкалы, информационные табло и т. п.

Блочная диаграмма содержит функциональные узлы, являющиеся источниками, приемниками и средствами обработки данных. Также компонентами блочной диаграммы являются терминалы и управляющие структуры (оператор «IF», операторы цикла «FOR» и «WHILE» и т. п.). Функциональные узлы и терминалы объединены в схему линиями связей.

В окне панели расположены элементы управления;

- строка с заданным путем файла для записи данных;
- командные строки для программирования каналов;
- графики, отображающие значения температуры в течение эксперимента;
- цифровые индикаторы текущих значений;
- цифровой элемент управления, задающий частоту опроса каналов;
- строка с текущими значениями температуры.

Программа организована в виде цикла. В цикле располагаются виртуальные приборы, принимающие и обрабатывающие данные. Главный цикл содержит в себе все элементы управления и обеспечивает запись данных в файл на жесткий диск компьютера.

Программные модули LabVIEW DigitalU32 и Analog10Wfm обеспечивают работу с цифровыми и аналоговыми портами, соответственно. Режим работы с картой NI PCI-6225 иницируется в модулях Digital Output, All Voltage и Sample Clock.

Получаемые данные могут отображаться на дисплее в графическом режиме для любого канала в виде отдельных последовательностей измеряемой величины так и вместе для заданных каналов. На рис. 4.12 представлена часть дисплея во время измерений с медленным изменением температуры.

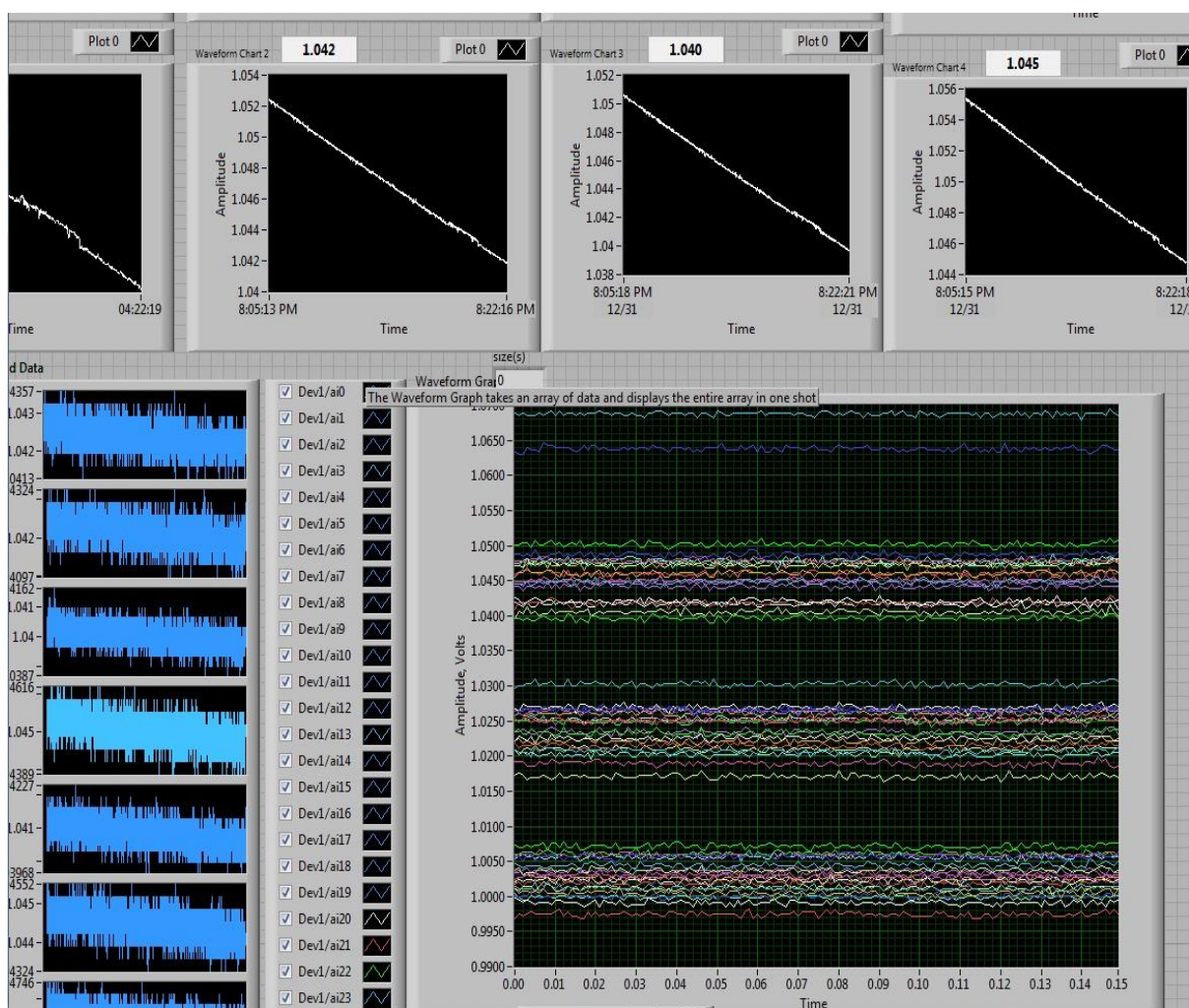


Рисунок 4.12 – Пример представления информации на экране дисплея во время измерений

Дополнительная программа обеспечивает обработку данных, записанных в файл, включая калибровку датчиков, по каналное усреднение с удалением данных с отклонением больше заданного отклонения от среднего и вычисление нового среднего. В зависимости от типа датчика – вычисление температуры. Эта программа работает в диалоговом режиме.

4.5 Охлаждение Li-ion батареи с помощью тепловой трубки

Высокая теплопроводность тепловых трубок (более 2000 Вт/(м К)) позволяет использовать их для охлаждения различных устройств [112 – 115].

Отсутствие подвижных частей в тепловых трубках делает их очень надежными. Однако, для охлаждения Li-ion батареи тепловыми трубками могут возникнуть некоторые ограничения. Это может быть незначительный подъем низкотемпературно кипящих жидкостей капиллярным слоем.

Невысокое давление упругих паров при температуре 20 – 30 °С, приводящее к увеличению парового канала и, как следствие, поперечного размера трубки [116]. Одним из решений этих проблем может быть параллельное включение тонких тепловых трубок, работающих по принципу термосифона [69].

Разработанная тепловая трубка представляет собой сборку из 16 тонких тепловых трубок, которые соединены в области кипения и в области конденсации жидкости [6,7,9].

Тонкие тепловые трубки изготовлены из нержавеющей трубок диаметром 4 мм и толщиной стенки 0.3 мм. Чтобы можно было поместить трубки в зазор между имитаторами 3 мм, они сдавливались в тисках до этого размера. В результате деформации ширина каждой трубки становилась 5 мм. В качестве капиллярного слоя использовался один слой нержавеющей сетки 0.12 x 0.14 мм.

Капиллярный слой необходим для разделения потоков жидкости и пара в тепловой трубке и для полного покрытия внутренней поверхности трубки жидкостью. Размеры элементов тепловой трубки приведены на рис. 4.13.

Для исследования процесса охлаждения Li-ion батареи с помощью тепловой трубки была изготовлена измерительная камера для двух ячеек Li-ion батареи, размером одной ячейки 200×150×12 мм.

Схема измерительной камеры с тепловой трубкой показана на рис. 4.14.

Измерительная камера состоит из двух имитаторов ячеек Li-ion батареи с зазором между ними 3 мм. В этом зазоре находится нагреваемая часть тепловой трубки. Выделяемая тепловая мощность в имитаторах – 2×7.5 Вт. Вторая часть этой тепловой трубки (охлаждаемая) находится в воздушном канале измерительной камеры [6].

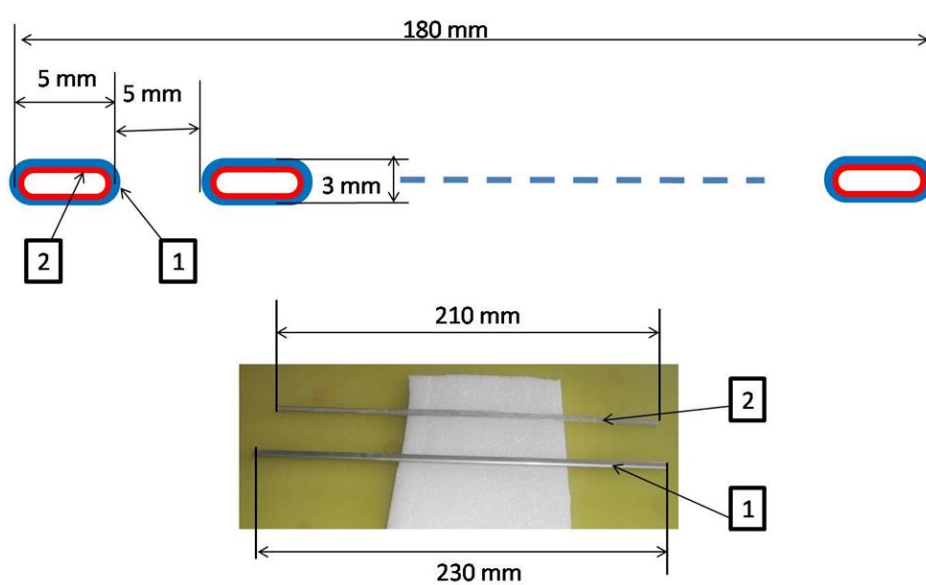


Рисунок 4.13 – Размеры основных элементов тепловой трубки

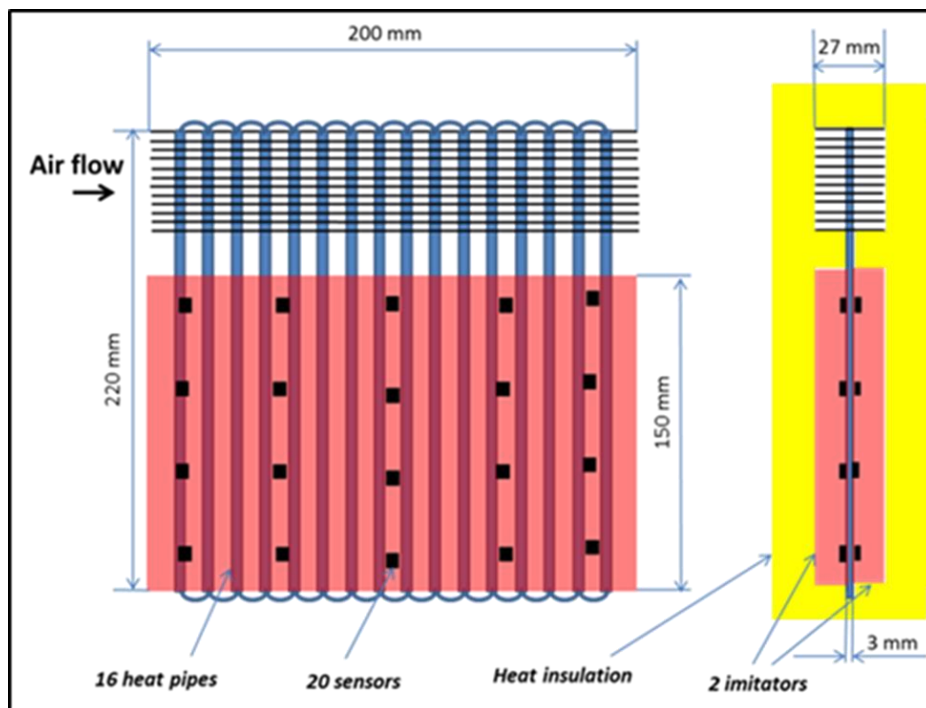


Рисунок 4.14 – Измерительной камеры с тепловой трубкой

Через охлаждаемую часть тепловой трубки продувается воздух, с величиной потока 3 л/сек и стабилизируемой входной температурой. Перепад давления в охлаждаемой части тепловой трубки $dP(\text{air}) = 28 \text{ Pa}$ для всех температур входного потока воздуха. На рис.4.15 приведена тепловая трубка.



Рисунок 4.15 – Тепловая трубка

Тепловая трубка заполнялась жидким бутаном. Уровень жидкости составлял при заправке 20 мм. Количество бутана корректировалось для получения наибольшей эффективности охлаждения. Свойства бутана приведены в [117, 118].

Исследование эффективности охлаждения проводились на стенде. Для этих исследований камера с исследуемой тепловой трубкой подключалась к выходному и входному воздуховодам воздушной станции и модулю стабилизации температуры, соответственно.

4.6 Поверхности для улучшения эффективности охлаждения

Эффективность передачи тепла в поток воздуха в большой мере зависит от площади соприкосновения воздуха с имитатором и наличия перемешивания

слоев в потоке. Существует большое количество способов для повышения эффективности охлаждения. Для проверки работы стенда и получения систематических данных эффективностей охлаждения Li-ion батареи воздушным потоком были выполнены экспериментальные исследования тепловых процессов для некоторых видов поверхностей Li-ion элементов. В разделе 2 приведены результаты моделирование таких процессов с помощью программного пакета SolidWorks Flow Simulation [104].

Чтобы охлаждаемые имитаторы имели определенный вид поверхности, на их поверхности устанавливались алюминиевые фольги с заданным видом поверхности [3, 4, 8]. Фольги имели толщину $0,1 \div 0,2$ мм и приклеивались пастой с высокой теплопроводностью (паста силиконовая Н, производитель ТермоPasty). На рис. 4.16 приведены размеры элементов поверхностей типа: а) полушины со скругленными кромками, б) скрученные ленточки, в) открытые пирамиды.

