

РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО И КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НАГРЕВА ТЯГОВОЙ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ ЭЛЕКТРОБОЛИДА КЛАССА «FORMULA STUDENT»

THE RESULTS OF MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELING OF HEATING OF THE TRACTION BATTERY OF THE ELECTRIC CAR OF THE CLASS «FORMULA STUDENT»

A. Shkolyarenko
P. Ivandikova
R. Ilimbetov
V. Nikolayev
A. Alenov

Summary. The article presents the results of a mathematical and computer study of the heating processes of a traction battery (battery) of an electric car using mathematical and computer modeling. Computer modeling is implemented using the ANSYS (Stadium-state termal) software. A comparison and analysis of the simulation results are presented, which will help in choosing the optimal type of traction battery cooling.

Keywords: cooling, traction batteries, ANSYS, 3D modeling, mathematical modeling.

Школяренко Анастасия Олеговна
ФГАО УВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)»
lady.shkolyarenko@mail.ru

Ивандикова Полина Сергеевна
ФГАО УВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)»
ivandikova@bk.ru

Илимбетов Рафаэль Юрикович
канд.тех.наук, доцент, ФГАО УВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)»
ilimbay@yandex.ru

Николаев Владислав Андреевич
ФГАО УВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)»
mr.vlad10a@mail.ru

Аленов Ален Жаксклыкович
ФГАО УВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)»,
alenalenov00@icloud.com

Аннотация. В статье представлены результаты математического и компьютерного исследования процессов нагрева тяговой аккумуляторной батареи (АКБ) электроболида с помощью математического и компьютерного моделирования. Компьютерное моделирование реализуется при помощи программного обеспечения (ПО) ANSYS (Stady-state termal). Приведен сравнение и анализ результатов моделирования, которые помогут в выборе оптимального типа охлаждения тяговой аккумуляторной батареи.

Ключевые слова: охлаждение, тяговые аккумуляторные батареи, ANSYS, 3D-моделирование, математическое моделирование.

Введение

Для автомобильного электрического транспорта тяговая аккумуляторная батарея (ТАКБ) является основным источником электроэнергии. Движение Formula Student Electric является международным проектом, ориентиром которого является подготовка высококвалифицированных инженерных и научных кадров для автомобильной промышленности.

Тяговая АКБ должна соответствовать определенным параметрам такие как: минимальная масса, при наибольшей ёмкости; соответствие требованиям пожарной и электрической безопасности. Для того чтобы аккумуляторная батарея нормально функционировала, ее рабочая температура должна поддерживаться в диапазоне от +15 до +20 С°. Такую температуру обеспечивает

система охлаждения батареи при номинальных режимах работы. Кроме того, система охлаждения должна быть компактной, легкой, доступной по цене и способной работать в заданных климатических условиях. Конструктивно батарея состоит из отдельных ячеек, число которых может различаться в зависимости от потребляемой мощности. Конструкция батареи охлаждается потоком воздуха или жидкостью [1]. Поэтому при проектировании и исследовании важно определить оптимальный способ охлаждения для поддержания рабочей температуры. Для решения научно-технических задач в области охлаждения тяговых АКБ одним из инструментов является математическое и компьютерное моделирование.

Математическое моделирование — фундаментальный метод исследования сложных систем. Численное моделирование использует методы вычислительной ма-

тематики и позволяет получить приближенные решения соответствующих уравнений для частных наборов параметров системы. Получаемые при этом данные не обладают общностью аналитических решений, требуют верификации, могут быть чувствительны к использованному численному методу [2].

Моделирование охлаждения является важной областью в инженерии, позволяющей анализировать и оптимизировать процессы теплообмена и улучшить эффективность систем охлаждения. Специализированное программное обеспечение Ansys предоставляет мощные инструменты для создания и анализа моделей охлаждения различных объектов и применяется в различных отраслях, таких как автомобильное производство, энергетика, электроника и др.

Анализ работы системы охлаждения батареи выполняется в два этапа. Вначале производится анализ охлаждения отдельной ячейки обтекающим ее потоком воздуха при движении его по каналам, которые расположены между отдельными ячейками, а затем определяются условия охлаждения всей батареи [1]. В данной работе представлены результаты моделирования для отдельной ячейки ТАКБ.

