



На правах рукописи

Красношлыков Александр Сергеевич

**ТЕПЛОПЕРЕНОС В АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЯХ
ЭНЕРГОНАСЫЩЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ С СИСТЕМАМИ
ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА НА БАЗЕ ТЕРМОСИФОНОВ**

Специальность 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2019 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном
образовательном учреждении высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор,
Кузнецов Гений Владимирович

Официальные оппоненты: **Прибатурин Николай Алексеевич,**
Доктор технических наук, Федеральное
государственное бюджетное учреждение науки
Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе
Сибирского отделения Российской академии наук,
лаборатория проблем теплопереноса, главный
научный сотрудник, г. Новосибирск

Таиров Эмир Асгадович,
Доктор технических наук, доцент, Федеральное
государственное бюджетное учреждение науки
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева
Сибирского отделения Российской академии наук,
отдел теплосиловых систем, Главный научный
сотрудник, г. Иркутск

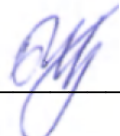
Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский
государственный университет», г. Томск

Защита диссертации состоится 03 июля 2019 года в 10⁰⁰ часов на заседании
диссертационного совета Д 212.173.02 при Федеральном государственном
бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский
государственный технический университет» по адресу: 630073, Новосибирск, пр.
К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского
государственного технического университета и на сайте www.nstu.ru.

Автореферат разослан « » мая 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук


О.В. Боруш

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В современных летательных аппаратах аккумуляторные батареи применяются в качестве аварийных источников электроэнергии, а также для питания потребителей первой категории, без которых невозможно нормальное завершение полёта. Но, при эксплуатации этого типа батарей существует риск их возгорания вследствие теплового разгона, причиной которого, в основном, является недостаточный теплообмен с окружающей средой. Для того, чтобы поддерживать температуру аккумуляторной батареи в безопасном для нее диапазоне необходимо интенсифицировать теплоотдачу с внешних поверхностей ее корпуса. Обеспечение теплового режима аккумуляторных батарей целесообразно проводить с использованием автономных (независимых от источников энергии) технических устройств или систем. К таким устройствам относятся замкнутые двухфазные термосифоны.

Степень разработанности. Исследования процесса теплопереноса в аккумуляторных батареях, используемых в авиационной технике, с системами обеспечения теплового режима на основе замкнутых двухфазных термосифонов ранее не проводились. Особо следует отметить, что до настоящего времени не исследовались экспериментально или теоретически процессы теплопереноса в аккумуляторных батареях, работающих в условиях интенсивных токовых нагрузок, с учетом влияния на основные характеристики процесса – температурные распределения основных значимых факторов (токовой нагрузки, свойств электролита, конструктивно-компоновочной схемы, размеров и конструкции основных элементов, свойств материала корпуса, условий теплообмена с внешней средой и др.). Соответственно, пока нет документированных научных результатов, обосновывающих перспективность (или бесперспективность) использования термосифонов в качестве основных элементов системы обеспечения теплового режима аккумуляторных батарей нового поколения. В этой связи целесообразным является проведение исследований процесса теплопереноса в аккумуляторных батареях, охлаждение которых в условиях высоких тепловых нагрузок осуществляется термосифонами.

Цель работы. Обоснование по результатам математического моделирования процессов теплопереноса в энергонасыщенных аккумуляторных батареях с системами обеспечения теплового режима на базе термосифонов возможности создания таких систем для использования в современной технике.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие **задачи:**

1. Численные исследования распределений температур в аккумуляторной батарее в условиях интенсивного тепловыделения, обусловленного высокими токовыми нагрузками.

2. Моделирование теплофизических и гидродинамических процессов в термосифонах при тепловых нагрузках, соответствующих критическим для аккумуляторных батарей.

3. Определение в результате математического моделирования параметров работы термосифона, обеспечивающих эффективный теплоотвод при

температурах, соответствующих критическим рабочим температурам аккумуляторных батарей воздушных судов.

4. Анализ влияния свойств рабочей жидкости на характеристики теплопереноса в термосифонах при тепловых нагрузках, соответствующих параметрам работы энергонасыщенного авиационного оборудования.

5. Математическое моделирование влияния условий теплоотдачи на верхней крышке термосифона прямоугольной формы на эффективность его работы.

6. Численное исследование влияния толщины пленки жидкости на нижней крышке замкнутого двухфазного термосифона на интенсивность теплопередачи при работе с тепловыми нагрузками аккумуляторных батарей летательных аппаратов.

7. Разработка рекомендаций по применению термосифонов в качестве основного элемента системы обеспечения теплового режима перспективных энергонасыщенных аккумуляторных батарей для авиационной техники.

Научная новизна работы. Предложен новый подход к созданию систем обеспечения теплового режима энергонасыщенных аккумуляторных батарей транспортных средств на базе замкнутых двухфазных термосифонов. Сформулирована и решена группа новых задач математического моделирования процессов теплопереноса, протекающих в системе «аккумуляторная батарея-замкнутый двухфазный термосифон» при высоких тепловых нагрузках с использованием программных пакетов ANSYS Thermal Electric и Fluent.

Проведено численное решение задачи теплопереноса в условиях замкнутого двухфазного термосифона при тепловых потоках, соответствующих литий-ионным аккумуляторным батареям с использованием программного пакета ANSYS Fluent. Обоснована возможность применения замкнутых двухфазных термосифонов в качестве основного элемента системы обеспечения теплового режима энергонасыщенного авиационного оборудования – аккумуляторных батарей в условиях высоких тепловых нагрузок.

Теоретическая и практическая значимость работы. Полученные в результате математического моделирования характеристики исследуемых теплофизических процессов в зависимости от численных значений большой группы значимых факторов могут быть использованы при определении необходимых и достаточных условий для создания эффективной системы обеспечения теплового режима аккумуляторных батарей. Результаты исследований теплофизических и гидродинамических процессов, протекающих в области «аккумуляторная батарея-термосифон», позволяют выбрать параметры замкнутого двухфазного термосифона, обеспечивающие безаварийную работу перспективных энергонасыщенных источников питания – аккумуляторных батарей различного назначения. Сформулированные в рукописи рекомендации могут служить основой для создания систем обеспечения теплового режима аккумуляторных батарей воздушных судов и других транспортных средств на основе замкнутых двухфазных термосифонов.

Метод исследования. Численное исследование основных теплофизических процессов, протекающих в системе «аккумуляторная батарея – замкнутый двухфазный термосифон» при высоких тепловых нагрузках, проведено с использованием программных пакетов ANSYS Thermal Electric и Fluent.

Достоверность результатов численных исследований. Достоверность подтверждается тестированием при решении менее сложных задач и сопоставлением полученных характеристик процессов с экспериментальными данными и теоретическими следствиями других авторов, опубликованными в журналах Applied Thermal Engineering и International Journal of Heat and Mass Transfer.

Связь работы с научными проектами и грантами. Диссертационные исследования основных закономерностей процессов теплопереноса в системе «аккумуляторная батарея-замкнутый двухфазный термосифон» выполнены при финансовой поддержке ГЗ «Наука» (проект «Физическое и математическое моделирование пространственного теплопереноса и гидромеханики в термосифонных системах обеспечения теплового режима энергонасыщенного оборудования авиационной техники» №13.1339.2014/К 2014-2016 гг.).