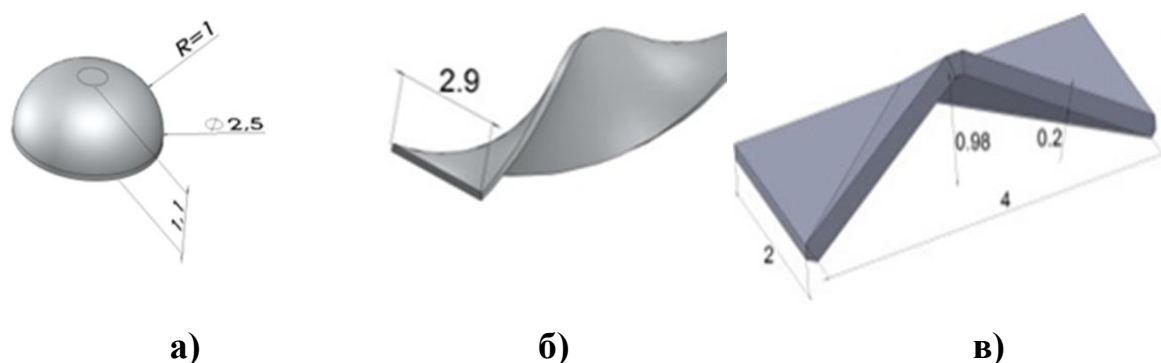


Рисунок 4.16 – Размеры элементов поверхностей

Поверхности типа «полушины со скругленными кромками» изготовлены методом штамповки из алюминиевой фольги толщиной 0.2 мм и размером 150×200 мм. Полушины со скругленными кромками расположены рядами с расстоянием 5 мм между полушинами и между рядами. При этом на противоположных сторонах имитаторов они сдвинуты на 2.5 мм в двух направлениях. Расстояние между поверхностями 3 мм. Для исследования эффективности охлаждения использовались сборка из 6 имитаторов. В этом

случае поток воздуха направлялся в 5 зазоров между имитаторами.

Поверхности типа «скрученные ленточки» изготовлены из алюминия и приклеены к одной из поверхностей имитатора. Ширина каждой ленточки 2.9 мм. Шаг скручивания 10 мм на поворот 360 градусов. Толщина ленточек 0.2 мм. Расстояние между осями ленточек 2.5 мм.

Поверхности типа «открытые пирамиды» изготовлены из алюминия толщиной 0.2 мм штамповкой. Выступы имеют вид трехгранной пирамиды без одной стороны и направлены отсутствующей стороной против потока воздуха. Высота пирамид 1.5 мм. Расстояние между пирамидами в рядах 5 мм. Расстояние между рядами 2.5 мм. На рис. 4.17 показаны участки поверхностей.

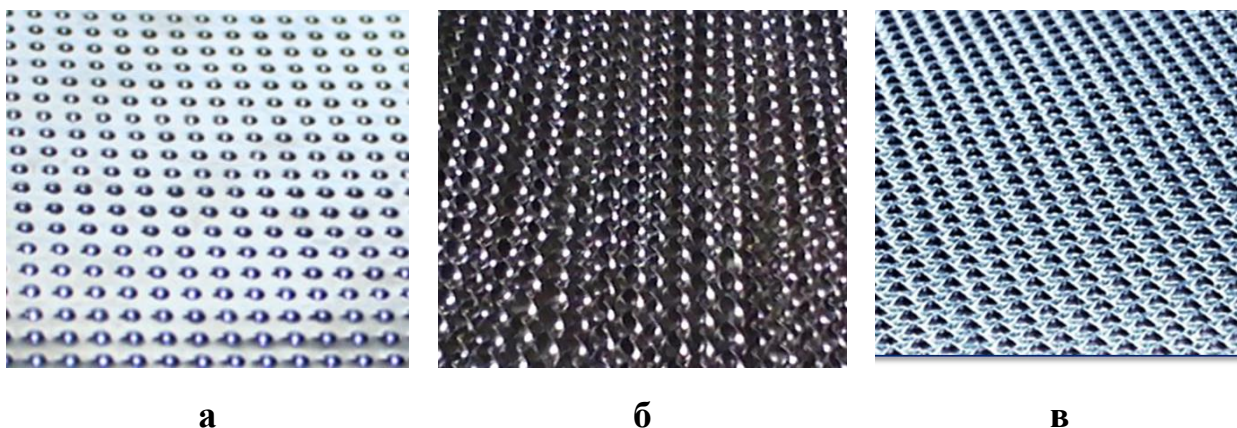


Рисунок 4.17 – Участки поверхностей типа **а** – «полушины со скругленными кромками», **б** – «скрученные ленточки» и **в** – «открытые пирамиды».

4.7 Расчет погрешностей измерений

Эффективность охлаждения имитаторов воздушным потоком определяется формулой (1.4): $(Q/ITD = W/\Delta T)$.

В нее входят W – тепловая мощность, выделяемая в одном имитаторе и ΔT – разность средней температуры поверхности имитатора и температуры входного потока воздуха. Погрешности измерения W включают в себя погрешности измерения нескольких измерительных приборов и расчетные

значения теплопритоков. В этом случае общая погрешность определяется, как погрешность нескольких независимых величин [119 – 121].

Тепловая мощность, выделяемая в имитаторе:

$$W = I \times U + W_{\text{поверх}} + W_{\text{каб}}, \quad (4.1)$$

где I и U – ток и напряжение нагревателя,

$W_{\text{поверх}}$ и $W_{\text{каб}}$ – мощность теплопритоков через поверхность и по кабелям.

Относительную погрешность тепловой мощности, выделяемой в одном имитаторе можно записать:

$$\frac{\delta W}{W} = \sqrt{\left(\frac{\delta I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\delta U}{U}\right)^2 + \left(\frac{\delta W_{\text{surf}}}{W_{\text{surf}}}\right)^2 + \left(\frac{\delta W_{\text{cab}}}{W_{\text{cab}}}\right)^2}, \quad (4.2)$$

где $\frac{\delta I}{I}$, $\frac{\delta U}{U}$, $\frac{\delta W_{\text{surf}}}{W_{\text{surf}}}$ и $\frac{\delta W_{\text{cab}}}{W_{\text{cab}}}$ – относительные погрешности измерения

тока, напряжения и вносимые теплопритоками через поверхность и по кабелям.

Для измерения тока напряжения использовались приборы класса точности 0.5 и доверительным интервалом 95%.

Сборка имитаторов теплоизолировалась двумя слоями, с толщиной слоя 50 мм, материалом с удельной теплопроводностью 0.023 Вт/(м×К). При разности температуры имитаторов с окружающей средой до ±30°C максимальный теплоприток составлял не более ±0.3 Вт или ±2% в случае использования в камере двух имитаторов. При аналогичных условиях теплоприток по кабелям был не более ±2.7%. Для этого использовались кабели с медными проводниками и суммарным сечением 2 мм². Полная относительная погрешность тепловой мощности, выделяемой в одном имитаторе, не превышает ±3.4%.

Погрешность разности средней температуры поверхности имитатора и

температуры входного потока воздуха – $\delta \Delta T$ может быть определена как:

$$\delta \Delta T = \sqrt{(\delta T_{imitator})^2 + (\delta T_{air})^2}, \quad (4.3)$$

Для измерения температуры использовались датчики типа TMP36 преобразующие температуру в линейно изменяющееся напряжение.

В таблице 4.1 приведены характеристики датчиков, влияющие на точность измерения.

Таблица 4.1 – Некоторые характеристики датчиков температуры

$T_{мин}$	Минимальная температура	$- 55 \text{ } ^\circ\text{C}$
$T_{макс}$	Максимальная температура	$+ 125 \text{ } ^\circ\text{C}$
δT	Точность измерения температуры при 25°C	$\pm 2^\circ\text{C}$
β	Коэффициент преобразования	$10 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$
$\delta\beta$	Погрешность коэффициента преобразования	$\pm 0.2 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$
$\Delta\beta$	Линейность преобразования	$\pm 0.5^\circ\text{C}$

Выходное напряжение датчиков измерялось NI PCI - 6225 с точностью ± 3.1 мВ и доверительным интервалом 0.95.

Абсолютная точность измерения температуры T_o , включающая в себя все погрешности, составила $\delta T_o = \pm 0.05^\circ\text{C}$. Погрешность, связанная с нелинейностью – $\Delta\beta$ для диапазона температур $0 - 50^\circ\text{C}$ не превышает $\pm 0.25^\circ\text{C}$.

Температура, измеряемая датчиком, рассчитывалась как:

$$T_m = T_0 + \frac{U_m - U_0}{\beta}, \quad (4.4)$$

где U_m напряжение на датчике при измерении температуры, U_0 –

напряжение на датчике при температуре калибровки – T_0 .

Погрешность измерения напряжения определяется не только погрешностями NI PCI - 6225, а и наличием электрических помех в измерительных цепях. Для подавления этих погрешностей использовалось усреднение значений напряжений, полученных при многократных измерениях каждой температуры [122]. На рис. 4.18 приведено распределение количества измеренных величин напряжения от величины напряжения для 150 измерений. Сплошной линией показана подгонка результатов измерений нормальным распределением.

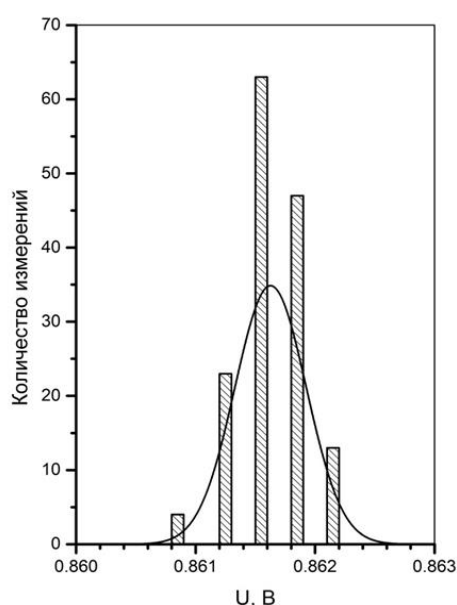


Рисунок 4.18 – Распределение измеряемых напряжений

Статистическая погрешность измерения напряжения для доверительного интервала 0.95 не превышает ± 0.8 мВ. Полная погрешность измерения напряжения на датчиках составляет ± 3.2 мВ.

Погрешность измерения температуры рассчитываемой по (4.4) будет:

$$\delta T_m = \sqrt{\delta T_0^2 + \left(\frac{\delta U_0}{\beta}\right)^2 + \left(\frac{\delta U_m}{\beta}\right)^2 + \left(\frac{\delta \beta}{\beta} \times (T_m - T_0)\right)^2 + \Delta \beta^2} . \quad (4.5)$$

Для температуры T_m , превышающей температуру калибровки до $\pm 30^\circ\text{C}$,

погрешность измерения температуры одним датчиком будет не более $\pm 0.8^{\circ}\text{C}$.

Температура в имитаторе имеет распределение, мало отличающее от линейного, средняя температура имитатора – $T_{imitator}$ определялась как среднее значение температур – T_m 20 датчиков:

$$T_{imitator} = \frac{1}{m} \sum_m T_m , \quad (4.6)$$

где m – количество датчиков температуры;

T_m – температура, измеренная одним из датчиков.

При отклонении от линейного распределения возникает погрешность, связанная с нелинейностью распределения. Для оценки этой погрешности была проведена подгонка линейного распределения температуры на поверхности имитатора, в соответствии с формулой (4.7) к экспериментальным данным температуры.

$$T(x, y) = T_{x=0, y=0} + Ax + By . \quad (4.7)$$

Результаты подгонки приведены в таблице 4.2 и показаны на рис. 4.19.

Таблица 4.2 – Данные подгонки распределения температуры плоскостью

	Величина	Стандартное отклонение
$T_{x=0, y=0}$	31.7523	0.0477
A	0.00201	0.000844
B	-0.01998	0.00107

Проведены измерения однородности распределения температуры по входному сечению сборки имитаторов матрицей их 20 датчиков. Стандартное отклонение температуры воздуха в потоке не превышает $\pm 0.02^{\circ}\text{C}$ от среднего значения и, следовательно, не вносит дополнительной погрешности в ΔT .

Таким образом, полная погрешность измерения ΔT не превышает $\pm 0.22^\circ\text{C}$.

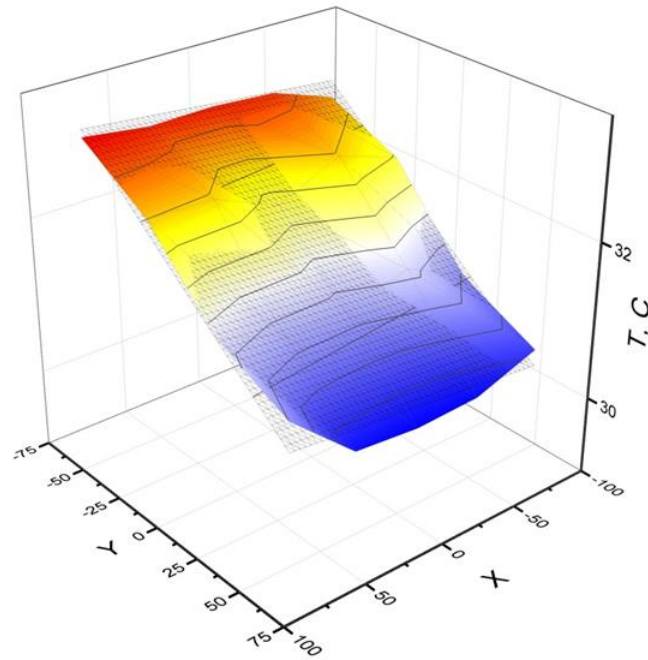


Рисунок 4.19 – Результаты подгонки распределения температуры плоскостью

Погрешность разности средней температуры имитаторов и температуры входного потока воздуха может быть рассчитана по следующей формуле:

$$\delta\Delta T = \sqrt{(\delta T_0)^2 + (\delta T_t)^2 + \left(\frac{1}{m-1} \sqrt{\sum_m (\delta T_m)^2}\right)^2 + (\delta T_{lin})^2}, \quad (4.8)$$

где δT_{lin} – погрешность, связана с нелинейностью распределения температуры по поверхности имитатора;

δT_t – нестабильность температуры потока воздуха во времени.