Этапы моделирования процесса охлаждения в Ansys

Ansys — это мощный пакет инженерных программ, предлагающий различные инструменты и возможности для моделирования и симуляции систем охлаждения и терморегулирования. С помощью Ansys можно анализировать теплопередачу, гидродинамику и тепловое поведение в широком спектре приложений, включая охлаждение электроники, выработку электроэнергии и т.д.

Основные шаги моделирования охлаждения:

1. Создание геометрии:

В программе Ansys можно создать или импортировать геометрию исследуемого объекта, для которого требуется охлаждение. Это может быть 3D-модель, представленная в форматах, таких как *.STL или *.STEP. Дополнительно существует возможность настроить геометрию окружающей среды и граничные условия для моделирования процесса охлаждения.

2. Выбор модели охлаждения:

выбирается тип модели охлаждения в зависимости от конкретной ситуации. Это может включать конвекцию, теплопроводность, излучение и другие тепловые процессы.

3. Задание граничных условий:

настройка граничных условий для модели охлаждения, учитываются начальные условия (температура и распределение тепла в начальный момент времени) и граничные условия на поверхностях объектов (кон-

вективное охлаждение, радиационные свойства и теплопроводность).

4. Выбор численного метода: выбирается подходящий численный метод, который будет использован для моделирования процессов охлаждения. Ansys предоставляет широкий набор численных методов, включая метод конечных элементов (FiniteElementMethod, FEM), конечно-разностный метод (FiniteDifferenceMethod, FDM) и др.
5. Выполнение расчетов: результаты расчетов могут включать распределение температуры и теплового потока внутри объекта, графики и карты тепла.
6. Валидация результатов и оптимизация: сравнение полученных результатов с экспериментальными данными или аналитическими моделями, проверяется на корректность. Проводится оптимизация и анализ полученных результатов для улучшения процесса охлаждения.

Область применения Ansys в моделировании процессов охлаждения

Компьютерная программа Ansys как инструмент позволяет выполнить следующие процессы:

- моделирование охлаждения электротехнических компонентов, чтобы определить и устранить узкие места и проблемы с избыточным нагревом;
- разработка и оптимизация систем охлаждения для автомобильных двигателей, радиаторов и других компонентов автомобиля;
- исследование и улучшение систем охлаждения электроники в промышленных приложениях для предотвращения перегрева и повышения надежности;
- моделирование охлаждения в энергетических системах, таких как тепловые электростанции или ядерные реакторы;
- моделирование гидродинамических процессов в проточной части центробежного насоса предлагается модифицированный интегрально-сопряженный численный метод решения уравнений математической физики методом взвешенных невязок на базе нейросетевых пробных решений. при помощи ansys workbench [3];
- одноосное циклическое растяжение с нарастающей амплитудой наполненного эластомерного материала. такие материалы обладают сложными механизмами механического поведения, кроме упругости здесь присутствуют вязкоупругость и эффект размягчения Маллинза. по данным эксперимента в программном комплексе Ansys построена математическая модель вязкоупругого материала с эффектом размягчения [4].
- расчеты течения жидкости в лопастных гидромашинах с использованием пакета Ansys CFX [5].

Таким образом программное обеспечение Ansys представляет широкий спектр компьютерного исследования в решении научных и инженерных задач.

Методика математического моделирования

Система охлаждения предназначена для принудительного отвода от тяговой аккумуляторной батареи лишнего тепла и передачи его окружающему воздуху. Охлаждение ТАКБ применяется в целях принудительного отвода тепла от нагретых элементов для обеспечения оптимального теплового состояния двигателя и его нормальной работы.

Большая часть отводимого тепла воспринимается системой охлаждения, меньшая — непосредственно окружающей средой. Тепло отводится двумя способами, в зависимости от рода используемого теплоносителя: жидкостью (жидкостная система охлаждения) или воздухом (воздушная система охлаждения).

Анализ работы системы охлаждения батареи выполняется по следующей методике.

Массовый расход воздуха через канал площадью B :

$$m = \rho \cdot B \cdot V_m, \quad (1)$$

где ρ — плотность воздуха, кг/м³;
 B — площадь канала, м²;
 V_m — скорость движения воздуха, м/с.

$$B = \frac{c \cdot b}{10^6}, \quad (2)$$

где c — ширина канала, мм;
 b — длина канала, мм.