Тематика исследования соответствует приоритетному направлению развития науки, техники и технологии в Российской Федерации (указ Президента РФ №899 от 7 июля 2011 года) «Транспортные и космические системы», а также находится в сфере космических технологий федерального уровня, получивших высокий рейтинг по показателям состояния и перспективам развития «Технологии создания высокоскоростных транспортных средств и интеллектуальных систем управления новыми видами транспорта».

Положения, выносимые на защиту. Обоснование возможности использования замкнутых двухфазных термосифонов в качестве основного элемента системы обеспечения теплового режима энергонасыщенного авиационного оборудования – аккумуляторных батарей. Результаты численных исследований влияния группы факторов (плотность теплового потока, продольный размер, условия теплоотдачи с верхней крышки, свойства теплоносителя, толщина пленки жидкости на нижней крышке исследуемого устройства) на основные характеристики процессов теплопереноса в системе «аккумуляторная батарея-замкнутый двухфазный термосифон».

Апробация работы. Основные положения и результаты научного исследования докладывались и обсуждались на Международной школе-семинаре «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования», Томск, 2015 г., 2016 г., 2017 г.; XV Минском международном форуме по тепло- и массообмену, Минск, 2016 г.; XIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук», Томск, 2016 г.; IV Международном молодежном форуме «Интеллектуальные энергосистемы», Томск, октябрь 2016 г.; Всероссийской научной конференции с международным участием «Теплофизические основы энергетических

технологий», Томск, 2017 г.; V Международном молодежном форуме «Интеллектуальные энергосистемы», Томск, 2017 г.

Публикации. Основные результаты диссертации представлены в 11 работах, в том числе 3 в рецензируемых журналах из списка, рекомендованного ВАК (РФ, Scopus). В международных рецензируемых журналах, индексируемых базами данных Scopus и Web of Science, опубликованы 8 статей.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных результатов и выводов, списка литературы. Диссертация изложена на 116 страницах машинописного текста, содержит 39 рисунков, 2 таблицы. Библиография включает 167 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель и задачи, отражена практическая значимость и научная новизна полученных результатов.

В первой главе проанализировано современное состояние исследований теплопереноса в аккумуляторных батареях и термосифонах. Показано, что отсутствуют результаты исследований влияния основных значимых факторов на характеристики теплопереноса в аккумуляторных батареях и замкнутых двухфазных термосифонах прямоугольного поперечного сечения при тепловых нагрузках, соответствующих энергонасыщенному авиационному оборудованию.

Во второй главе представлена постановка задачи математического моделирования основных теплофизических процессов, протекающих в аккумуляторных батареях и замкнутых двухфазных термосифонах. Описаны используемые методы и алгоритмы решения нестационарных нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных. Приведены результаты численного решения тестовых задач при верификации используемого метода решения основных задач диссертации.

В качестве основного объекта исследований рассматривается типичный сегмент литий-ионного аккумулятора, включающий медную и алюминиевую пластины, слой электролита между ними и твердую стенку исследуемого устройства (рисунок 1).

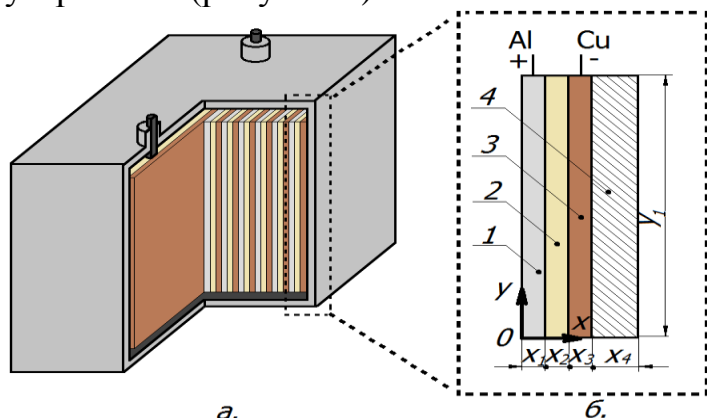


Рисунок 1 – а). общий вид области решения; б). рассматриваемый сегмент аккумулятора. 1 – положительный электрод (алюминиевая пластина); 2 – жидкий электролит (LiPF_6); 3 – отрицательный электрод (медная пластина); 4 – стенка аккумулятора (ПВХ)

Предполагалось, что тепловыделение в пластинах распределено равномерно по направлениям x и y .

Уравнения неразрывности, движения и энергии для слоя жидкого электролита:

$$\frac{\partial(\rho_2 u_2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_2 v_2)}{\partial y} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_2 u_2}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_2 u_2 u_2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_2 v_2 u_2)}{\partial y} = \frac{\partial P_2}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_2 \frac{\partial u_2}{\partial y} \right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho_2 v_2}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_2 u_2 v_2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_2 v_2 v_2)}{\partial y} = \rho \beta g_y (T - T_0) - \frac{\partial P_2}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_2 \frac{\partial v_2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_2 \frac{\partial v_2}{\partial y} \right), \quad (3)$$

$$\rho_2 C_{p2} \left(\frac{\partial T_2}{\partial t} + u_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} + v_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} \right) = \lambda_2 \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} \right). \quad (4)$$

Уравнение теплопроводности для пластин и стенки аккумулятора:

$$\rho_1 C_{p1} \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} \right) + qV_1, \quad (5)$$

$$\rho_3 C_{p3} \frac{\partial T_3}{\partial t} = \lambda_3 \left(\frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_3}{\partial y^2} \right) + qV_3, \quad (6)$$

$$\rho_4 C_{p4} \frac{\partial T_4}{\partial t} = \lambda_4 \left(\frac{\partial^2 T_4}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_4}{\partial y^2} \right), \quad (7)$$

где u , v – составляющие вектора скорости в проекции на оси x , y , соответственно, м/с; P – давление, Па; T – температура, °К; T_0 – температура электролита в начальный момент времени, °К; β – температурный коэффициент объемного расширения, К⁻¹; ρ – плотность, кг/м³; x , y – декартовы координаты, м; t – время, с; C_p – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); g – ускорение свободного падения, м/с²; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м·К; μ – динамическая вязкость, Па·с; V – объем, м³; индексы 1, 2, 3, 4 – соответствуют алюминию, электролиту, меди и поливинилхлориду (ПВХ).

Начальные условия для системы уравнений (1–7) заданы в виде:

$$u(x,y)=0; T_1(x,y)= T_2(x,y)= T_3(x,y)= T_4(x,y)=T_0; P(x,y)=P_0.$$

Граничные условия для уравнений (1–7) имеют вид:

$$x = 0, \quad 0 < y < y_1 \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = 0,$$

$$x = x_1, \quad 0 < y < y_1 \quad \begin{cases} T_1 = T_2 \\ \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \end{cases}, \quad \begin{cases} u_2 = 0 \\ v_2 = 0 \end{cases},$$

$$\begin{aligned}
 x = x_1 + x_2, \quad 0 < y < y_1 & \quad \left\{ \begin{array}{l} T_2 = T_3 \\ \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} = \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} \end{array} \right., \quad \left\{ \begin{array}{l} u_2 = 0 \\ v_2 = 0 \end{array} \right., \\
 x = x_1 + x_2 + x_3, \quad 0 < y < y_1 & \quad \left\{ \begin{array}{l} T_3 = T_4 \\ \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} = \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} \end{array} \right., \\
 x = x_1 + x_2 + x_3 + x_4, \quad 0 < y < y_1 & \quad \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} = \alpha(T_4 - T_{oc}),
 \end{aligned}$$

$$\begin{array}{l}
 y = 0, 0 < x < x_1 \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} = 0, \\
 y = 0, x_2 < x < x_3 \quad \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y} = 0, \\
 y = y_1, 0 < x < x_1 \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} = 0, \\
 y = y_1, x_2 < x < x_3 \quad \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y} = 0, \\
 y = 0, x_1 < x < x_2 \quad \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} = 0, \quad \left\{ \begin{array}{l} u_2 = 0 \\ v_2 = 0 \end{array} \right. \\
 y = 0, x_3 < x < x_4 \quad \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial y} = 0, \\
 y = y_1, x_1 < x < x_2 \quad \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} = 0, \quad \left\{ \begin{array}{l} u_2 = 0 \\ v_2 = 0 \end{array} \right. \\
 y = y_1, x_3 < x < x_4 \quad \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial y} = 0.
 \end{array}$$