В стационарном режиме $\delta T_t = \pm 0.1^\circ\text{C}$.

Относительная погрешность измерения – $\frac{\delta(Q/ITD)}{Q/ITD}$ может быть определена как:

$$\frac{\delta(Q/ITD)}{Q/ITD} = \sqrt{\left(\frac{\delta W}{W}\right)^2 + \left(\frac{\delta\Delta T}{\Delta T}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{\delta W}{W}\right)^2 + \left(\delta\Delta T \frac{Q/ITD}{W}\right)^2}. \quad (4.9)$$

На рис. 4.20 показана зависимость относительной погрешности измерения эффективности охлаждения в зависимости от ее величины.

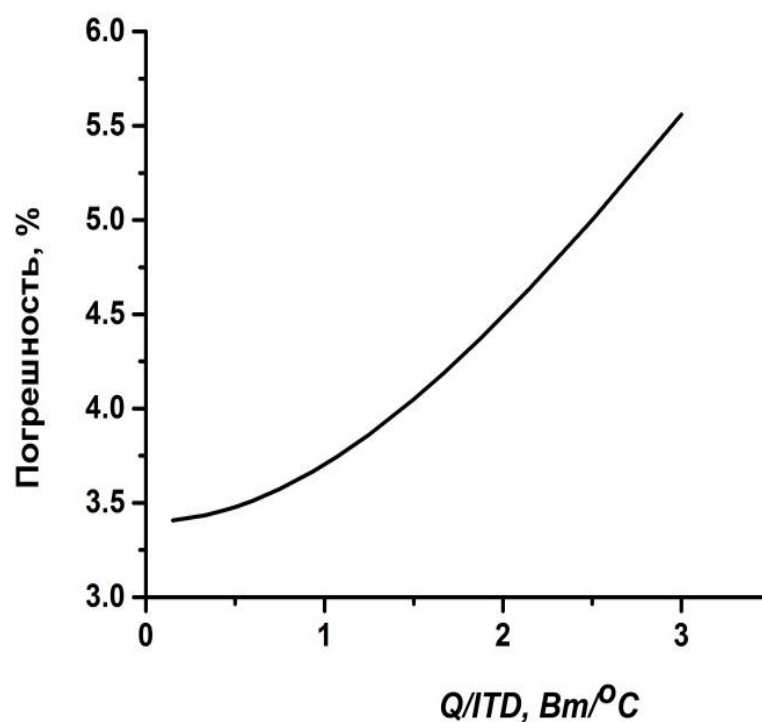


Рисунок 4.20 – Зависимость относительной погрешности измерения

Основные характеристики стенда приведены в табл. 4.3.

Таблица 4.3 – Основные характеристики стенда.

Выходной воздушный поток	до 80 м ³ /час
Температура потока воздуха на выходе стенда	-20° ÷ +50°С
Не стабильность температуры выходного потока воздуха	не более 0,2°С
Избыточное давление воздуха на выходе стенда	до 7000 Pa
Не стабильность величины выходного потока воздуха	не более 1%
Максимальное количество датчиков температуры	640
Точность измерения температуры	± 0,1°С

Выводы по разделу 4

1. Разработан стенд для исследования статических и динамических тепловых характеристик Li-ion батарей при охлаждении их воздушным потоком, который состоит из, воздушной станции, модуля стабилизации температуры воздуха и камеры для исследуемых объектов.

2. Разработаны имитаторы элементов Li-ion батарей с теплотехническими свойствами аналогичными свойствам элементов Li-ion батарей, что позволяет измерение с высокой точностью эффективности охлаждения имитаторов воздушным потоком.

3. Для непрерывного контроля температуры в большем объеме батареи разработана система измерения и обработки данных, включающая в себя модуль NI PCI-6225 и разработанные 20-канальные аналоговые мультиплексоры с коммутацией на 8 направлений, что обеспечивает измерение температуры в 640 точках.

4. Созданы программы в среде LabVIEW, обеспечивающие работу 640 канальной система измерения и обработки данных.

5. Разработана плоская многосекционная тепловая трубка для охлаждения Li-ion батареи.

6. Разработана методика изготовления поверхностей типа «полупины со скругленными кромками», «скрученные ленточки» и «открытые пирамиды», создающих перемешивание теплых и холодных воздушных слоев малой скорости для увеличения эффективности охлаждения элементов Li-ion батареи.

7. Выполнен расчет погрешностей измерения эффективности охлаждения имитаторов, измеряемого на стенде. Приведена зависимость погрешности измерения от величины эффективности охлаждения. Для эффективности охлаждения имитаторов с разными видами поверхностей имитаторов и охлаждения с помощью тепловой трубки погрешность измерения не превышает 5% для всего диапазона температур и величин потоков входного воздуха.

Основные положения раздела изложены в работах [1, 2, 6– 11].

РАЗДЕЛ 5

РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

В процессе изготовления стенда его модули проходили тестирование на получение расчетных характеристик. При необходимости выполнялась доработка отдельных узлов. Тестирование заключалось в получении необходимых диапазонов температуры потока выходного воздуха, его величины, холодопроизводительности рефрижератора и мощности калориферного модуля. Также, уделялось внимание, на длительную стабильность температуры, давления и величины потока выходящего воздуха.

Тестирование системы измерения выполнялось для определения необходимого накопления измерений каждого датчика, обеспечивающих точность измерения температуры 0.1°C . Удаление данных измеренных с большим отклонением от среднего через наличие импульсных помех осуществлялось программным способом. Для получения необходимой точности измерений использовалось 100 – 1000 накоплений измеренных значений температуры, причем первые 10 измерений отбрасывались [1, 10, 11].

Процедура исследований тепловых процессов при охлаждении батарей с гладкими поверхностями и поверхностями типа «полупины со скругленными кромками», «скрученные ленточки» и «открытые пирамиды» была следующая:

- установка исследуемых поверхностей на определенное количество имитаторов;
- установка имитаторов и камеру;
- подключение кабелей питания нагревателей и датчиков температуры;
- подключение камеры к модулю стабилизации температуры;
- выполнение калибровочных измерений температуры на поверхностях имитаторов;
- подача потока воздуха заданной температуры в камеру;
- подача мощности в нагреватели имитаторов;

- контроль изменения температуры до получения стабильных значений;
- запись в файл, полученных измерений температур на поверхностях имитаторов и перепадов давления воздуха при прохождении его через имитаторы.

5.1 Исследование эффективности охлаждения батарей воздушным потоком

Вначале были измерены эффективности охлаждения в случае гладких поверхностей. В измерительную камеру устанавливались два имитатора с зазором между имитаторами 2, 3 или 4 мм. Внешние стенки имитаторов теплоизолировались от внешней среды. В нагреватели каждого имитатора подавалась мощность 7.5 Вт. Величина потока воздуха контролировалась крыльчатым анемометром (ОМЕГА) и термоанемометром во входном воздуховоде с калиброванным диаметром [1].

Для измерения эффективности охлаждения измерялись распределения температуры на поверхностях имитаторов при температуре потока входного воздуха 20°C и скорости потока воздуха в зазоре между имитаторами 1, 2, 3 и 4 м/сек. Некоторые измеренные распределения температуры на поверхности имитаторов показаны на рис. 5.1.

Далее были вычислены средние температуры имитаторов по формуле (5.1) и эффективности охлаждения по (1.1). Измеренные значения эффективности охлаждения и перепады давления на имитаторах приведены в табл. 5.1 и 5.2, соответственно.

Анализируя полученные результаты, была выбрана величина зазора между имитаторами 3 мм для исследования эффективностей охлаждения имитаторов с негладкими поверхностями. Такая величина зазора выбрана, при которой поток воздуха с небольшой скоростью обеспечивает достаточно высокую эффективность охлаждения имитаторов. Кроме того потоки воздуха с малыми скоростями не создают заметного шума.

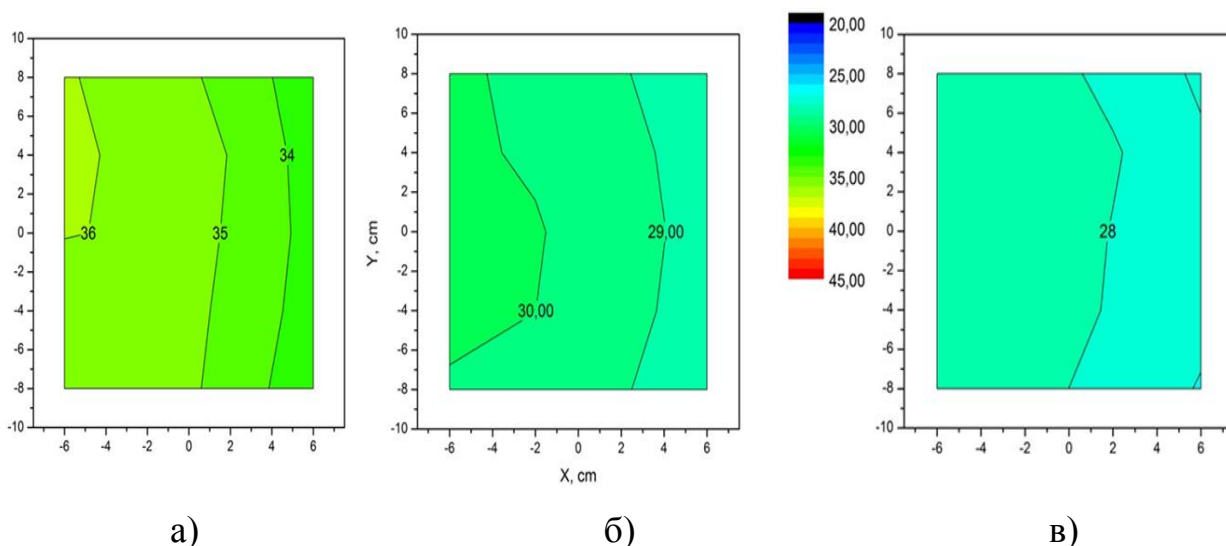


Рисунок 5.1 – Распределение температуры на поверхностях имитаторов.
 а), б) и в) – расстояние между имитаторами 2, 3, 4 мм, соответственно, и
 скорость потока воздуха 2, 3 и 4 м/сек

Таблица 5.1 – Экспериментальные значения эффективности охлаждения имитаторов с гладкими поверхностями

Скорость потока воздуха, м/сек	$Q/ITD_{exp}, \text{Вт}/^\circ\text{C}$		
	Расстояние между имитаторами, мм		
	2	3	4
1	0,806	0,986	1,05
2	1,027	1,244	1,442
3	1,2	1,522	1,807
4	1,714	1,796	2

Увеличение эффективности охлаждения возможно при увеличении поверхности соприкосновения имитатора с потоком воздуха и при перемешивании слоев воздуха. Перемешивание слоев уменьшает приграничный слой, в котором имеет место малая теплопроводность воздуха.

Были исследованы поверхности типа «полупины со скругленными кромками», «скрученные ленточки» и «открытые пирамиды», описанные ранее

в разделе 3. Процедура измерений и обработка полученных данных была аналогично как и в случае гладких поверхностей. В случае использования сборки имитаторов в нагреватели средних имитаторов подавалась мощность 15 Вт и крайние по 7.5 Вт. Измерения температуры на поверхностях имитаторов проводились для потоков воздуха 1, 2, 3 и 4 м/сек в диапазоне 10 – 40°C с шагом 5°C.

Таблица 5.2 – Экспериментальные значения перепада давления на имитаторах

Скорость потока воздуха, м/сек	$\Delta P_{exp}, Pa$		
	Расстояние между имитаторами, мм		
	2	3	4
1	3,5	3	3
2	9	8	5
3	14	15	11
4	27	24	18

Измерение температуры на поверхностях проводилось после установления стационарного режима. Время установления стационарного режима составляло 1 – 2 часа в зависимости от шага изменения температуры и разности температуры в окружающей среде и необходимой температуры входного потока воздуха в зазоры между имитаторами. Измеренные распределения температуры на поверхности имитаторов было основой для получения дальнейших результатов и проводилось при каждом исследовании.

Предварительная обработка получаемых данных и само получение осуществлялись в среде LabVIEW. На рис. 5.2 показаны максимальные, минимальные и средние температуры на поверхностях имитаторов с поверхностями «полупины со скругленными кромками» в сборке из шести имитаторов при температуре входного воздуха 25°C и скорости потока воздуха в зазоре между имитаторами 3 м/сек.

На основании полученных средних температур поверхностей были определены средние, максимальные и минимальные температуры имитатора для всей сборки при каждой температуре входного потока воздуха и скорости потока воздуха в зазорах между имитаторами.