Движение воздуха по каналу может быть ламинарным или турбулентным, для определения типа движения воздуха необходимо опираться на значение числа Рейнольдса (Re). Сопротивление движению воздуха в канале при ламинарном движении намного меньше, чем при турбулентном. Граница перехода определяется критическим числом Рейнольдса $Re=2000$.

Число Рейнольдса рассчитывается по формуле:

$$Re = \frac{V_m \cdot D_h}{\nu}, \quad (3)$$

где D_h — гидравлический диаметр для прямоугольного канала, м;
 V_m — средняя скорость движения воздуха в канале;
 ν — коэффициент кинематической вязкости, м²/с.

Гидравлический диаметр канала:

$$D_h = \frac{2 \cdot \Pi}{C_{\Pi}}, \quad (4)$$

где $\Pi = c \cdot b \cdot 10^{-6}$ — площадь поперечного сечения потока, м²;

$$C_{\Pi} = (c + b) \cdot 10^{-3} \text{ — смачиваемый периметр, м.}$$

Число Нуссельта вычисляется по разным формулам в зависимости от типа движения воздуха по каналу:

$$Nu_{\text{лам}} = 1,86(Re \cdot Pr)^{0,33} \cdot \left(\frac{D_h}{L_b}\right)^{0,33} \cdot \left(\frac{\mu_b}{\mu_s}\right)^{0,14} \quad (5)$$

$$Nu_{\text{турб}} = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,3}, \quad (6)$$

где $Pr = 0,71$ — число Прандтля;

L_b — высота ячейки, м;

μ_b — коэффициент динамической вязкости при $t=60^{\circ}\text{C}$;

μ_s — коэффициент динамической вязкости при $t=23^{\circ}\text{C}$.

Далее вычислим разность температур потока на выходе и входе канала:

$$\Delta T_1 = \frac{q_c}{m \cdot C_p}, \quad (7)$$

где q_c — тепловой поток, поступающий в канал, Вт;
 m — массовый расход воздуха через канал, кг/с;
 C_p — удельная теплоемкость при постоянном давлении, Дж/кг·град.

При $T_{b1}=23$ градуса на входе, можно вычислить температуру воздуха на выходе T_{b2} :

$$T_{b2} = \Delta T_1 + T_{b1}, \quad (8)$$

Для дальнейших расчетов необходимо знать величину h_c — коэффициента теплопередачи, который рассчитывается по формуле:

$$h_c = \frac{k \cdot Nu}{D_h}, \quad (9)$$

где $k = 0,0265$ — коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/м·°C;

Nu — число Нуссельта.

Теперь вычисляется разность средней температуры стенки и средней температуры потока на входе и выходе канала:

$$\Delta T_2 = \frac{q_c}{h_c \cdot A}, \quad (10)$$

где $A = 2 \cdot b \cdot 10^{-3} \cdot Lb$ — общая площадь поверхности контакта газа с теплопередающей поверхностью, м.

Рассчитаем температуру поверхности ячейки:

$$T_s = \Delta T_2 + \frac{T_{b1} + T_{b2}}{2}, \quad (11)$$

Важным параметром для расчета нагрева является средняя скорость движения воздуха в канале. Данный параметр можно увеличить с использованием дополнительных средств нагнетания воздуха в корпус ТАКБ. В основном для данных целей используются вентиляторы разных размеров.

Результаты математического моделирования

Для моделирования мы взяли аккумуляторы Sony типоразмера 18650, модель VTC6 рисунок 1. Заявленная емкость 3 Ач. Максимальный длительный ток — 15 А без контроля температуры и 30 А при условии ограничения максимальной температуры в 80 градусов.