Принята следующая схема исследуемого процесса теплопереноса в замкнутом двухфазном термосифоне. Теплота, выделяемая при работе аккумуляторной батареи, подводится к поверхности нижней крышки термосифона (рисунок 2). В результате температура хладагента увеличивается. Вблизи поверхности испарения давление паров растет, и под действием перепада P пар перемещается вверх и конденсируется на внутренней поверхности верхней крышки с выделением теплоты фазового перехода. Пленка конденсата стекает по вертикальным стенкам термосифона в зону испарения.

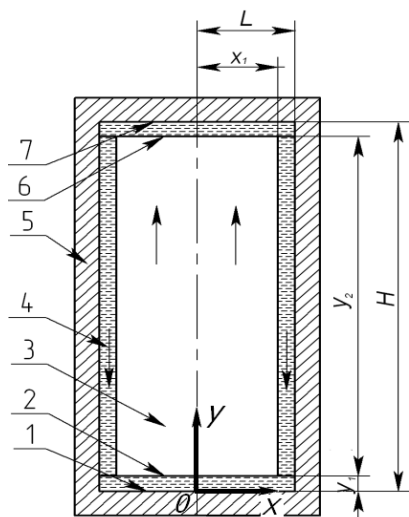


Рисунок 2 – Принципиальная схема термосифона.

1 – нижняя крышка; 2 – поверхность испарения; 3 – паровой канал; 4 – пленка жидкости; 5 – вертикальная стенка; 6 – зона конденсации; 7 – верхняя крышка

Решалась нестационарная задача, потому что во многих практически значимых случаях возможны нестационарные режимы работы термосифонов.

При постановке задачи пар рассматривался как идеальный сжимаемый газ.

Уравнение состояния сжимаемого идеального газа записывается в следующем виде:

$$\rho = \frac{P}{\frac{R}{M}T},$$

где P – давление в термосифоне, R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К), M – молярная масса, кг/моль, T – температура.

Уравнения неразрывности, движения и энергии для пара и жидкости в исследуемой системе имеют вид:

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_1 u_1)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_1 v_1)}{\partial y} = 0, \quad (8)$$

$$\frac{\partial \rho_2}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_2 u_2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_2 v_2)}{\partial y} = 0, \quad (9)$$

$$\frac{\partial \rho_1 u_1}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_1 u_1 u_1)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_1 v_1 u_1)}{\partial y} = \frac{\partial P_1}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_1 \frac{\partial u_1}{\partial y} \right), \quad (10)$$

$$\frac{\partial \rho_1 v_1}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_1 u_1 v_1)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_1 v_1 v_1)}{\partial y} = \rho_1 g_y - \frac{\partial P_1}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_1 \frac{\partial v_1}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_1 \frac{\partial v_1}{\partial y} \right), \quad (11)$$

$$\frac{\partial \rho_2 u_2}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_2 u_2 u_2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_2 v_2 u_2)}{\partial y} = \frac{\partial P_2}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_2 \frac{\partial u_2}{\partial y} \right), \quad (12)$$

$$\frac{\partial \rho_2 v_2}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_2 u_2 v_2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_2 v_2 v_2)}{\partial y} = \rho_2 g_y - \frac{\partial P_2}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_2 \frac{\partial v_2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_2 \frac{\partial v_2}{\partial y} \right), \quad (13)$$

$$\rho_1 C_{p1} \left(\frac{\partial T_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} + v_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} \right) = \lambda_1 \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} \right), \quad (14)$$

$$\rho_2 C_{p2} \left(\frac{\partial T_2}{\partial t} + u_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} + v_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} \right) = \lambda_2 \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} \right). \quad (15)$$

Начальные условия для системы уравнений при $t=0$ (8–15):

$$u(x,y)=0; T_1(x,y)=T_2(x,y)=T_0; P(x,y)=P_0.$$

Граничные условия для уравнений (8–15) имеют вид:

$$x = 0, \quad 0 < y < H \quad \frac{\partial T_2}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial u_2}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial v_2}{\partial x} = 0,$$

$$x = L, \quad 0 \leq y \leq H \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = 0, \quad u_1 = v_1 = 0,$$

$$x = x_1, \quad y_1 \leq y_1 + y_2, \quad \begin{cases} T_1 = T_2 \\ \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \end{cases}; \quad \begin{cases} u_1 = u_2 = 0 \\ v_1 = v_2 \end{cases},$$

$$y = y_1, \quad 0 \leq x \leq x_1, \quad \begin{cases} T_1 = T_2 \\ \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} - Q_e w_e - v_2 C_p \rho (T_2 - T_0) \end{cases}, \quad v_2 = \frac{w_e}{\rho_2}, \quad v_1 = -\frac{w_e}{\rho_1},$$

$$y = y_1 + y_2, \quad 0 \leq x \leq x_1, \quad \begin{cases} T_2 = T_1 \\ \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} = \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} + Q_c w_c + v_2 C_p \rho (T_1 - T_0) \end{cases}, \quad v_1 = \frac{w_c}{\rho_1}, \quad v_2 = 0,$$

$$y = 0, \quad 0 \leq x \leq L \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} = q_h, \quad u_1 = v_1 = 0,$$

$$y = H, \quad 0 \leq x \leq L \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} = \alpha(T_1 - T_{oc}), \quad u_1 = v_1 = 0.$$

Массовые скорости испарения и конденсации рассчитывались по формуле:

$$w = \beta \sqrt{\frac{M}{2\pi RT_H}} (P - P_H), \quad (16)$$

где P_H – давление насыщения; T_H – температура насыщения; R – универсальная газовая постоянная; M – молекулярная масса; β – коэффициент аккомодации.

Решение поставленных задач проведено с применением программного пакета ANSYS Fluent.

Решатель ANSYS Fluent использует метод конечных объемов. При этом:

1. Область течения разделяется на конечное множество контрольных объемов;
2. Уравнения в частных производных (неразрывности, движения и энергии) дискретизируются в систему алгебраических уравнений;
3. Проводится численное решение системы алгебраических уравнений в расчетной области заданных размеров.

С целью верификации математической модели и метода решения проведены тестовые расчеты и сравнение с экспериментальными данными (Jouhara H. Experimental investigation of small diameter two-phase closed thermosyphons charged with water, FC-84, FC-77 and FC-3283 // Applied Thermal Engineering. 2010. Vol. 30. P. 201–211).

В экспериментах использовался замкнутый двухфазный термосифон (полый цилиндр) со следующими геометрическими размерами: высота 200 мм, диаметр парового канала 12 мм. Подвод и отвод теплоты происходили на нижней и верхней частях вертикальной стенки ТС, соответственно. Тестовая задача решена в цилиндрической системе координат.