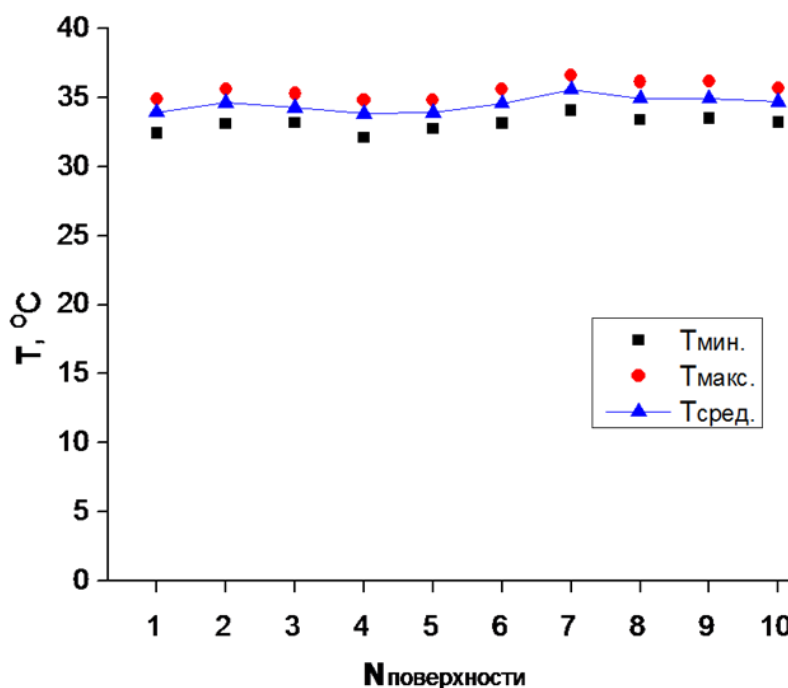


Рисунок 5.2 – Температуры на поверхностях имитаторов элементов батареи с поверхностями типа «полупины со скругленными кромками»

На рис. 5.3 показана зависимость средних температуры на поверхностях имитаторов элементов батареи с поверхностями типа «полупины со скругленными кромками» от температуры и скорости потока воздуха на входе в зазоры между имитаторами.

Линейная зависимость средних температур в зависимости от температуры входного потока воздуха показывает о достаточной теплоизоляции сборки имитаторов от окружающей среды. А уменьшение расстояния между линиями объясняется нелинейной теплоотдачей поверхности, в зависимости от скорости потока воздуха.

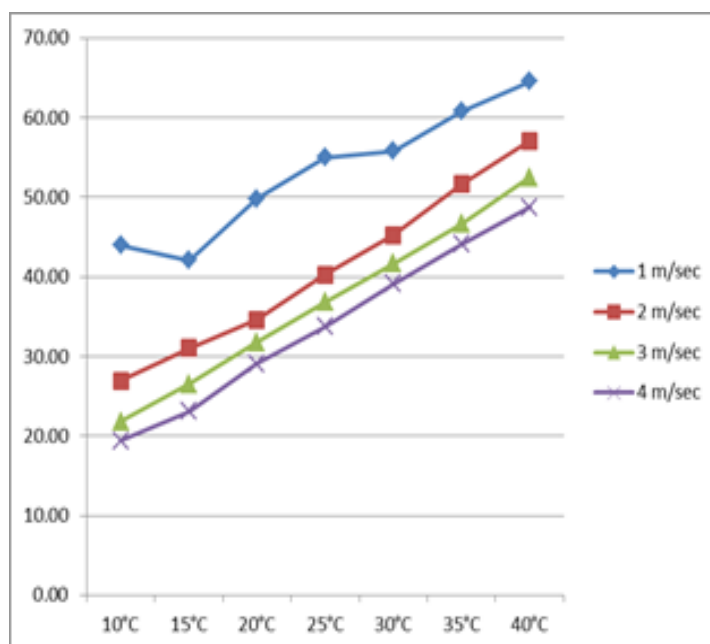


Рисунок 5.3 – Зависимость средней температуры на поверхностях имитаторов элементов батареи с поверхностями типа «полушины со скругленными кромками» от температуры и скорости потока воздуха на входе в зазоры между имитаторами

На рис. 5.4 показана зависимость эффективности охлаждения имитаторов с поверхностями «полушины со скругленными кромками» в зависимости от температуры потока входного воздуха и скорости потока в зазорах между имитаторами.

Аналогичные измерения проведены и для имитаторов с поверхностями в виде «скрученные ленточки» и «открытые пирамиды». На основании экспериментальных данных получены усредненные эффективности охлаждения в зависимости от скорости потока воздуха и перепада давления для всех исследуемых поверхностей [2, 4].

В табл. 5.3 и 5.4 приведены экспериментальные данные эффективностей охлаждения и перепадов давления, соответственно, для гладких поверхностей и поверхностей в виде «полушины со скругленными кромками», «скрученные ленточки» и «открытые пирамиды».

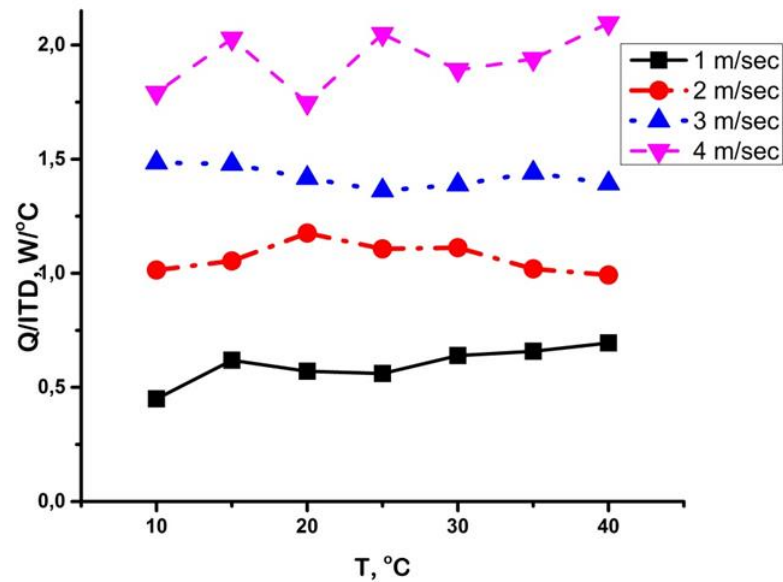


Рисунок 5.4 – Зависимость эффективности охлаждения сборки имитаторов от скорости и температуры входного потока воздуха

Таблица 5.3 – Эффективности охлаждения для некоторых поверхностей

Виды поверхностей	$Q/ITD_{exp}, \text{Вт}/^\circ\text{C}$			
	Скорость потока воздуха, м/сек			
	1	2	3	4
Гладкие	0,47	0,82	1,14	1,42
Полупины со скругленными кромками	0,6	1,05	1,41	1,91
Скрученные ленточки	0,89	1,66	2,19	3,31
Открытые пирамиды	1,08	1,54	2,63	3,4

На основании полученных результатов моделирования и экспериментальных данных эффективностей охлаждения получены относительные погрешности между экспериментальными данными и результатами моделирования:

$$\gamma_{Q/ITD} = \frac{|Q/ITD_{exp} - Q/ITD_{calc}|}{Q/ITD_{calc}} \quad (5.1)$$

Таблица 5.4 – Перепады давления на имитаторах с некоторыми видами поверхностей

Виды поверхностей	$\Delta p_{exp}, Pa$			
	Скорость потока воздуха, м/сек			
	1	2	3	4
Гладкие	13	31	51	76
Полупины со скругленными кромками	21	47	86	151
Скрученные ленточки	38	95	187	325
Открытые пирамиды	75	140	337	530

Относительные отклонения эффективностей охлаждения имитаторов для экспериментальных данных и результатов моделирования в зависимости от скорости потока воздуха приведены на рис. 5.5.

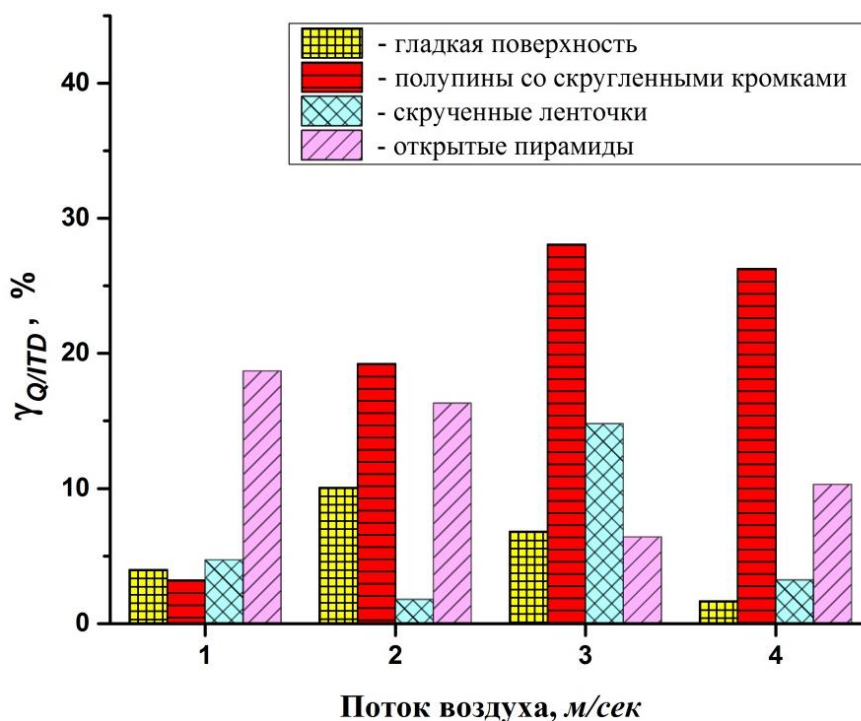


Рисунок 5.5 – Относительные отклонения эффективностей охлаждения имитаторов для экспериментальных данных и результатов моделирования

Относительная разность давления во входном потоке воздуха, полученного из результатов моделирования и экспериментальных данных:

$$\gamma_{\Delta p} = \frac{|p_{calc}^{in} - p_{exp}^{in}|}{p_0}, \quad (5.2)$$

где p_0 – давление в выходном потоке воздуха,

p_{calc}^{in} – вычисленное давление во входном потоке воздуха,

p_{exp}^{in} – измеренное давление во входном потоке воздуха,

$$p_{exp}^{in} = p_0 + \Delta p_{exp}.$$

На рис. 5.6 приведены относительные разности вычисленных давлений во входном потоке воздуха и экспериментальными данными в зависимости от скорости потока воздуха.

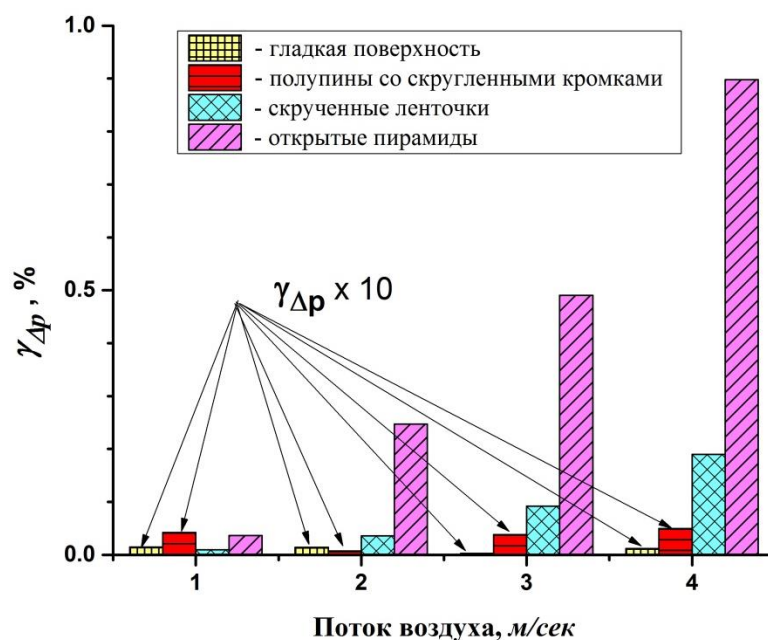


Рисунок 5.6 – Относительная разность давления во входном потоке воздуха, полученного из результатов моделирования и экспериментальных данных

Кроме эффективностей охлаждения имитаторов и перепада на них

давления в воздушном потоке представляет интерес градиент температуры по имитатору и разность минимальных и максимальных температур. Большие величины разности температуры для Li-ion батарей нежелательны, так как могут приводить к разной заряженности элементов батареи, снижая ее емкость. Во всех экспериментальных исследованиях разность минимальных и максимальных температур на поверхностях имитаторов во всей сборке не превышала 4°C .

Работа Li-ion батарей связана не только с постоянным потреблением электроэнергии, а и с кратковременным увеличением потребляемой энергии в несколько раз, особенно в транспортных средствах. Для этого проведены экспериментальные измерения зависимости изменения температуры имитатора – ΔT от времени после подачи в него тепловой мощности.

$$\Delta T = T(t \neq 0, W \neq 0) - T(t = 0, W = 0), \quad (5.3)$$

где $T(t = 0, W = 0)$ – средняя температура поверхности имитатора до подачи мощности в нагреватель имитатора;

t – длительность времени подачи мощности в имитатор.

$T(t \neq 0, W \neq 0)$ – средняя температура поверхности имитатора в зависимости от времени при подаче мощности W в нагреватель имитатора.

Были проведены измерения при подаче мощности $W = 15, 30, 45$ и 60 Вт в имитаторы с поверхностями в виде скрученных лент и открытых пирамид при скоростях потока 1, 2, 3 и 4 м/сек.

На рис. 5.7 и 5.8 представлены результаты измерений изменения средней температуры имитаторов от времени с поверхностями типа «скрученные ленточки» и «открытые пирамиды» при подаче мощности 15, 30, 45 и 60 Вт в нагреватели имитаторов и после отключения. Скорость потока воздуха составляла 3 м/сек.

Анализируя экспериментальные результаты, стационарный режим, с градиентом температуры на поверхностях $\Delta T = \sim 4^{\circ}\text{C}$ для потока 3 м/сек

наступает через 2 часа для имитаторов с поверхностями типа «скрученные ленточки» и выделяемой в них мощности 15 Вт. При постоянном потоке воздуха увеличение выделяемой мощности в батарее приводит к более быстрому росту температуры батареи, что не всегда безопасно. Время остывания батареи намного больше, чем время нагрева.