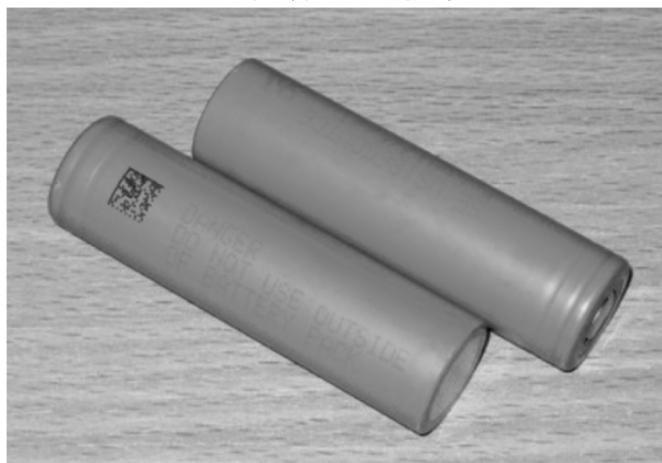


Рис. 1. Аккумулятор Sony типоразмера 18650, модель VTC6

Результаты математического моделирования представлены в таблице 1.

Согласно данным, таблицы 1 видно, что температура нагрева на поверхности элемента тяговой АКБ изменяется от скорости движения воздушного потока. Наиболее эффективное охлаждение будет при скорости движения

воздушного потока равным 15 м/с. На рисунке 2 представлен график зависимости нагрева поверхности элемента ТАКБ от скорости движения воздушного потока. Видно, что с увеличением скорости воздушного потока с 4 м/с до 15 м/с температура нагрева снижается соответственно с 70 °С до 40 °С.

Результаты компьютерного моделирования

В программе Ansys, пакет Steady-state thermal, создана модель Тяговой АКБ, для упрощения расчетов взяты 4 батарейки Sony типоразмера 18650, модель VTC6.

На рисунке 3 представлены исходные данные для разбиения исследуемой поверхности и тепловой поток, который выделяется одним элементом батареи (рисунок 4). Для нашей модели взят размер сетки 0,005 м и задан тепловой поток в 0,138 Вт. Скорость потока воздуха для модели 15 м/с. Заданная температура окружающей среды 23 °С.

На рисунке 5 представлены входные данные для моделирования нагрева ТАКБ.

На рисунке 6 представлен результат моделирования нагрева элемента №1.

На рисунке 6 представлена 3D модель нагрева одного элемента тяговой АКБ. Максимальная температура нагрева одного элемента составляет 38,94 °С. Из рисунка видно, что область максимального нагрева сосредоточена в точках соприкосновения с соседним элементом в области торца. Температура нагрева элемента колеблется в пределе 0,5 °С.

Заключение

Математическое моделирование позволяет узнать температуру поверхности элемента, которая близка к температуре внутри элемента. Данный расчет не учитывает особенности корпуса тяговой аккумуляторной батареи, однако дает возможность узнать предварительные параметры нагрева батареи для различных сборок. Мы получили результаты нагрева ТАКБ, зависящие от скорости охлаждения. Значение нагрева поверхности одного элемента составило 40 °С, при скорости охлаж-

Таблица 1.

Результаты математического моделирования нагрева аккумулятора Sony

u, м/с	Тип движения воздуха	Re	Nu	m, кг/с	hc Вт/м ² град	ΔT1	ΔT2	Ts
4,0	ламинарное	880,68	9,28	0,0005	63	43	66	70
5,0	ламинарное	1100,85	9,99	0,0007	68	34	57	65
10,0	турбулентное	2201,70	9,80	0,0014	67	17	40	44
15,0	турбулентное	3302,56	13,56	0,0020	92	11	34	40

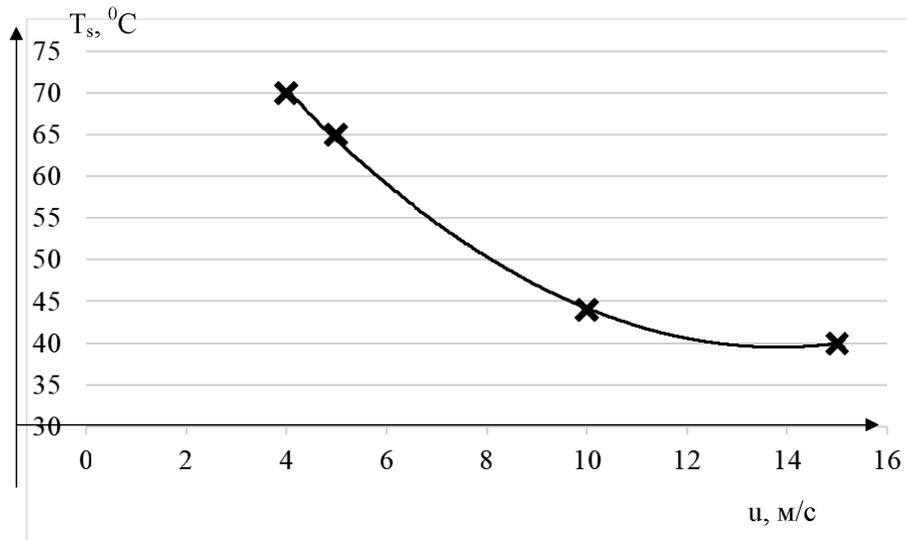


Рис. 2. График зависимости нагрева поверхности элемента ТАКБ от скорости движения воздуха