Установлено (рисунок 3), что результаты математического моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными. Следует отметить, что увеличение тепловой нагрузки приводит к незначительному росту несоответствия результатов вычислений и эксперимента.

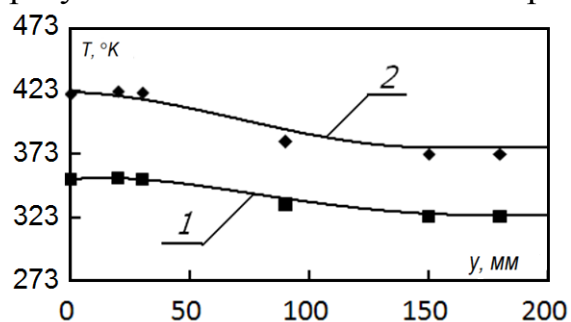


Рисунок 3 – Распределения температур по высоте термосифона: численное моделирование (1 – $3,3 \cdot 10^4$ Вт/м², 2 – $8,7 \cdot 10^4$ Вт/м²); экспериментальные данные ((■) – $3,3 \cdot 10^4$ Вт/м², (◆) – $8,7 \cdot 10^4$ Вт/м²)

В третьей главе представлены результаты численных исследований процессов теплопереноса в литий-ионных аккумуляторах и в замкнутых двухфазных термосифонах при высоких тепловых нагрузках на аккумуляторные батареи.

Проведено численное моделирование процессов теплопереноса при протекании постоянного тока через пластины аккумулятора (рисунок 1) с использованием пакетов программ ANSYS Thermal Electric и ANSYS Fluent. Получены распределения

температуры, полученные при следующих геометрических размерах области решения: высота пластин ($0 < y < y_1$) 195,5 мм, толщина каждого элемента (алюминиевой и медной пластин, слоя электролита) 0,5 мм, толщина стенки аккумулятора 5 мм.

Приняты следующие значения силы тока нагрузки на аккумуляторную батарею: $I_n=50$ А, $I_n=60$ А, $I_n=70$ А.

На рисунке 4 представлены зависимости средней температуры электролита от времени при умеренном ($\alpha=9$ Вт/м²·К) теплоотводе с поверхности корпуса. Видно, что при охлаждении аккумулятора на границе $x=x_1+x_2+x_3$, $0 < y < y_1$ температура электролита поднимается до постоянного значения за 6000 с. В рассматриваемом диапазоне токовой нагрузки (50-70 А) и коэффициенте теплоотдачи 9 Вт/(м²·К) средняя температура электролита в установившемся режиме выше предельно допустимой (333 °К) только при очень высокой токовой нагрузке 70 А и составляет 351 °К.

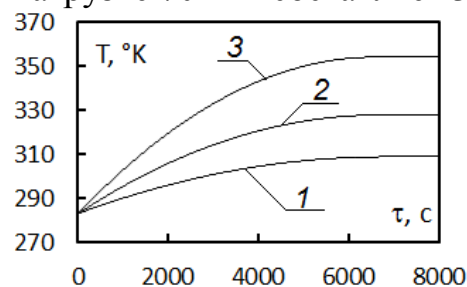


Рисунок 4 – Зависимость средней температуры сепаратора аккумулятора от времени при различной токовой нагрузке ($\alpha=9$ Вт/м²·К).

1 – $I_n=50$ А, 2 – $I_n=60$ А, 3 – $I_n=70$ А

При интенсификации теплоотдачи с поверхности стенки корпуса аккумулятора ($\alpha=15$ Вт/м²·К) в режиме естественной конвекции температура электролита не превышает регламентных значений (рисунок 5) даже при $I_n=70$ А. При этом температура исследуемого устройства поднимается до практически постоянного значения за (4000 с).

Результаты выполненных исследований показывают, что в условиях достаточно интенсивного тепловыделения в пластинах электродов, обусловленного высокими токовыми

нагрузками, можно обеспечить предельно допустимый по регламенту эксплуатации аккумуляторных батарей уровень температур электролита за счет теплоотвода с внешней поверхности корпуса. При этом необходима оптимизация режима термогравитационной конвекции при течении воздуха вблизи корпуса со скоростями, при которых возможно достижение величины коэффициента теплоотдачи с этих поверхностей 15 Вт/м²·К и более.

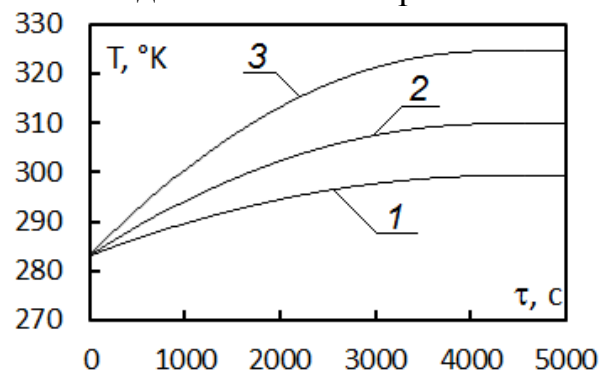


Рисунок 5 – Зависимость температуры сепаратора аккумулятора от времени при различной токовой нагрузке (при $\alpha=15$ Вт/м²·К).

1 – $I_n=50$ А, 2 – $I_n=60$ А, 3 – $I_n=70$ А

В практике использования энергонасыщенных аккумуляторных батарей летательных аппаратов создание сложных систем охлаждения, способных обеспечивать высокую интенсивность теплосъема (α более 15 Вт/м²·К), также практически невозможно по целому ряду технико-экономических условий.

В этой связи становится перспективной гипотеза о том, что термосифоны могут обеспечить достаточно интенсивное охлаждение

рассматриваемых энергонасыщенных технических устройств, в том числе и аккумуляторных батарей воздушных судов. Поэтому целью проведенных исследований при выполнении диссертации было обоснование возможности применения замкнутых двухфазных термосифонов в качестве основных элементов системы обеспечения теплового режима АБ высокого уровня энергорассеивания.

На основании анализа информации о достигаемых уровнях перегрева современных АБ в экстремальных (близких к аварийным) условиях работы рассмотрены следующие значения плотностей теплового потока (q_h) на нижней крышке термосифона: 201 Вт/м²; 336 Вт/м²; 529 Вт/м².

Результаты проведенных численных исследований (рисунок 6) показывают, что при изменении плотностей тепловых потоков, соответствующих критическим для типичных аккумуляторных батарей, наблюдается эффективный сток тепла (кривые 1-3) в результате протекания процесса интенсивного испарения.

Анализ приведенных на рисунке 6 распределений $T_n(\tau)$ дает основание для вывода о том, что выход на стационарный режим работы термосифона происходит даже при относительно малых тепловых нагрузках в течение 800-1000 секунд.

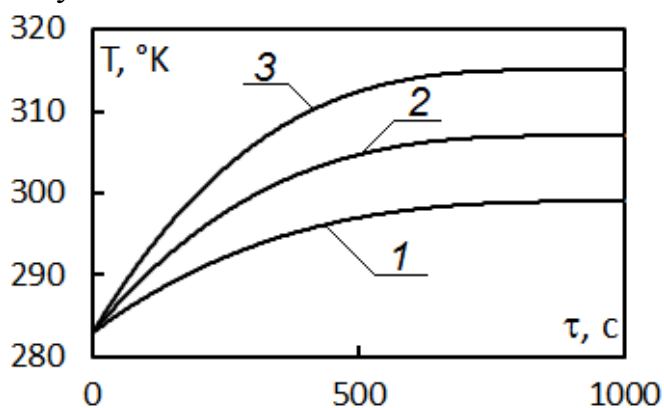


Рисунок 6 – Зависимости температуры поверхности нижней крышки термосифона от времени при различных плотностях теплового потока. 1 – 201 Вт/м²; 2 – 336 Вт/м²; 3 – 529 Вт/м²

Известно, что особенностью конструкции воздушных судов является ограниченность системы электроснабжения по габаритам и массе. По этой причине при проектировании систем обеспечения теплового режима энергонасыщенного оборудования целесообразно учитывать геометрические размеры. Задача численного анализа исследуемых процессов состояла в определении влияния продольного размера (200-

400 мм) замкнутого двухфазного термосифона на эффективность его работы.