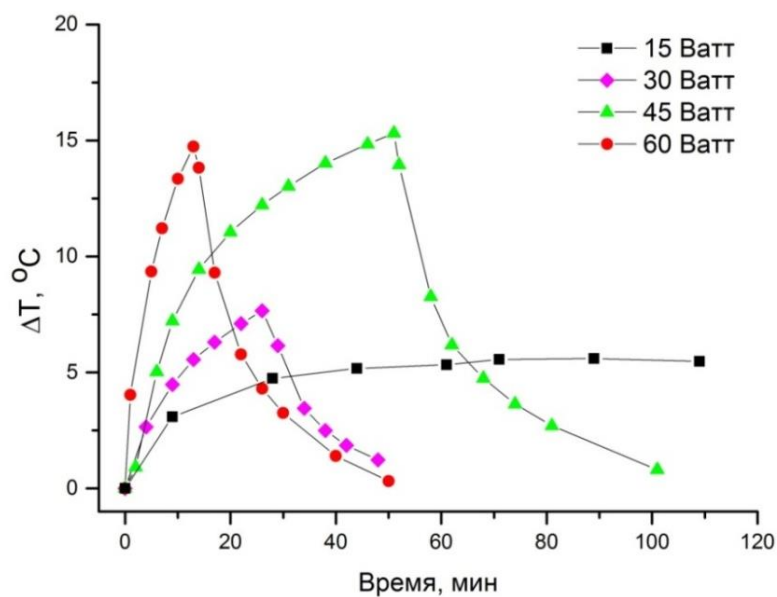


Рисунок 5.7 – Измерение температуры имитатора от времени при подаче и отключении мощности в нагреватели имитаторов с поверхностями типа «скрученные ленточки»

При 4 кратном увеличении мощности, выделяемой в батарее, время работы батареи с превышением температуры на 5 °C выше стационарного режима сокращается до нескольких минут. Таким образом, время работы батареи в наилучшем тепловом режиме при кратковременных перегрузках определяется величиной теплоемкости батареи и слабо зависит от величины потока воздуха [2]. Для уменьшения времени охлаждения батареи к начальной температуре необходимо применять поверхности с наибольшей теплоотдачей и увеличивать величину потока воздуха.

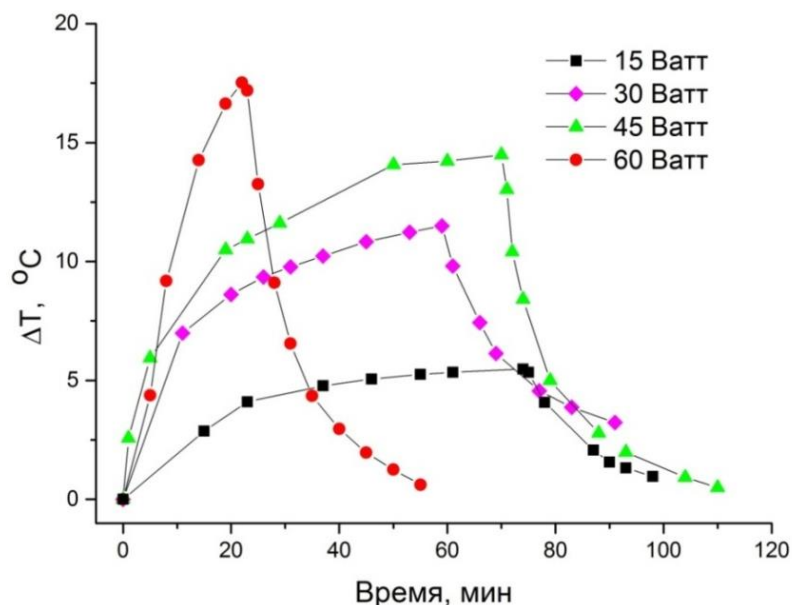


Рисунок 5.8 – Измерение температуры имитатора от времени при подаче и отключении мощности в нагреватели имитаторов с поверхностями типа «открытые пирамиды» 3 м/сек

5.2 Исследование эффективности охлаждения батарей с помощью тепловой трубки

Экспериментальные исследования охлаждения имитаторов Li-ion батареи с помощью тепловой трубки проводились с целью изучения эффективности вывода тепла с батареи на внешний радиатор, охлаждаемый потоком воздуха с температурой 10 – 40 °C.

Процедура исследований состояла в установке тепловой трубки в камеру для исследования, удаление воздуха из тепловой трубки, заполнения трубки жидким бутаном. Для удаления воздуха тепловая трубка откачивалась вакуумным насосом. Далее тепловая трубка заполнялась бутаном. Чтоб быстрее получить наполнение трубки жидкостью, баллончик с жидким бутаном приподнимался выше тепловой трубки для создания небольшого гидростатического давления. Давление и уровень жидкого бутана контролировались. При предварительных исследованиях находился наилучший

режим работы тепловой трубки. Определялся уровень бутана, соответствующий наибольший теплоотвод во всем необходимом диапазоне температур с устойчивой работой при быстрых изменениях температуры. При исследованиях, наиболее подходящим был уровень жидкого бутана в тепловой трубке 15 – 20 мм.

Как и при предыдущих исследованиях, измерялась температура на поверхностях имитаторов. На рис. 5.9 показано пример распределение температуры на поверхностях имитаторов для некоторых температур воздуха, охлаждающего радиатор.

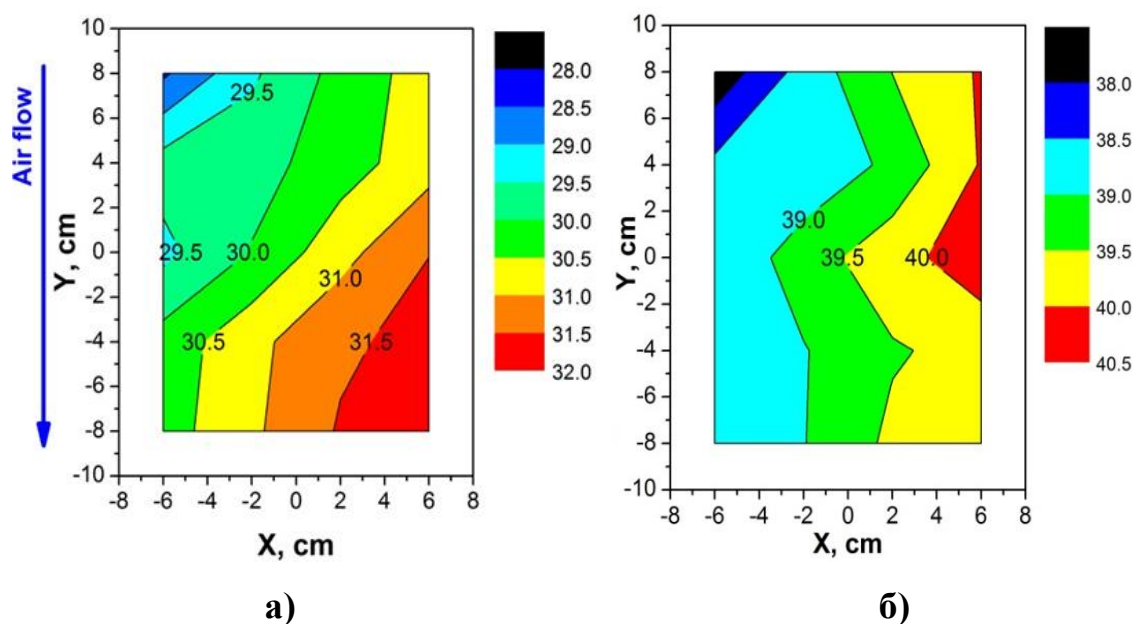


Рисунок 5.9 – Распределение температуры на поверхностях имитаторов:

a) – температура охлаждающего воздуха 18.2 °C; b) – 28.9 °C

Радиатор тепловой трубки охлаждался потоком воздуха – 2.5 м/сек при всех температурах потока. Перепад давления воздуха в потоке – 28 Pa. Тепловая мощность, выделяемая каждым имитатором, составляла 7.5 Вт.

В таблице 5.5 приведены минимальные, максимальные и средние температуры поверхностей каждого имитатора, колонки 1 и 2, для температуры входного потока воздуха 9, 20, 30.2, и 38.6 °C.

Таблица 5.5 – Температура поверхностей имитаторов

$T_{\text{возд}}, \text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{мин}}, \text{ }^{\circ}\text{C}$		$T_{\text{макс}}, \text{ }^{\circ}\text{C}$		$T_{\text{средняя}}, \text{ }^{\circ}\text{C}$	
	1	2	1	2	1	2
9.0	19.2	19.2	21.1	21.1	20.3	20.3
20.0	28.7	28.4	31.7	31.7	30.5	30.5
30.2	37.8	37.6	40.1	40.3	39.2	39.2
38.6	46.9	46.9	48.2	48.2	47.6	47.6

На рис.5.10 приведены средние (треугольники), минимальные (ромбы) и максимальные (квадратные точки) температуры для двух поверхностей имитаторов, находящихся в тепловом контакте с тепловой трубкой при температуре потока входного воздуха 18.2°C , 28.9°C и 39.2°C . Данные получены при определении оптимального уровня бутана в тепловой трубке.

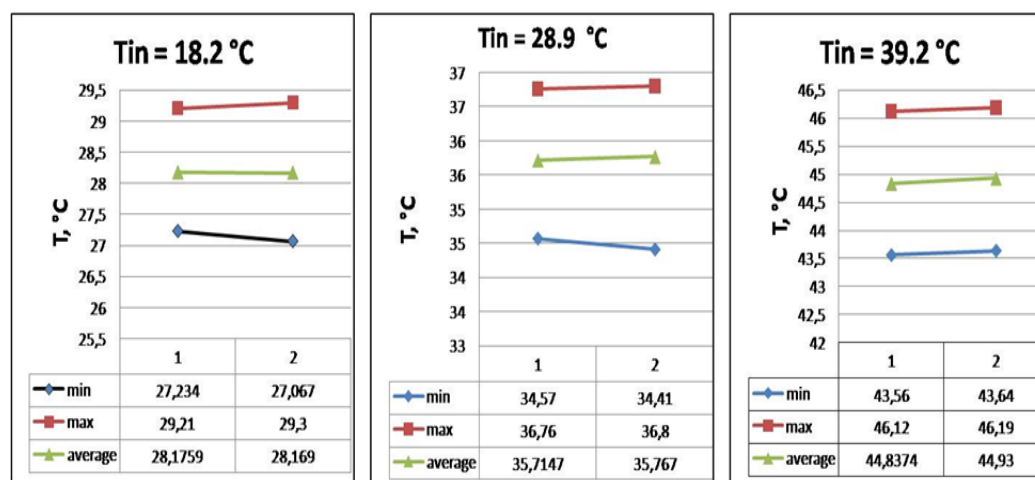


Рисунок 5.10 – Температура на поверхностях имитаторов

На основании полученных данных были вычислены средние температуры имитаторов и эффективности охлаждения имитаторов Li-ion батареи с помощью тепловой трубки [6, 7, 9]. В табл. 5.6 приведены измеренные средние значения температуры имитаторов, разности средней температуры имитаторов

и входного потока воздуха, эффективности охлаждения имитаторов, давление паров бутана в тепловой трубке и табличные значения температуры насыщенных паров бутана соответствующих этим давлениям.

Таблица 5.6 – Измеренные эффективности охлаждения, температуры имитаторов, давление и температура насыщенных паров бутана

$T_{возд}, ^\circ C$	$\Delta T, ^\circ C$	$Q/IDT \text{ Wm}/^\circ C$	$T_{imitator}, ^\circ C$	$P(\text{бутан}), \text{ атм.}$	$T(\text{бутан}), ^\circ C$
9.0	11.3	1.33	20.3	1.95 ± 0.5	18
20.0	10.5	1.43	30.5	2.10 ± 0.5	20
30.2	9.1	1.65	39.2	2.50 ± 0.5	27
38.6	9.0	1.66	48.2	4.35 ± 0.5	42

На рис.5.11 представлены эффективности охлаждения имитаторов тепловой трубкой.

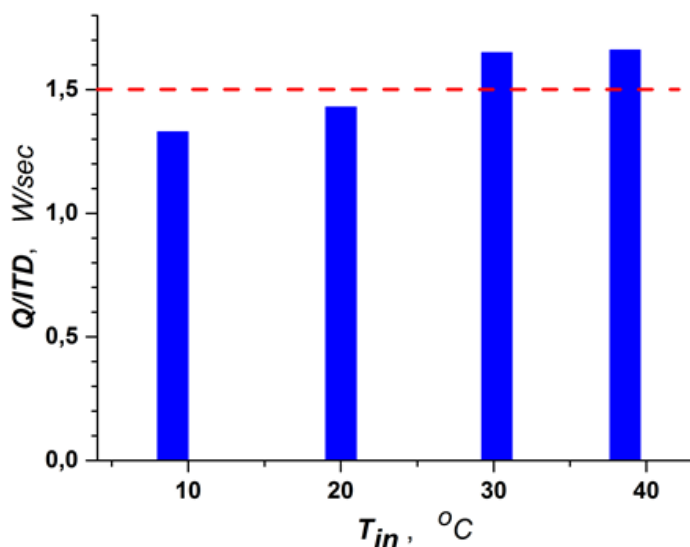


Рисунок 5.11 – Эффективности охлаждения имитаторов тепловой трубкой

Выводы по разделу 5

1. Выполнено тестирование стенда. Тестирование выполнялось с имитаторами с гладкими поверхностями для диапазона температур входного потока воздуха $10 - 40^\circ C$ с величиной потока $1 - 4 \text{ м/сек}$ в зазоре между

имитаторами и для величин зазора 2, 3 и 4 мм. Измерены распределения температур на поверхностях имитаторов и получены эффективности охлаждения имитаторов. Результаты тестирования согласуются с результатами моделирования.