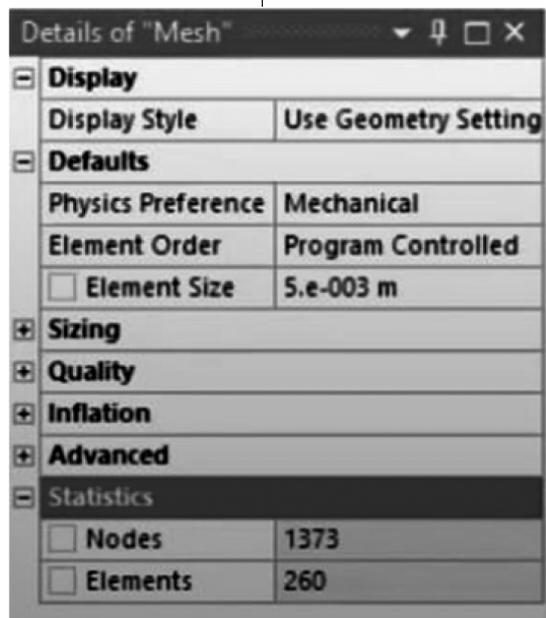


Рис. 3. Исходные данные для разбиения исследуемой поверхности

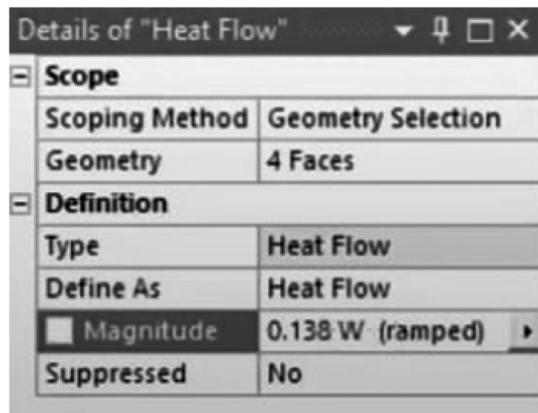


Рис. 4. Исходные данные теплового потока, выделяемый одним элементом

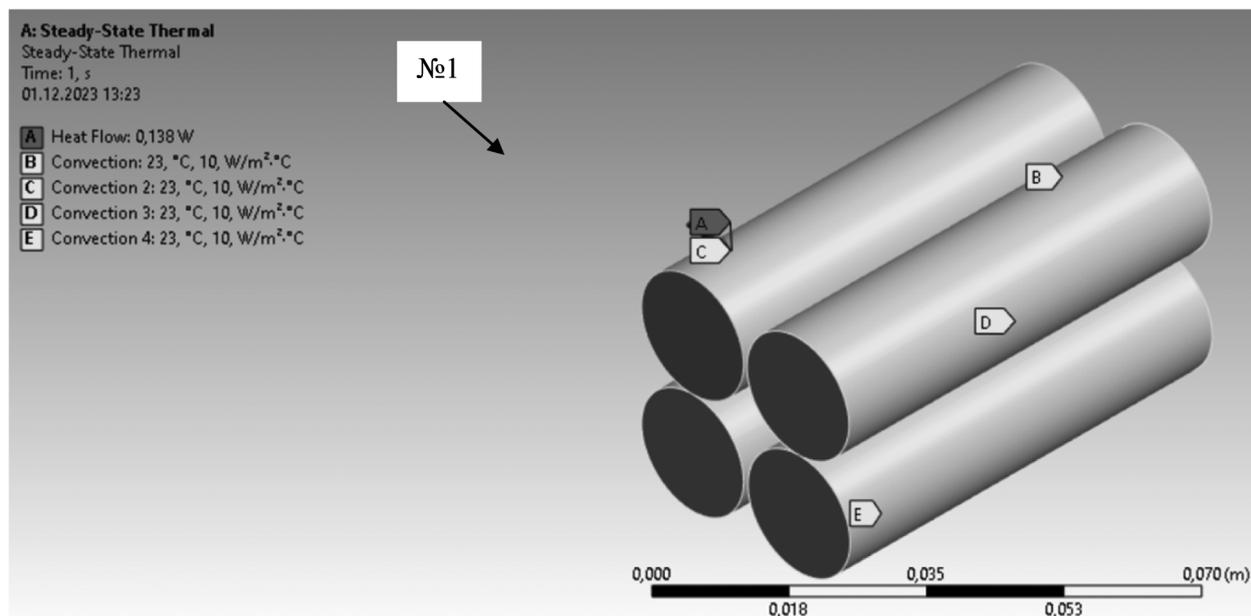


Рис. 5. Исходные данные для 3D модели нагрева тяговой АКБ