Для оценки эффективности работы термосифонов используются разные характеристики. Одной из них является эффективная теплопроводность исследуемого устройства ($\lambda_{эф}$). Значение $\lambda_{эф}$ соответствует условиям теплопереноса через ТС в режиме теплопроводности, соответствующей по своей интенсивности реализуемому на практике. Образно говоря, паровой канал в таком приближении моделируется параллелепипедом (или цилиндром) из материала с очень высокой теплопроводностью.

На рисунке 7 представлены зависимости эффективной теплопроводности термосифона от его высоты при различных плотностях теплового потока на нижней крышке. Видно, что увеличение тепловой нагрузки приводит к росту $\lambda_{эф}$. Увеличение же высоты парового канала в диапазоне от 200 мм до 400 мм слабо

влияет на эффективную теплопроводность термосифона в рассматриваемых достаточно типичных условиях его работы.

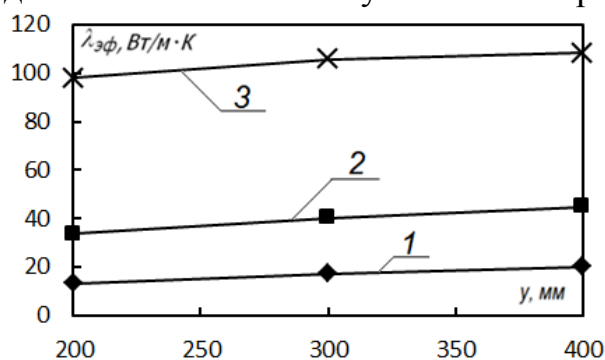


Рисунок 7 – Зависимости эффективной теплопроводности от высоты термосифона. 1 – $q_h=201$ Вт/м²; 2 – $q_h=336$ Вт/м²; 3 – $q_h=529$ Вт/м²

При рассмотрении системы обеспечения теплового режима аккумуляторных батарей на базе замкнутого двухфазного термосифона, актуальна задача, анализа влияния условий теплообмена на верхней крышке исследуемого устройства в режиме естественной конвекции на интенсивность теплопереноса.

Типичные распределения температур, полученные при моделировании, показывают, что при

$q_h=201$ Вт/м² (рисунок 8а) и коэффициенте теплоотдачи $\alpha=9$ Вт/м²·К (кривая 1) перепад T между нижней и верхней крышками термосифона составляет около 3 °К. При изменении α на верхней крышке от 12 Вт/м²·К (кривая 2) до 15 Вт/м²·К (кривая 3) перепад температур (ΔT) в исследуемой области (в паровом канале) больше, чем при $\alpha=9$ Вт/м²·К и составляет 4,6 °К и 6,2 °К, что обусловлено интенсивным отводом тепловой энергии на верхней крышке ТС. Температура же ее поверхности с ростом α снижается.

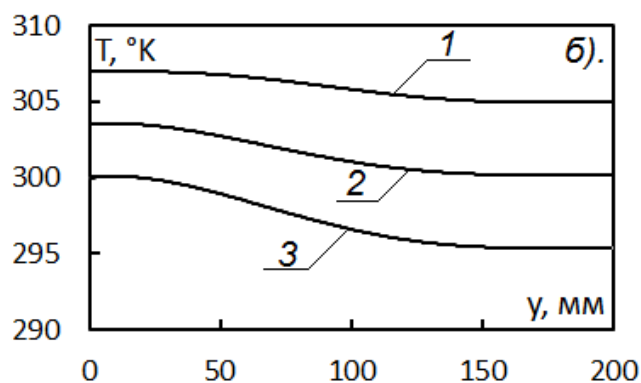
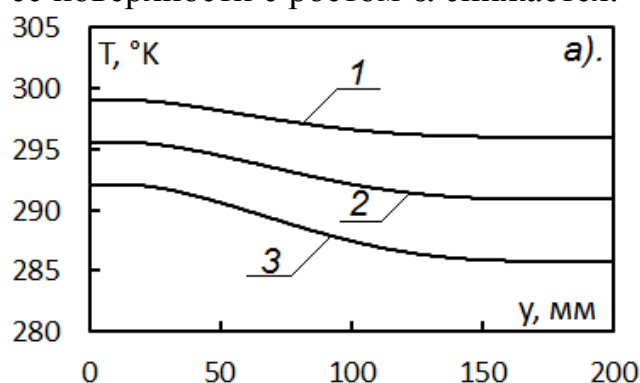


Рисунок 8 – Распределения температур по координате y на оси симметрии термосифона. а – $q_h=201$ Вт/м²; б – $q_h=336$ Вт/м². 1 – $\alpha=9$ Вт/м²·К; 2 – $\alpha=12$ Вт/м²·К; 3 – $\alpha=15$ Вт/м²·К

Рисунки 8а и 8б показывают, что увеличение плотности теплового потока в диапазоне от 201 Вт/м² до 336 Вт/м² приводит к снижению ΔT примерно на 1 °К. Так, при $q_h=336$ Вт/м² на нижней крышке исследуемого устройства (рисунок 8б) перепад температур по паровому каналу составляет 2 °К, 3,3 °К, 4,6 °К, соответственно коэффициентам теплоотдачи на верхней крышке (9 Вт/м²·К; 12 Вт/м²·К; 15 Вт/м²·К). При $q_h=529$ Вт/м² (рисунок 9) перепады T составляют 1 °К, 2 °К, 3 °К.

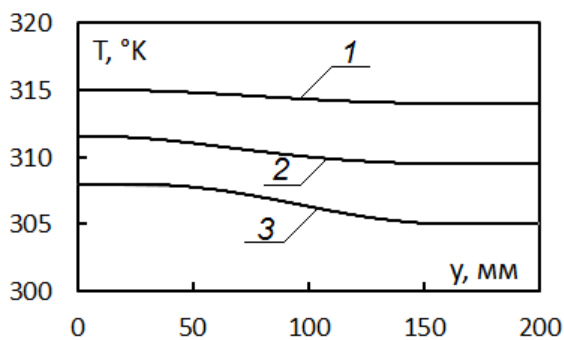


Рисунок 9 – Распределения температур по координате y на оси симметрии термосифона при $q_h=529 \text{ Вт/м}^2$.
1 – $\alpha=9 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$; 2 – $\alpha=12 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$; 3 – $\alpha=15 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$

энергонасыщенного авиационного оборудования.

В качестве рабочих жидкостей рассматривались вода, метанол, ацетон, фреон-113. На рисунке 10 показано, что при плотности теплового потока 201 Вт/м^2 самый малый ΔT между нижней и верхней крышками составляет около $3 \text{ }^\circ\text{К}$ (теплоноситель – вода) (кривая 1). Самая большая разность температур ($5,6 \text{ }^\circ\text{К}$) имеет место для фреона-113 (кривая 4).