2. Измерены эффективности охлаждения имитаторов с поверхностями типа «полупины со скругленными кромками», «скрученные ленточки» и «открытые пирамиды» для зазора между имитаторами 3 мм в диапазоне входных температур $10 - 40^{\circ}\text{C}$ и величин потока воздуха $1 - 4$ м/сек. Результаты измерений сравниваются с результатами моделирования. Сравнение показывает, что для более простых поверхностей наблюдается лучшее согласие с данными измерений. В случае поверхностей, содержащих большое количество острых кромок на поверхностях, результаты моделирования имеют большие величины, особенно для перепадов давления на имитаторах при больших скоростях потока воздуха.

3. Измерены тепловые характеристики процесса охлаждения имитаторов тепловой трубкой. Измерены распределения температуры на поверхностях имитаторов и эффективности охлаждения имитаторов. Полученные результаты согласуются с данными моделирования.

Основные положения раздела изложены в работах [2, 6 – 9].

ВЫВОДЫ

В диссертационной работе получено новое решение научно-технических задач моделирования тепловых процессов при охлаждении Li-ion батарей: вычисление эффективностей охлаждения и проведения исследований на стенде с последующим сравнением результатов моделирования с экспериментальными данными.

На основании полученных результатов диссертационной работы можно сделать следующие выводы.

1. Получил дальнейшее развитие метод математического моделирования тепловых процессов при охлаждении Li-ion батарей воздушным потоком с малой скоростью, обеспечивающий вычисление эффективности систем охлаждения батарей на основе осреднения температурных полей поверхностей элементов батареи, оптимизированы параметры моделей. Выполнена оптимизация параметров моделей охлаждающих поверхностей, определены требования к оборудованию для исследования эффективности охлаждения батарей. Разработан стенд для исследования эффективности охлаждения Li-ion батарей однородным и стабильным потоком воздуха с малой скоростью потока. Конструктивно стенд включает в себя:

– воздушную станцию, обеспечивающую реверсный воздушный поток до $80 \text{ м}^3/\text{час}$ с нестабильностью потока не более 3%,

– модуль стабилизации температуры выходного потока воздуха в диапазоне $-20 \div +50^\circ\text{C}$ и долговременной нестабильностью температуры потока не более $\pm 0.1^\circ\text{C}$,

– калориметрические камеры для измерения тепловых характеристик сборки имитаторов, состоящей от 2 до 10 имитаторов,

– 640 – канальную систему измерения температуры на поверхностях сборки имитаторов с точностью $\pm 0.1^\circ\text{C}$ для диапазона температур $-55 - +125^\circ\text{C}$.

2. Разработан метод расчета эффективности систем охлаждения на основе

измерения температурных полей на поверхностях элементов батареи и впервые измерены эффективности охлаждения для сложных многоканальных структур на поверхностях элементов Li-ion батарей (поверхности типа «полупины со скругленными кромками», «скрученные ленточки» и «открытые пирамиды»). Измерены эффективности охлаждения сборок имитаторов с такими поверхностями для зазора между имитаторами 3 мм, диапазона температур входного потока воздуха 10–40 °С и скорости потока 1–4 м/сек. Эффективности охлаждения для двух последних видов поверхностей больше, по сравнению с другими поверхностями, однако, перепад давления, при использовании поверхностей типа «скрученные ленточки», меньше, чем в случае «открытые пирамиды», что делает более предпочтительным использование поверхностей типа «скрученные ленточки». Результаты измерений сравниваются с результатами моделирования. Некоторое отличие расчетных значений и экспериментально измеренных для поверхностей с большим числом элементов может быть объяснено не абсолютностью формы реальных и заданных для расчетов поверхностей.

3. Методом математического моделирования получены оптимальные параметры для модуля с имитаторами Li-ion батарей, впервые разработаны и изготовлены имитаторы Li-ion батареи с теплопроводностью в плоскости имитатора равной $60 \text{ Вт}/(\text{м}\times\text{К})$ и теплопроводностью по толщине имитатора – $1 \text{ Вт}/(\text{м}\times\text{К})$. Рабочий режим имитатора соответствует наиболее тяжелому режиму эксплуатации батарей. При работе он выделяет до 15 Вт тепла на обе поверхности.

4. На основе математического моделирования тепловых процессов охлаждения Li-ion батареи определены и оптимизированы параметры воздушных потоков, охлаждающих модули Li-ion батарей, и впервые разработана калориметрическая камера для измерения эффективности охлаждения отдельных элементов и модулей Li-ion батареи однородным воздушным потоком

5. Впервые выполнено моделирование процесса охлаждения Li-ion

батарей многосекционной тепловой трубкой, разработана многосекционная тепловая трубка, измерена эффективность охлаждения Li-ion батарей тепловой трубкой, предложен метод вычисления и определена удельная теплопроводность тепловой трубки.

6. Увеличено число каналов измерения температуры для аналого-цифровой карты NI PCI-6225. Разработаны 20-канальные аналоговые коммутаторы для 640-канальной системы измерения температуры и программное обеспечение в среде LabView. Выполнен расчет погрешностей измерения эффективности охлаждения имитаторов, измеряемого на стенде. Погрешность измерений эффективности охлаждения имитаторов (с разными видами поверхностей) или тепловой трубкой не превышает 5% для всего диапазона температур и величин потоков входного воздуха.

7. Результаты настоящей работы используются в разработках нового научного оборудования в ННЦ ХФТИ. Так, например, методы математического моделирования процессов охлаждения/нагрева и 640 - канальная система измерения температуры используются в экспериментальной установке «Мишень поляризованных ядер гелия – 3».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Fedorchenko D. V. Mathematical Simulation of Conjugate Heat Transfer for Accumulator Batteries / D. V. Fedorchenko, M. A. Khazhmuradov, A. A. Lukhanin, Y. V. Rudychev // *Radioelectronics & informatics*. – 2012. – No. 4(59). – P. 78 – 81.
2. Byelyayev A. A. Measurement of air cooling characteristics for the several surface types of Li-ion battery / Andrey A. Byelyayev, Dmitriy V. Fedorchenko, Manap A. Khazhmuradov, Aleksandr A. Lukhanin, Oleksiy A. Lukhanin, Sergey O. Martynov, Yegor V. Rudychev, Eugen O. Sporov, Upendra S. Rohatgi // *Problems of atomic science and technology*. – 2013. – No. 3(85). Series: Nuclear Physics Investigations (60). – P. 247–252.
3. Belyaev A. A. Air-Cooled Stand for Li-ion Battery Research / Andrey A. Belyaev, A. A. Lukhanin, Alexey A. Lukhanin, Viktor F. Popov, Yegor V. Rudychev, Evgenij A. Sporov, Dmitriy V. Fedorchenko, Manap A. Khazhmuradov // *Telecommunications and Radio Engineering* – 2015. – Vol. 74, – No. 17. – P. 1581–1592.
4. Беляев А. А. Расчет и моделирование температурного режима в гелиевой ячейке / А. А. Беляев, Александр А. Луханин, Алексей А. Луханин, Е. А. Споров, Д. В. Федорченко, М. А. Хажмурадов // *Радиоелектроніка та інформатика*. – 2013. – № 4(63). С. 3–8.
5. Khazhmuradov M. Analysis of the Maisotsenko cycle-based cooling system for accumulator batteries / Manap Khazhmuradov, Dmitriy Fedorchenko, Yegor Rudychev, Sergej Martynov, Alexander Zakharchenko, Svetlana Prokhorets, Anna Skrypnyk, Mikhail Krugol, Anatoliy Yurkin, Alexei Lukhanin, Alexander Lukhanin, Andrej Belyaev, Evgenij Sporov, Viktor Popov // *International Journal of Energy for a Clean Environment*. – 2011. – Vol. 12(2–4) –P. 95–99.
6. Belyaev A. Investigation of heat pipe cooling of Li-ion batteries [Електронний ресурс]/ Andrey Belyaev, Dmitriy Fedorchenko,

Manap Khazhmuradov, Alexey Lukhanin¹, Oleksandr Lukhanin, Yegor Rudychev, Bahram Khalighi, Taeyoung Han, Erik Yen, Upendra S. Rohatgi //ASTFE, Digital Library. Proceedings of the First Thermal and Fluids Engineering Summer Conference: Engineering Equipment and Processes. TFESC1. August 9–12. New York: Begell House. USA. – 2015. P. 13029 (12 pages.). – Режим доступа: www. URL: <http://dl.astfe.org/>

7. Lukhanin A. Thermal Characteristics of Air Flow Cooling in the Lithium Ion Batteries Experimental Chamber / Alexey Lukhanin, Andrey Belyaev, Dmitriy Fedorchenko, Manap Khazhmuradov, Oleksandr Lukhanin, Yegor Rudychev, Upendra S. Rohatgi // Proc. ASME 44779. Volume 1: Heat Transfer in Energy Systems. Rio Grande. Puerto Rico. USA. July 8–12. – 2012. – P. 129–133.

8. Lukhanin A. Investigation of Air Flow Cooling of Li-Ion Batteries / Alexey Lukhanin, Andrey Byelyayev; Dmitriy Fedorchenko, Manap Khazhmuradov, Oleksandr Lukhanin, Sergey Martynov, Yegor Rudychev, Eugene Sporov, Upendra S Rohatgi // Proc. ASME 56352. – Vol. 8B: Heat Transfer and Thermal Engineering. San Diego. California. USA. November 15–21. – 2013. – P. V08BT09A006 (6 pages).

9. Belyaev A. Investigation of Heat Pipe Cooling of Li-ion Batteries [Электронный ресурс] / Andrey Belyaev, Dmitriy Fedorchenko, Manap Khazhmuradov, Alexey Lukhanin, Oleksandr Lukhanin, Yegor Rudychev, Bahram Khalighi, Taeyoung Han, Erik Yen, Upendra S. Rohatgi // Preprint Brookhaven National Laboratory. BNL-105291-2014- CP. – 2014. – 5 p. – Режим доступа: www. URL: <https://www.bnl.gov/isd/documents/86095.pdf>

10. Беляев А. А. 640-канальная система регистрации температуры / А. А. Беляев, А. А. Луханин, М. А. Хажмуратов // Информационные системы и технологии: тезисы докладов. IV международная научно-техническая конференция. 21-27 сентября 2015 г. – Х.: НТМТ. – 2015. – С. 28 – 29.

11. Беляев А. А. Многоканальная система измерения температуры и On-Line обработка данных / А. А. Беляев, Александр А. Луханин,

Алексей А. Луханин, В. Ф. Попов, Е. А. Споров // XIII Конференция по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям: тезисы докладов. 16–20 марта. Харьков. – 2015. – С. 22.

12. Луханін О. О. Оптимізація процесу охолодження акумуляторних батарей / О. О. Луханін, С. І. Прохорець, Є. В. Рудичев, Д. В. Федорченко, М. А. Хажмурадов // Міжнародна наукова конференція «Питання оптимізації обчислень (ПОО-XL)»: тези доповідей. Київ: Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України. – 2013. – С. 154–155.

13. Pesaran A. NREL Energy Storage Projects – FY2012 Annual Report [Электронный ресурс] / Ahmad Pesaran, Chunmei Ban, Aaron Brooker [et al.] // Technical Report NREL/TP-5400-57587. March – 2013. – 70 p.

Режим доступа: www. URL: <http://www.osti.gov/bridge>

14. Santini D. Status and Issues for Plug-in Electric Vehicles and Hybrid Electric Vehicles in the United States: Alternative Fuel and Advanced Vehicle Technology Market Trends [Электронный ресурс] / Danilo J. Santini, Yan Zhou, and Marcy Rood Werpy // Argonne National Laboratory. February 2015. –

Режим доступа: www. URL:

http://www1.eere.energy.gov/cleancities/pdfs/2015_strategic_planning_electric_drive.pdf

15. Batteries for Electric Cars [Электронный ресурс]. / The Boston Consulting Group, Inc. – 2010. //

Режим доступа: www. URL: <http://www.bcg.com/publicationc>

16. Bandhauer T. A Critical Review of Thermal Issues in Lithium-Ion Batteries. / Todd M. Bandhauer, Srinivas Garimella and Thomas F. Fullerb // Journal of The Electrochemical Society. – 2011. – Vol. 158 (3) – P. R1–R25.

17. Pelletier S. Battery Electric Vehicles for Goods Distribution: A Survey of Vehicle Technology, Market Penetration, Incentives and Practices [Электронный ресурс] / Samuel Pelletier, Ola Jabali, Gilbert Laporte // CIRRELT-2014-43 September – 2014. – 49. –

Режим доступа: www. URL:

<https://www.cirrelt.ca/DocumentsTravail/CIRRELT-2014-43.pdf>

18. CE175-360 [Электронный ресурс] // -

Режим доступа: www. URL: <http://www.enerdel.com/cells>

19. UFO Source Energy Battery Technology Co., Ltd. [Электронный ресурс] // – Режим доступа: www. URL: <http://www.ufo-battery.com>

20. A123Systems, Inc. USABC HEV and PHEV Programs [Электронный ресурс] // Режим доступа: www. URL: <http://www.a123systems.com>

21. Nanophosphate Lithium Ion Prismatic Pouch Cell [Электронный ресурс] // Режим доступа: www. URL: <http://www.a123systems.com>

22. Uddin K. An Acausal Li-Ion Battery Pack Model for Automotive Applications / Kotub Uddin, Alessandro Picarelli, Christopher Lyness [et al.] // Energies. – 2014. – Vol. 7. – P. 5675–5700.

23. Geringer B. Battery Electric Vehicles in Practice [Электронный ресурс] / Bernhard Geringer, Werner K. Tober // Institute for Powertrains and Automotive Technology. – 2012. 71 p. Режим доступа: www. URL: <http://www.övk.at/aktuelles/2012/Battery%20Electric%20Vehicles%20in%20Practice.pdf>

24. Smith K. Power and thermal characterization of a lithium-ion battery pack for hybrid-electric vehicles / Kandler Smith, Chao-Yang Wang // Journal of Power Sources. – 2006. Vol. 160. – P. 662–673.