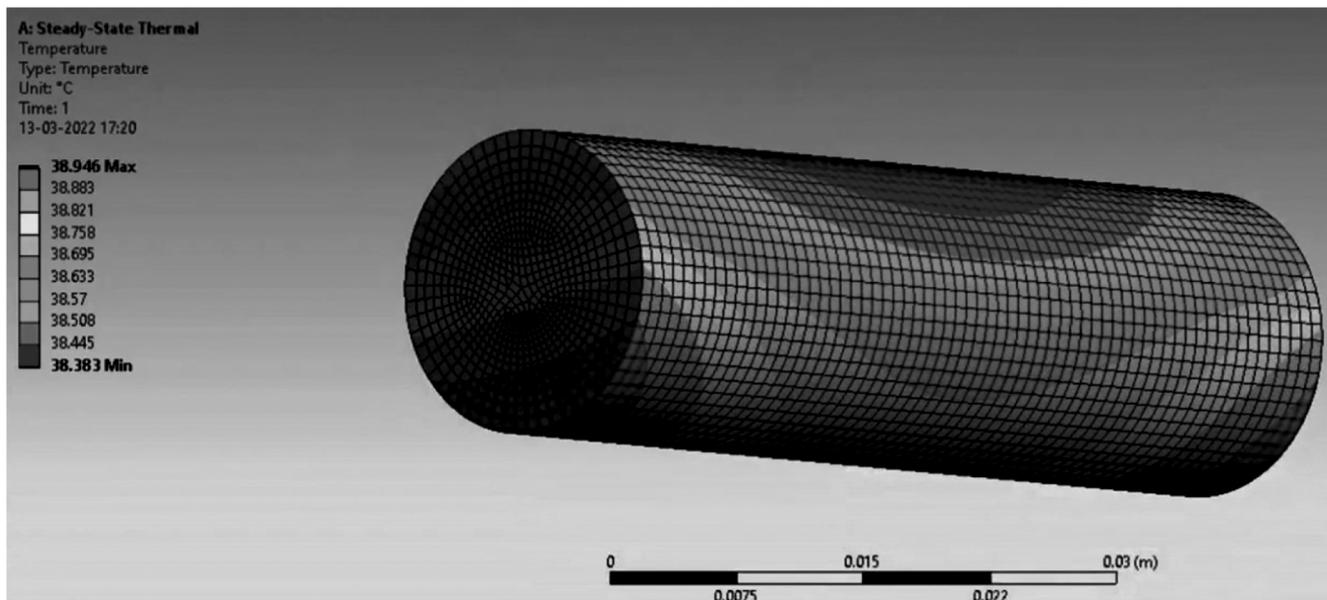


Рис. 6. Результат моделирования нагрева элемента №1 ТАКБ

дения в 15 м/с. Рекомендуемая скорость воздушного потока варьируется в диапазоне от 6 до 15 м/с, что составит интервал нагрева одного элемента с 40 °С до 60 °С.