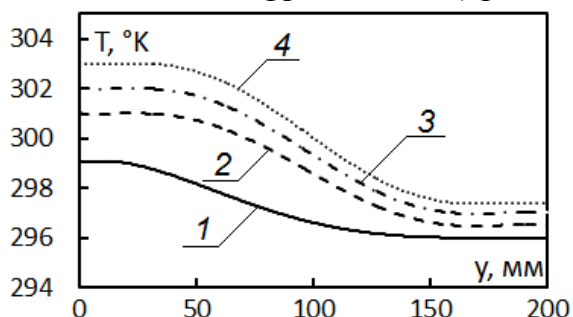


Рисунок 10 – Распределение температуры по оси симметрии в исследуемой области при $q_h=201 \text{ Вт/м}^2$. 1 – вода; 2 – метанол; 3 – ацетон; 4 – фреон-113

При увеличении плотности теплового потока к нижней крышке до 529 Вт/м^2 , (рисунки 11-12) температура в исследуемой области для всех хладагентов существенно увеличивается (на $16\text{--}17 \text{ }^\circ\text{К}$). Следует отметить, что данный вывод характерен для температур и нижней, и верхней крышек термосифона.

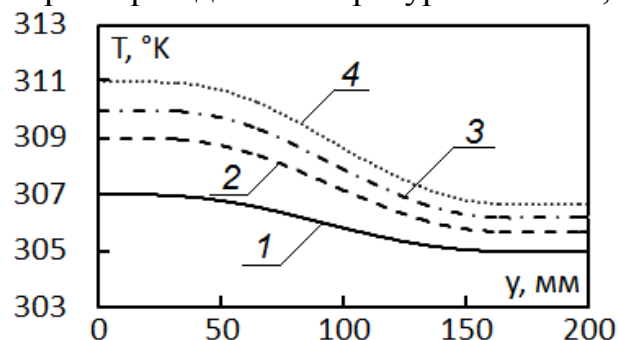


Рисунок 11 – Распределение температуры по оси симметрии парового канала при $q_h=336 \text{ Вт/м}^2$. 1 – вода; 2 – метанол; 3 – ацетон; 4 – фреон-113

В качестве рабочей жидкости (хладагента) в замкнутом двухфазном термосифоне могут использоваться различные жидкости. При этом в силу разных физических характеристик эффективность работы исследуемого теплообменного устройства может меняться. По этой причине проведен анализ влияния свойств рабочей жидкости на характеристики теплопередачи в термосифонах при тепловых нагрузках, соответствующих параметрам работы

Из анализа приведенных распределений T можно отметить, что наиболее эффективный сток тепла в результате протекания процесса интенсивного испарения (оценки проведены по температурам нижней крышки) происходит при использовании воды в качестве хладагента. Эффективность снижается в порядке убывания метанол, ацетон и фреон-113, соответственно.

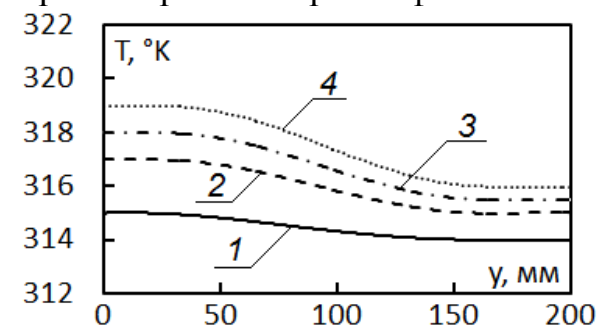


Рисунок 12 – Распределение температуры по оси симметрии парового канала при $q_h=529 \text{ Вт/м}^2$. 1 – вода; 2 – метанол; 3 – ацетон; 4 – фреон-113

Проведен численный анализ влияния толщины пленки жидкости на нижней крышке термосифона на интенсивность теплопередачи при работе с тепловыми нагрузками аккумуляторных батарей летательных аппаратов. Результаты проведенных численных исследований показывают (рисунок 13), что с ростом температуры начинается интенсивное испарение хладагента, сопровождающееся поглощением теплоты фазового перехода, и рост температуры нижней крышки термосифона замедляется. При этом в случае, когда толщина пленки жидкости не превышает 15 мм (кривые 1-3), наступает кризис теплоотдачи через 800-1500 с. Это вызвано тем, что при работе термосифона с начальной толщиной пленки жидкости до 15 мм конденсат не успевает возвращаться полностью на поверхность нижней крышки.

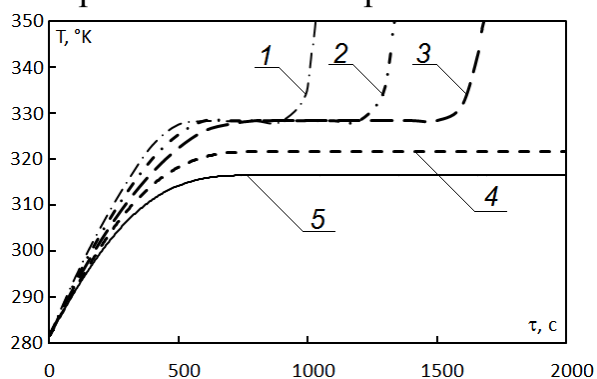


Рисунок 13 – Зависимость температуры нижней крышки от времени.

1 – $\delta=5$ мм; 2 – $\delta=10$ мм; 3 – $\delta=15$ мм, 4 – $\delta=20$ мм, 5 – $\delta=25$ мм

Выделены условия работы замкнутого двухфазного термосифона, обеспечивающие регламентные температурные распределения поверхности литий-ионных аккумуляторных батарей при высоких токовых нагрузках.

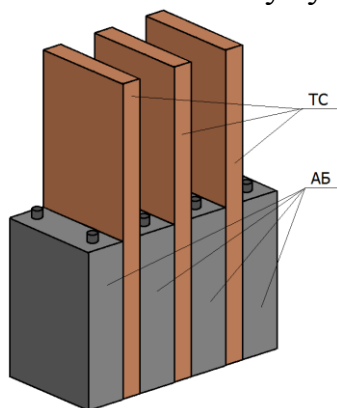


Рисунок 14 – Схема применения замкнутых двухфазных термосифонов как элементов системы обеспечения теплового режима аккумуляторных батарей воздушных судов

При толщине пленки жидкости на нижней крышке от 20 до 25 мм кризиса теплоотдачи не наступает (кривые 4, 5), и температура на этой границе остается в области рабочих температур аккумуляторных батарей летательных аппаратов.

В четвертой главе проведен анализ возможности применения термосифонов как основного элемента системы обеспечения теплового режима аккумуляторных батарей (рисунок 14).

Использовались математические модели (6)-(8) и (9)-(16) с соответствующими краевыми условиями.

Существенным отличием постановки задачи от ранее решаемых задач является условие на границе $x = L$, $0 \leq y \leq h_{исп}$, где $h_{исп}$ – высота зоны испарения на вертикальной стенке термосифона (рисунок 14), принимаемая равной высоте аккумуляторной батареи (200 мм)

$$x = L, 0 \leq y \leq h_{исп}; \quad \begin{cases} T_1 = T_4 \\ \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} \end{cases}$$

Массовые скорости испарения и конденсации рабочей жидкости в замкнутом двухфазном термосифоне рассчитывались по формуле (16).