25. Ji Y. Li-Ion Cell Operation at Low Temperatures / Yan Ji, Yancheng Zhang, and Chao-Yang Wang // Journal of The Electrochemical Society. – 2013. – Vol. 160 (4). – P. A636–A649.

26. Duleep G. Assessment of electric vehicle and battery technology [Электронный ресурс]. / Gopalakrishnan Duleep, Huib van Essen, Bettina Kampman, Max Grünig // Report Delft. April – 2011.

Режим доступа: www. URL:

http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/docs/d2_en.pdf

27. Garcíaa R. E. Spatially Resolved Modeling of Microstructurally

Complex Battery Architectures / R. Edwin Garcíaa and Yet-Ming Chiang // Journal of The Electrochemical Society, – 2007. – Vol. 154 (9). – P. A856–A864.

28. Kim G. Three-Dimensional Lithium-Ion Battery Model [Электронный ресурс] / Gi-Heon Kim and Kandler Smith // 4th International Symposium on Large Lithium Ion Battery Technology and Application Tampa, Florida. – 2008. Режим доступа:

www. URL: <http://www.nrel.gov/transportation/energystorage/pdfs/43166.pdf>

29. Fang W. Electrochemical-thermal modeling of automotive Li-ion batteries and experimental validation using a three-electrode cell / Weifeng Fang, Ou Jung Kwon and Chao-Yang Wang // Int. J. Energy Res. – 2010; – Vol. 34. – P. 107–115.

30. Gao L. Dynamic Lithium-Ion Battery Model for System Simulation / Lijun Gao, Shengyi Liu, and Roger A. Dougal // IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies. – 2002. – Vol. 25. – No. 3. – P. 495 – 505.

31. Bandhauer T. Temperature-dependent electrochemical heat generation in a commercial lithium-ion battery / Todd M. Bandhauer, Srinivas Garimella, Thomas F. Fuller // Journal of Power Sources. – 2014. – Vol. 247. – P. 618–628.

32. Smith K. Power and thermal characterization of a lithium-ion battery pack for hybrid-electric vehicles / Kandler Smith, Chao-Yang Wang // Journal of Power Sources. – 2006. – Vol. 160. P. 662–673.

33. Srinivasan V. Analysis of Electrochemical and Thermal Behavior of Li-Ion Cells / Venkat Srinivasan and C. Y. Wang // Journal of The Electrochemical Society. – 2003. – Vol. 150 (1). – P. A98–A106.

34. Shirk M. Effects of Electric Vehicle Fast Charging on Battery Life and Vehicle Performance / Matthew Shirk, Jeffrey Wishart // Preprint INL/CON-14-33490 – 2015. – 11 p.

35. Song L. Thermo-Electrochemical Study on the Heat Effects of LiFePO₄ Lithium-ion Battery During Charge-Discharge Process / Liubin Song, Xinhai Li, Zhixing Wang Xunhui Xiong [et al.] // Int. J. Electrochem. Sci. – 2012. – Vol. 7. –

P. 6571 – 6579.

36. Давидов А.О. Теоретическое описание и анализ механизмов протекания деградиационных процессов в электрохимических аккумуляторах при их эксплуатации в объектах ракетно-космической техники / А.О. Давидов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – № 3 (90). – С. 89– 98.

37. Bandhauer T. Electrochemical-Thermal Modeling to Evaluate Battery Thermal Management Strategies I. Side Cooling / Todd Bandhauer, Srinivas Garimella, and Thomas F. Fuller // Journal of The Electrochemical Society. – 2015. – Vol. 162 (1). – P. A125–A136.

38. Bandhauer T. Electrochemical-Thermal Modeling to Evaluate Battery Thermal Management Strategies II. Edge and Internal Cooling/ Todd Bandhauer, Srinivas Garimella, and Thomas F. Fuller / Journal of The Electrochemical Society. – 2015. – Vol. 162 (1). – P. A137–A148.

39. Patil P. Developments in Lithium-Ion Battery Technology in The Peoples Republic of China [Электронный ресурс] / Pandit G. Patil // Argonne National Laboratory. Report ANL/ESD/08-1. – 2008. – 88 p.

Режим доступа: www. URL: <http://www.osti.gov/bridge>

40. Bandhauer T. Electrochemical-Thermal Modeling and Microscale Phase Change for Passive Internal Thermal Management of Lithium Ion Batteries [Электронный ресурс] / Todd Bandhauer, Srinivas Garimella, and Thomas F. Fuller // Sandia National Laboratories. Report SAND2012-0074. – 2012. – 324 p.

Режим доступа: www. URL: <http://www.osti.gov/bridge>

41. Methekar R. Optimum Charging Profile for Lithium-ion Batteries to Maximize Energy Storage and Utilization / [Ravi N. Methekar, Venkatasailanathan Ramadesigan, Richard D. Braatz and Venkat R. Subramanian] // ECS Transactions. – 2010. – Vol. 25 (35). – P. 139–146.

42. Xiao M. Theoretical and experimental analysis of heat generations of a pouch type LiMn₂O₄/carbon high power Li-polymer battery / Meng Xiao, Song-Yul Choe // Journal of Power Sources. – 2013. – Vol. 241. – P. 46–55.

43. FY 2009 Energy Storage Research and Development [Электронный ресурс] / Approved by David Howell // U.S. Department of Energy. Annual progress report – 2010. – 237 p. Режим доступа: [www.URL:
http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/program/2009_energy_storage/pdf](http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/program/2009_energy_storage/pdf)

44. Kwon K. A two-dimensional modeling of a lithium-polymer battery / Ki Hyun Kwon, Chee Burm Shin, Tae Hyuk Kang, Chi-Su Kim // Journal of Power Sources. – 2006. – Vol. 163. – P. 151–157/

45. Yi J. Three-Dimensional Modeling of the Thermal Behavior of a Lithium-Ion Battery Module for Hybrid Electric Vehicle Applications / Jaeshin Yi, Boram Koo and Chee Burm Shin // Energies. – 2014. – Vol. 7. – P. 7586–7601.

46. Kima U. Modelling the thermal behaviour of a lithium-ion battery during charge / Ui Seong Kima, Jaeshin Yia, Chee Burm Shina, et al. // Journal of Power Sources. – 2011. – Vol. 196. – P. 5115–5121.

47. Taheri P. Temperature Rise in Prismatic Polymer Lithium-Ion Batteries: An Analytic Approach / Peyman Taheri and Majid Bahrami // SAE Int. J. Passeng. Cars - Electron. Electr. Syst. – 2012. – Vol. 5. – Iss. 1. – P. 13.

48. Pesaran A. Battery Requirements for Plug-In Hybrid Electric Vehicles - Analysis and Rationale [Электронный ресурс] / Ahmad Pesaran // National Renewable Energy Laboratory. NREL/PR-540-42469. – 2007. – 7 p. Режим доступа: [www. URL: http://www.nrel.gov/transportation/energystorage/pdfs/42469.pdf](http://www.nrel.gov/transportation/energystorage/pdfs/42469.pdf)

49. Christophersen J. INL Electrochemical Performance Testing [Электронный ресурс] / Jon P. Christophersen, Christopher J. Michelbacher, Sergiy V. et al. // Idaho National Laboratory. Vehicle Technologies Office. Annual Merit Review June 9, – 2015. – 34 p. Режим доступа:

[www. URL: https://mydesktop.doe.gov/sites/prod/files/2015/06/f23/es202_christophersen_2015_p.pdf](https://mydesktop.doe.gov/sites/prod/files/2015/06/f23/es202_christophersen_2015_p.pdf)

50. Cunningham B. Overview and Progress of the Battery Testing, Design, and Analysis Activity [Электронный ресурс] / Brian Cunningham // U.S.

Department of Energy. Vehicle Technologies Program. – 2012. – 21 p.

Режим доступа: www. URL:

http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/merit_review_2012/energy_storage/es116_cunningham_2012_o.pdf

51. Battery Test Manual For Plug-In Hybrid Electric Vehicles REVISION 0 [Электронный ресурс] / The Idaho National Laboratory INL/EXT-07-12536. – 2008. – 67 p. Режим доступа: www. URL: http://avt.inel.gov/battery/pdf/PLUG_IN_HYBRID_Manual%20Rev%200.pdf

52. Battery Test Manual For Plug-In Hybrid Electric Vehicles REVISION 3 [Электронный ресурс] / The Idaho National Laboratory INL/EXT-14-32849. – 2014. – 81 p.. Режим доступа: www. URL: <http://www.inl.gov/technicalpublications/Documents/6308373.pdf>

53. Rao Z. A review of power battery thermal energy management / Zhonghao Rao, Shuangfeng Wang // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2011. – Vol. 15. – P. 4554–4571.

54. Shekhar T. Energy Management & Control Performance Analysis of Hybrid Electric Vehicle / Tanay Shekhar, Jyoti Shrivastava // International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering. – 2015 – Vol. 3. – Iss. 3. – P. 58 – 62.

55. Pesaran A. Cooling and Preheating of Batteries in Hybrid Electric Vehicles [Электронный ресурс] / Ahmad Pesaran, Andreas Vlahinos, Thomas Stuart // The 6th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference March 16–20. – 2003. – 7 p. Режим доступа: www. URL: http://www.nrel.gov/transportation/energystorage/pdfs/jte_2003–633_sw_ap.pdf

56. Mariani A. Qualitative thermal characterization and cooling of lithium batteries for electric vehicles / A Mariani, F D’Annibale, G Boccardi, G P Celata et al. // Journal of Physics: Conference Series. – 2014. – Vol. 501. – P. 012035 (13 p.)

57. Mahamud R. Reciprocating air flow for Li-ion battery thermal management to improve temperature uniformity / Rajib Mahamud, Chanwoo Park

// Journal of Power Sources. – 2011. – Vol. 196. – P. 5685–5696.

58. Shahabeddin K. Thermal management optimization of an air-cooled Li-ion battery module using pin-fin heat sinks for hybrid electric vehicles / Shahabeddin K. Mohammadian, Yuwen Zhang // Journal of Power Sources. – 2015. – Vol. 273. – P. 431–439.

59. Michel F. Thermal management of a li-ion battery in a hybrid passenger car [Электронный ресурс] / F. Michel // Mercedes-Benz. – 2013. РЕЖИМ доступа: www. URL: http://www.cd-adapco.com/sites/default/files/Presentation/2_DAIMLER_FM.pdf

60. Kand . S. Cooling For EV and HEV applications Applied Power / Sukhvinder Kand // 2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC. Fort Worth. TX. USA. 16 – 20 Mar. 2014. – P. РЕЖИМ доступа: www. URL: <http://www.apec-conf.org/wp-content/uploads/IS2-3-1.pdf>

61. Wani C. A Review on Potential of Maisotsenko Cycle in Energy Saving Applications Using Evaporative Cooling / Chandrakant Wani, Satyashree Ghodke, Chaitanya Shrivastava // International Journal of Advance Research in Science, Engineering and Technology, Vol.01, Issue 01, pp.15-20.

62. Kim G. Thermal Management of Batteries in Advanced Vehicles Using Phase-Change Materials / Gi-Heon Kim, Jeffrey Gonder, Jason Lustbader, and Ahmad Pesaran // WEV Journal, –2008. –Vol. 2. –Iss. 2. – P. 46–59.

63. Kim G. Thermal Management of Batteries in Advanced Vehicles Using Phase-Change Materials / Gi-Heon Kim, Jeffrey Gonder, Jason Lustbader, and Ahmad Pesaran // The World Electric Vehicle Journal. – 2008. – Vol 2. – Issue 2. – P. 46 –59.

64. Rao Z. Experimental investigation on thermal management of electric vehicle battery with heat pipe / Zhonghao Rao, Shuangfeng Wang, Maochun Wu, Zirong Lin, Fuhuo Li // Energy Conversion and Management. – 2013. – Vol. 65. – P. 92–97.

65. Tran T. Experimental investigation on heat pipe cooling for Hybrid

Electric Vehicle and Electric Vehicle lithium-ion battery / Thanh-Hà Tran, Souad Harmand, Bernard Sahut // *Journal of Power Sources*. – 2014. – Vol. 265. – P. 262–272.

66. Наумова А.Н. Влияние на теплопередачу в пульсационной тепловой трубе ее ориентации в пространстве / А.Н. Наумова, В.Ю. Кравец // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. – 2011. – № 5–6. – С. 36–39.

67. Young K. *Electric Vehicle Battery Technologies* [Электронный ресурс] / Kwo Young, Caisheng Wang, Le Yi Wang, and Kai Strunz // Springer Science+Business Media. New York. – 2013. – P. 15–56.

Режим доступа: www. URL:

<https://www.google.com.ua/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CCwQFjAAah>

68. Zhang X. Thermodynamic assessment of active cooling/heating methods for lithium-ion batteries of electric vehicles in extreme conditions / [Xiongwen Zhang, Xin Kong, Guojun Li, Jun Li] // *Energy*. – 2014. – Vol. 64. – P. 1092 – 1101.

69. Srimuang W. Thermal Performance of a Flat Two Phase Closed Thermosyphon (FTPCT) with Different Cross-Sectional Areas and Source Temperatures / W. Srimuang, P. Amatachaya, B. Krittacom // 10th IHPS, Taipei, Taiwan, Nov. 6–9, – 2011. – P. 147–152.