Это позволяет в дальнейшем грамотно спроектировать конструкцию тяговой аккумуляторной батареи с учетом оптимального ее охлаждения с учетом работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Слабоспицкий Ростислав Павлович, Лукьянова Валентина Петровна, Хажмурадов Маип Ахмадович. Анализ и расчет системы охлаждения аккумуляторной батареи // Радиоэлектроника и информатика. 2011. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-i-raschet-sistemy-ohlazhdeniya-akkumulyatornoy-batarei> (дата обращения: 25.10.2023)
2. Кондратьев Александр Сергеевич, Ляцев Александр Викторович. Математическое моделирование: аналитические и вычислительные методы // КИО. 2007. №5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskoe-modelirovanie-analiticheskie-i-vychislitelnye-metody> (дата обращения: 21.10.2023).
3. Валухов С.Г., Кретинин А.В. Математическое моделирование гидродинамических процессов в проточной части центробежного насоса с использованием нейросетевых алгоритмов / Насосы. Турбины. Системы. 2011, № 1./
4. Пелевин А.Г., Шадрин В.В. Особенности использования модели вязкоупругого материала в программном комплексе ANSYS // Вестник Пермского университета. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2021. №3 (54). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-ispolzovaniya-modeli-vyazkouprugogo-materiala-v-programmnom-komplekse-ansys> (дата обращения: 20.10.2023).
5. Пугачев П.В. Расчет и проектирование лопастных гидромашин. Расчет вязкого течения в лопастных гидромашин с использованием пакета ANSYS CFX: учеб. пособие / П.В. Пугачев, Д.Г. Свобода, А.А. Жарковский. — СПб.: Изд-во Политехн. унта, 2016. — 120 с.
6. Обзор программного обеспечения для моделирования теплового нагрева тяговых электродвигателей и батарей / А.О. Школяренко, П.С. Ивандикова, В.А. Николаев [и др.] // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. — 2023. — Т. 11, № 1. — С. 66–70. — EDN IQELLW. Статьи по экспериментальной модели
7. Павлевич, А. AnsysMechanical APDL или AnsysMechanicalWorkbench? / А. Павлевич, Н. Староверов // САПР и графика. — 2020. — № 6(284). — С. 78–80. — EDN NNFHBO.
8. Обзор программного обеспечения для моделирования теплового нагрева тяговых электродвигателей и батарей / А.О. Школяренко, П.С. Ивандикова, В.А. Николаев [и др.] // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. — 2023. — Т. 11, № 1. — С. 66–70. — EDN IQELLW.
9. Martyushev, N.V.; Malozyomov, B.V.; Sorokova, S.N.; Efremkov, E.A.; Qi, M. Mathematical Modeling of the State of the Battery of Cargo Electric Vehicles. Mathematics 2023, 11, 536. <https://doi.org/10.3390/math11030536>
10. Доброго К.В., Бладыко Ю.В. Моделирование аккумуляторных батарей и их сборок с учетом деградации параметров // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2021. №1.
11. Скундин А.М., Современное состояние и перспективы развития исследований литиевых аккумуляторов / А.М. Скундин, О.Н. Ефимов, О.В. Ярмоленко // Успехи химии. — 2002 — №71 (4)
12. R Dshpande. Battery Cycle Life Prediction with Coupled Chemical Degradation and Fatigue Mechanics/Journal of The Electrochemical Society, 159 (10) A1730-A1738 (2012)
13. Проценко Н.А. Расчетно-экспериментальная оценка распределения температур в случае технологических сбоев в работе литий-ионного аккумулятора космического назначения / Н.А. Проценко, В.Ю. Лапшин, Ж.М. Бледнова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — 2010 — т.12, №4 (3)
14. Ганова Анастасия Сергеевна, Хмелев Роман Николаевич Сравнительный анализ характеристик тяговых аккумуляторов для современных электромобилей // Известия ТулГУ. Технические науки. 2020. №10.
15. Борисевич А.В. Моделирование литий-ионных аккумуляторов для систем управления батареями: обзор текущего состояния // Современная техника и технологии. 2014. № 5 [Электронный ресурс]. URL: <http://technology.snauka.ru/2014/05/3542> (дата обращения: 20.11.2023)

© Школяренко Анастасия Олеговна (lady.shkolyarenko@mail.ru); Ивандикова Полина Сергеевна (ivandikova@bk.ru);
Илимбетов Рафаэль Юрикович (ilimbay@yandex.ru); Николаев Владислав Андреевич (mr.vlad10a@mail.ru);
Аленов Ален Жаксклыкович (alenalenov00@icloud.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»