Численный анализ выполнен на примере батареи LVP65. При номинальной токовой нагрузке (60 А) аккумуляторов LVP65 с сохранением работоспособности рассеиваемая плотность теплового потока составляет 336 Вт/м². Математическое моделирование

теплофизических процессов в замкнутом двухфазном термосифоне прямоугольной формы проведено при следующих толщинах пленки хладагента на нижней крышке: 20 мм, 40 мм, 60 мм. В качестве хладагента рассматривалась вода. Коэффициент теплоотдачи на верхней крышке принимался равным $9 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$.

На рисунке 15 показаны линии постоянных температур в замкнутом двухфазном термосифоне в зависимости от времени при плотности теплового потока 336 Вт/м^2 . Анализ изотерм показывает, что в начальный период времени ($\tau=100 \text{ с}$) ΔT по высоте парового канала в целом незначителен ($2 \text{ }^\circ\text{К}$). Это обусловлено низкой интенсивностью испарения.

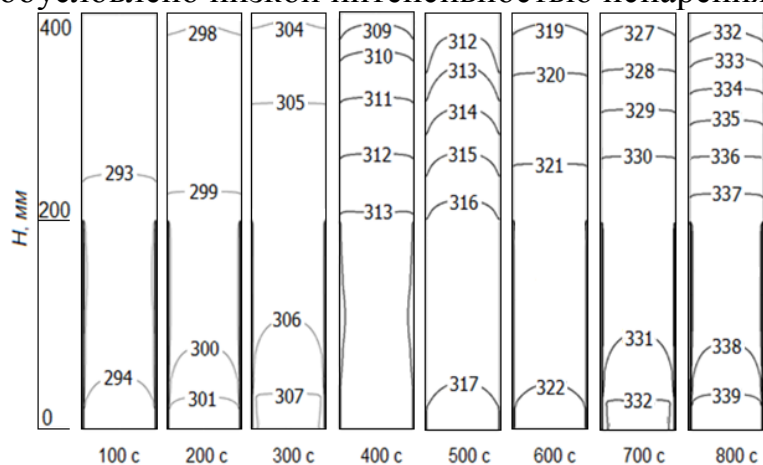


Рисунок 15 – Линии постоянных температур в термосифоне в зависимости от времени при плотности теплового потока 336 Вт/м^2 и толщине пленки жидкости на нижней крышке $\delta=20 \text{ мм}$

При $\tau=200 \text{ с}$ и $\tau=300 \text{ с}$ перепад температур несколько увеличивается по мере прогрева исследуемого устройства и составляет $4 \text{ }^\circ\text{К}$ и $6 \text{ }^\circ\text{К}$.

При $\tau=400 \text{ с}$ и $\tau=500 \text{ с}$ видно, что линии постоянных температур вытягиваются по продольной координате термосифона. Это объясняется увеличением скорости движения пара в паровом канале. Перепад температур

между зоной нагрева и верхней крышкой при этом максимален и составляет $9 \text{ }^\circ\text{К}$.

С ростом τ до 600 с видно, что ΔT снижается по мере увеличения температуры рабочей жидкости. Это обусловлено интенсификацией процесса парообразования и увеличением скорости пара. Далее, при $\tau=700 \text{ с}$ и $\tau=800 \text{ с}$ ΔT снова увеличивается и составляет $7 \text{ }^\circ\text{К}$ и $9 \text{ }^\circ\text{К}$, соответственно. При этом температура границы раздела поверхности аккумуляторной батареи и ТС превышает регламентные и составляет $345 \text{ }^\circ\text{К}$. Это объясняется тем, что при малой толщине слоя жидкости ($\delta=20 \text{ мм}$) теплоноситель испаряется полностью. В этом случае непрерывный процесс теплопередачи в паровом канале термосифона становится не эффективным из-за частичного осушения поверхности нагрева.

На рисунке 16 приведены распределения температур в исследуемом устройстве в зависимости от времени при толщине пленки жидкости 60 мм . Видно, что при $\tau=800$ перепад T значительно ниже, чем в рассматриваемых случаях при меньших δ . Так, при $\tau=700-800 \text{ с}$ ΔT изменяется в диапазоне от 4 до $3 \text{ }^\circ\text{К}$, соответственно. При этом температура поверхности аккумуляторной батареи с системой обеспечения теплового режима на базе термосифона составляет $330 \text{ }^\circ\text{К}$. Что говорит об эффективной работе замкнутого двухфазного термосифона в заданных условиях.

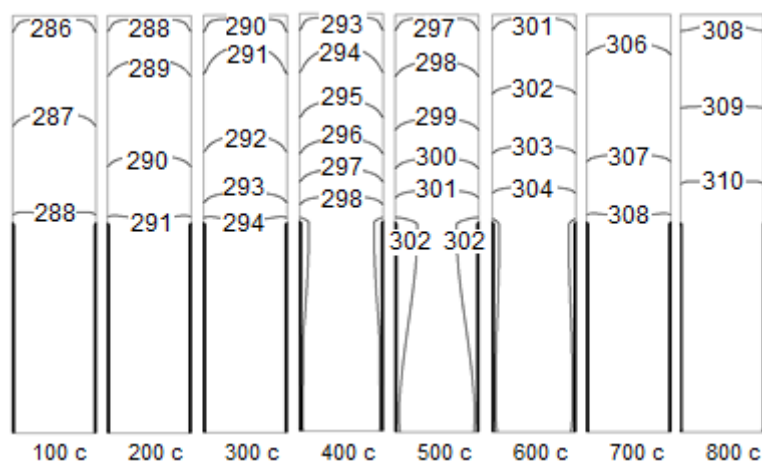


Рисунок 16 – Линии постоянных температур в термосифоне в зависимости от времени при плотности теплового потока 336 Вт/м^2 и толщине пленки жидкости на нижней крышке $\delta=60 \text{ мм}$

температур в исследуемой области при нерегламентных нагрузках. Приняты следующие варианты токов нагрузки: 50 А, 60 А, 70 А. В практике эксплуатации аккумуляторных батарей воздушных судов такие режимы работы возможны при совокупности нескольких факторов (например, ухудшение параметров электрической цепи и запуск вспомогательной силовой установки).

Установлено, что при плотности теплового потока в диапазоне от 201 Вт/м^2 до 529 Вт/м^2 (соответствует диапазону токовой нагрузки 50-70 А) температура поверхности корпуса аккумуляторной батареи поднимается практически до номинальной и составляет 322 °К (рисунок 17).

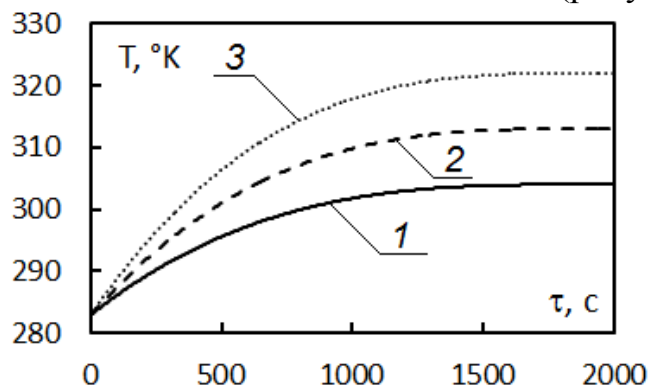


Рисунок 17 – Зависимость температуры поверхности аккумуляторной батареи от времени при различной плотности теплового потока. 1 – 201 Вт/м^2 ; 2 – 336 Вт/м^2 ; 3 – 529 Вт/м^2

коэффициента теплоотдачи на верхней крышке ТС: $9 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$; $12 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$; $15 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$. Плотности теплового потока на границе $x = L$, $0 \leq y \leq h_{ucn}$ (рисунок 2) составляли 201 Вт/м^2 , 336 Вт/м^2 , 529 Вт/м^2 и соответствовали токовым нагрузкам 50 А, 60 А, 70 А. Толщина пленки жидкости на нижней крышке 60 мм.