70. Liu Y. Numerical Analysis and Design of Thermal Management System for Lithium Ion Battery Pack Using Thermoelectric Coolers [Электронный ресурс] / [Yong Liu, Shichun Yang, Bin Guo, and Cheng Deng] // Hindawi Publishing Corporation. *Advances in Mechanical Engineering*. – 2014, – 8 p. Режим доступа: www. URL: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/852712>

71. Pesaran A. Energy Storage R&D Thermal Management Studies and Modeling [Электронный ресурс] / Ahmad A. Pesaran // DOE Merit Review. – 2008. – 66 p. Режим доступа: www. URL: <http://www.nrel.gov/transportation/energystorage/pdfs/45531.pdf>

72. Development of an Experimental Testbed for Research in Lithium-Ion Battery Management Systems / Nima Lotfi, Poria Fajri, Samuel Novosad [et al.] // *Energies*. – 2013. Vol. 6. – P. 5231–5258.

73. Modeling and Simulation of Lithium-Ion Batteries from a Systems Engineering Perspective / Venkatasailanathan Ramadesigan, Paul W. C. Northrop, Sumitava De et al. // *Journal of The Electrochemical Society*. – 2012. – Vol. 159(3). – P. R31–R45.

74. Cunningham B. Automotive Li-ion Battery Cooling Requirements [Электронный ресурс] / Brian Cunningham // DOE Vehicle Technologies Program. – 2012. – 8 p. Режим доступа: [www. URL:http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/thermoelectrics_app_2012_wednesday_cunningham.pdf](http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/thermoelectrics_app_2012_wednesday_cunningham.pdf)

75. *Frontiers in Heat and Mass Transfer (FHMT)*. – 2011. – Vol. 2, – P. 023001 (1 – 5).

76. Thermal Characterization of Advanced Lithium-Ion Polymer Cells Matthew A. Keyser, Ahmad Pesaran, and Mark Mihalic Mohamed Alamgir and Daniel Rivers Mohamed Alamgir and Daniel Rivers Third Advanced Automotive Battery Conference, June 2003 6p.

77. Jiangyun Z. Simulation and Experiment on Air-Cooled Thermal Energy Management of Lithium-Ion Power Batteries / Zhang Jiangyun, Zhang Guoqing, Zhang Lei, Rao Zhonghao // *J Automotive Safety and Energy*. – 2011. – Vol. 2. – No. 2. – P. 181 – 184.

78. Cai L. Mathematical modeling of a lithium ion battery with thermal effects in COMSOL Inc. Multiphysics (MP) software / Long Cai, Ralph E. White // *Journal of Power Sources*. – 2011. – Vol. 196. – P. 5985–5989.

79. Benger R. Electrochemical and thermal modeling of lithium-ion cells for use in HEV or EV application / Ralf Benger, Heinz Wenzl, Hans-Peter [et al.] // *World Electric Vehicle Journal*. – 2009. – Vol. 3. – P. 1–10.

80. Krüger I. Thermal Modeling of Automotive Lithium Ion Cells using the Finite Elements Method in Modelica / Imke Krüger, Martin Sievers, Gerhard

Schmitz // Proceedings 7th Modelica Conference, Como, Italy, Sep. 20–22. – 2009. P. 1–8.

81. Products for Secondary Battery Market [Электронный ресурс] / ESPEC CORP. – 2013. – 23 p. Режим доступа: [www. URL: http://www.espec.co.jp](http://www.espec.co.jp)

82. Environmental Chambers for Battery Testing / Cincinnati Sub-Zero Products. Inc. – 2015. 8 p. http://www.cszindustrial.com/portals/1/PDF/Battery_Test_Chambers1.pdf

83. Lithium Ion Battery Test Equipment for Vehicles [Электронный ресурс] / Thermotron Industries. Brochure – 2011. 6 p. Режим доступа: [www. URL: http://www.scs-se.com/admin/media/fiche_prod/1334151062_Lithium%20Ion%20Battery%20Brochure.pdf](http://www.scs-se.com/admin/media/fiche_prod/1334151062_Lithium%20Ion%20Battery%20Brochure.pdf)

84. Азарнов А.Л. Обзор и анализ оборудования для определения технического состояния электрохимических аккумуляторов / [А. Л. Азарнов, К. В. Безручко, А. О. Давыдов и др.] // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2011. – № 4(81). – С. 42 – 49.

85. Безручко К.В. Особенности построения экспериментальных стендов для исследований и испытаний электрохимических аккумуляторов / К.В. Безручко, А.О. Давыдов, С.В. Ширинский. // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2012. – № 7(94). С. 147–152.

86. UN Manual of Tests and Criteria [Электронный ресурс] / United Nations Economic Commission for Europe. – 2010. // Режим доступа: [www. URL: http://phmsa.dot.gov/pv_obj_cache/pv_obj_id_D4B2D17039E706213B36C1B309D41DCF8B4A0200/filename/UN_Test_Manual_Lithium_Battery_Requirements.pdf](http://phmsa.dot.gov/pv_obj_cache/pv_obj_id_D4B2D17039E706213B36C1B309D41DCF8B4A0200/filename/UN_Test_Manual_Lithium_Battery_Requirements.pdf)

87. Ермаков С.М. Математическая теория планирования эксперимента. / Под редакцией С.М. Ермакова.– М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы. – 1983. – 392 с.

88. Мышкис А.Д. Элементы теории математических моделей. Изд. 3-е, исправленное. / А.Д. Мышкис – М.: КомКнига. – 2007. – 192 с.

89. Самарский А.А. Математическое моделирование: Идеи. Методы.

Примеры. 2-е изд., испр. / А.А. Самарский, А.П. Михайлов –М: Физматлит. – 2001. – 320 с.

90. Бейко И. В. Методы и алгоритмы решения задач оптимизации. / И. В. Бейко, Б. Н. Бублик, П. Н. Зинько – К.: Вища школа. Головное изд-во. – 1983. – 512 с.

91. Норенков И. П. Автоматизированное проектирование. Учебник. / И. П. Норенков – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2000. – 188 с.

92. Hirsch C. Numerical Computation of Internal and External Flows. Vol. 1. Fundamentals of Computational Fluid Dynamics. [Second edition] / Charles Hirsch. JohnWiley & Sons. Ltd. – 2007. – 675 p.

93. Андерсон Д. Вычислительная гидромеханика и теплообмен. Т. 1 / Д. Андерсон, Дж. Таннехилл, Р. Плетчер: пер. с англ.– М.: Мир. –1990.– 384с.

94. Сивухин, Д. В. Общий курс физики Т. 2: Термодинамика и молекулярная физика. / Д. В. Сивухин. [2-е изд.]. – М.: Наука. – 1979. – 552 с.

95. Лыков А.В. Тепломассообмен [справочник] / А.В. Лыков [2-е изд., перераб. и доп.]. – М.: – Энергия. – 1978. – 480 с.

96. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров: Пер. с англ. [справочник] / Х. Уонг – М.: – Атомиздат. – 1979. – 216 с.

97. Годунов С.К. Численное решение многомерных задач газовой динамики / С.К. Годунов, А.Н. Крайко, Г.П. Прокопов. – М., – Наука, – 1976. – 400 с.

98. Konarzewski M. Experimental and Numerical Studies of Selected Types of Batteries – State-of-the-Art / Marcin Konarzewski, Michał Stankiewicz, Piotr Szurgott // Journal of KONES Powertrain and Transport. – 2014. – Vol. 21. – No. 3. – P. 157–163.

99. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей: В 2-х томах: Т. 1 Пер. с англ. / К. Флетчер – М.: – Мир. – 1991. – 504 с.

100. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей: В 2-х

томах: Т. 2 Пер. с англ. / К. Флетчер – М.: – Мир. – 1991. – 552 с.

101. Богомолов Е. Н. Численные методы гидрогазодинамики: Учебное пособие./ Е. Н. Богомолов – Рыбинск: РГАТА имени П. А. Соловьёва. – 2010. – 92 с.

102. Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications, J. Fluids Eng. – 2008. – 130. – P. 078001(4 p.). http://www.ingaero.uniroma1.it/users/ingaero/joomla/attachments/874_procedure%20for%20estimation%20and%20reporting%20of%20uncertainty%20due%20to%20discretization%20in%20CFD%20applications.pdf

103. Алямовский А.А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation. / А.А. Алямовский – М.: – ДМК Пресс. – 2010. – 464 с.

104. SolidWorks Flow Simulation 2012 [Электронный ресурс] / Technical Reference. – 2012. – 177 p. // Режим доступа: [www.URL: https://d2t1xqejof9utc.cloudfront.net/files/18565/SW_CFD_technical_reference.pdf](http://www.URL:https://d2t1xqejof9utc.cloudfront.net/files/18565/SW_CFD_technical_reference.pdf)

105. Алгазин. С.Д. Численное исследование уравнения Навье- Стокса / С.Д. Алгазин // Прикладная механика и техническая физика. – 2007. – Т. 48. – №5. – С. 43 – 52.

106. Fang W. Electrochemical-thermal modeling of automotive Li-ion batteries and experimental validation using a three-electrode cell / Weifeng Fang, Ou Jung Kwon and Chao-Yang Wang // Int. J. Energy Res. – 2010. – Vol. 34. – P. 107–115.

107. Reay D. Heat Pipes Fifth Edition / D.A. Reay, P.A. Kew [Fifth edition]. Butterworth-Heinemann, USA. – 2006. – 377 p.

108. Yonglove B.A. Thermophysical Properties of Fluids. II. Methane, Ethane, Propane, Isobutane, and Normal Butane / B.A. Yonglove and J. F. Ely // J. Phys. Chem. Ref. Data. – 1987. –Vol. 16. –No. 4. – P. 577. – 798.

109. DAQ M Series [Электронный ресурс] / National Instruments Corporate. – 2008. Режим доступа: [www. URL: http://www.ni.com/pdf/manuals/NI_PCI_6225.pdf](http://www.ni.com/pdf/manuals/NI_PCI_6225.pdf)

110. MAX4581-MAX4583 [Электронный ресурс] / Maxim Integrated Products, Inc. – 2012. // Режим доступа: [www. URL: http://www.maximintegrated.com/en/ds/MAX4581-MAX4583.pdf](http://www.maximintegrated.com/en/ds/MAX4581-MAX4583.pdf)

111. LabVIEW [Электронный ресурс] / National Instruments Corporate. – 2008. Режим доступа: [www. URL: http://www.ni.com/pdf/manuals/371525a.pdf](http://www.ni.com/pdf/manuals/371525a.pdf)

112. Tran T. Experimental investigation on the feasibility of heat pipe cooling for HEV/EV lithium-ion battery / Thanh-Ha Tran, Souad Harmand, Bernard Desmet, Sebastien Filangi // *Applied Thermal Engineering*. – 2014. – Vol. 63. – P. 551–558.

113. Гершуни А.Г. Система охлаждения испарительно-конденсационного типа для рентгеновских трубок / А.Н. Гершуни, А.П. Нищик // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. – 2011. – № 1–2. – С. 34–38.

114. Lin W. Heat Transport Study of the Laminar Heat Pipe Heat Exchanger / Wei-Keng Lin, Ke Chine Liaw, Min-Zen Tsai, Min-Gung Chu // *Smart Grid and Renewable Energy*. – 2012. – Vol. 3. – P. 348–354.

115. Покрышкин В. Экспериментальные исследования теплообменников на основе тепловых труб для охлаждения аппаратуры космических аппаратов / В. В. Покрышкин, Ю. К. Гонтарев, М. Ю. Гонтарев // *Проблемы высокотемпературной техники*. – 2012. – С. 106 – 118.

116. Дан П.Д. Тепловые трубы / П.Д. Дан, Д.А. Рей Пер. с англ.: –М.: Энергия. – 1979. – 272 с.

117. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н.Б Варгафтик // – М.: Наука. – 1972. – 720 с.

118. Рид З. Свойства газов и жидкостей: Справочное пособие / З. Рид, Дж. Праусниц, Т. Шервуд [– 3-е изд., перераб. и доп.]. – Л.: Химия. 1982. – 592 с.

119. Kotulski Z. Error Analysis with Applications in Engineering / Zbigniew Kotulski, Wojciech Szczepiński. – Springer Dordrecht Heidelberg. – New York. –

2010. – 275 p.

120. Buonaccorsi J. Measurement error : models, methods, and applications / John P. Buonaccorsi // Taylor and Francis Group LLC. – 2010. – 428 p.

121. Новицкий П.В. Оценка погрешностей результатов измерений / П.В. Новицкий, И.А. Зограф [2-е изд., перераб. и доп.]. – 1991.– Л.: Энергоатомиздат. – 304 с.

122. Box G. Statistics for Experiments: Design, Innovation, and Discovery / G. Box, J. Hunter, W. Hunter - John Wiley & Sons, – New Jersey, – USA. – 2005. – 633 p.

Приложение А

Справка о внедрении результатов кандидатской работы

СПРАВКА

о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы Луханина Александра Алексеевича «Математические модели и вычислительные методы анализа эффективности систем охлаждения Li-ion батарей воздушным потоком».

(специальность 01.05.02 - математическое моделирование
и вычислительные методы).

Результаты диссертационной работы Луханина А. А. внедрены в ННЦ ХФТИ в экспериментальной установке «Мишень поляризованных ядер гелия 3». Предложенные математические модели и численные методы используются для моделирования тепловых процессов в гелиевой ячейке. Методы обработки и повышения точности измерений используются в многоканальной системе регистрации температуры мишени, системах измерения поляризации ядер гелия 3 и адиабатического реверса поляризации.

Их использование позволило сократить сроки разработок систем «Мишени поляризованных ядер гелия 3» и повысить эффективность работы систем мишени за счет автоматизированного управления этими системами.

Директор НИК "Ускоритель" ННЦ ХФТИ,
член-корреспондент НАН Украины,
доктор физ.-мат. наук, профессор.



Довбня А. Н.

Згідно з оригіналом
Секретар вченої ради Д 64.052.02

Підпис
Печатка

Л.В. Колесник