Установлено, что при $q_h=201 \text{ Вт/м}^2$ (рисунок 18) и коэффициенте теплоотдачи $9 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ (кривая 1) перепад T между нижней и верхней крышками исследуемого теплообменного устройства составляет около 4 °К . При интенсификации отвода тепловой энергии на верхней крышке термосифона в

В результате численных исследований получены температуры поверхности аккумуляторной батареи при использовании замкнутого двухфазного термосифона в качестве элемента обеспечения теплового режима

Для данного типа батарей (LVP65) критический ток нагрузки составляет $>50 \text{ А}$. Исходя из этого представляет интерес численное исследование распределений

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что для обеспечения регламентного теплового режима аккумуляторных батарей при критических токах нагрузки необходимы условия, обеспечивающие интенсификацию процесса теплопереноса в замкнутом двухфазном термосифоне.

Для исследования влияния условий теплообмена на температуру корпуса и электролита батареи рассмотрены следующие значения

диапазоне от $12 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ (кривая 2) до $15 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ (кривая 3) ΔT в термосифоне увеличивается и составляет $5,6 \text{ }^\circ\text{К}$ и $7,2 \text{ }^\circ\text{К}$.

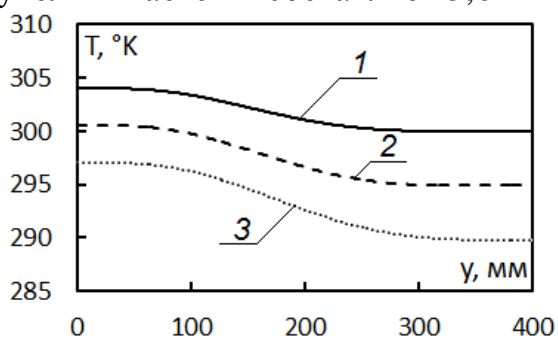


Рисунок 18 – Распределения температур по паровому каналу на оси симметрии термосифона. $q_h=201 \text{ Вт/м}^2$. 1 – $\alpha=9 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$; 2 – $\alpha=12 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$; 3 – $\alpha=15 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$

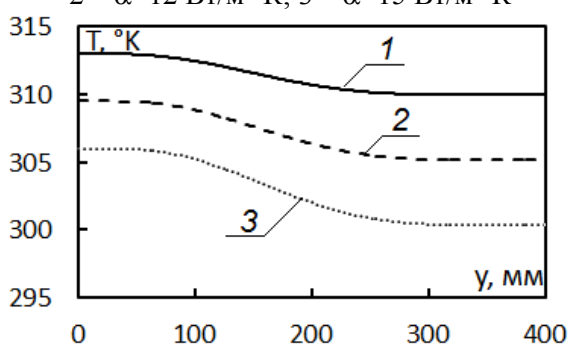


Рисунок 19 – Распределения температур по паровому каналу на оси симметрии термосифона. $q_h=336 \text{ Вт/м}^2$. 1 – $\alpha=9 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$; 2 – $\alpha=12 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$; 3 – $\alpha=15 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$

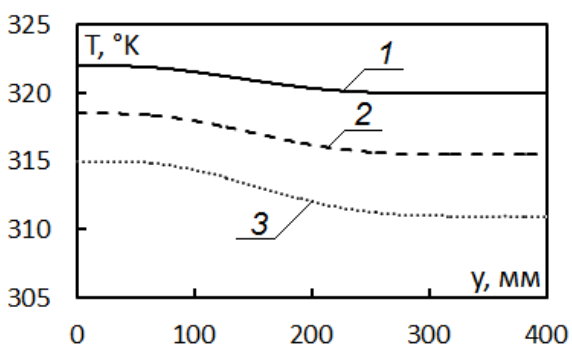


Рисунок 20 – Распределения температур по паровому каналу на оси симметрии термосифона при $q_h=529 \text{ Вт/м}^2$. 1 – $\alpha=9 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$; 2 – $\alpha=12 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$; 3 – $\alpha=15 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$

при токовой нагрузке выше номинальной ($> 60 \text{ А}$) можно использовать термосифон прямоугольного поперечного сечения с геометрическими размерами $400 \times 132 \times 30 \text{ мм}$, (соответствуют характерным размерам элементов аккумулятора) (рисунок 14).

2. Для уменьшения вероятности возникновения теплового разгона источников питания необходимы условия, обеспечивающие покрытие поверхности нагрева стекающей пленкой конденсата без осушения (толщина слоя

На рисунке 19 видно, что увеличение плотности теплового потока до $q_h=336 \text{ Вт/м}^2$ приводит к снижению ΔT примерно на $1 \text{ }^\circ\text{К}$. Так, при значении коэффициента теплоотдачи на верхней крышке $9 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ перепад температур составляет $3 \text{ }^\circ\text{К}$, а при $\alpha=12 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ и $15 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ – $4,3 \text{ }^\circ\text{К}$, $5,6 \text{ }^\circ\text{К}$, соответственно.

Анализ зависимостей на рисунке 20 показывает, что перепад температуры по высоте исследуемого устройства при $q_h=529 \text{ Вт/м}^2$ (соответствует критической токовой нагрузке аккумуляторной батареи LVP65 70 А), равен $2 \text{ }^\circ\text{К}$. Увеличение коэффициента теплоотдачи на верхней крышке термосифона приводит к увеличению ΔT . При $\alpha=12 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ перепад температур составляет $3 \text{ }^\circ\text{К}$ и при $\alpha=15 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ – $4 \text{ }^\circ\text{К}$. При этом температура поверхности аккумуляторной батареи не превышает критические значения при условии относительно интенсивного теплообмена на верхней крышке ТС.

Анализ и обобщение результатов выполненных исследований позволили сформулировать следующие рекомендации по применению замкнутых двухфазных термосифонов в качестве основного элемента системы обеспечения теплового режима литий-ионных аккумуляторных батарей воздушных судов:

1. Анализ конструкции типичной литий-ионной аккумуляторной батареи (LVP65) показал, что для максимального отвода выделяемого тепла ($201 - 529 \text{ Вт/м}^2$)

жидкости 60 мм). При этом условия снижается риск развития кризиса теплоотдачи в зоне испарения с последующим ростом температуры аккумулятора.

3. На основании выполненных численных исследований влияния свойств хладагента на характеристики теплопереноса в замкнутом двухфазном термосифоне можно рекомендовать использование в качестве рабочей жидкости воду.

4. В результате численного анализа установлено, что для поддержания регламентной температуры аккумуляторных батарей (60 °С) необходимо создание условий устойчивого теплоотвода с внешней поверхности зоны конденсации, соответствующие коэффициентам теплоотдачи 9 Вт/м²·К и более.

Основные результаты, выводы и защищаемые положения могут быть использованы не только при создании систем обеспечения теплового режима литий-ионных аккумуляторных батарей воздушных судов. Батареи такого типа являются перспективными источниками энергии для электромобилей, а также для хранилищ электрической энергии. Достаточно очевидно, что работа любых ЛИАБ может проходить в условиях перегрузок, также неизбежен их физический износ, приводящий к изменению многих характеристик таких батарей. В большинстве случаев влияние факторов перегрузки и старения должно приводить к дополнительному тепловыделению и росту температур всех элементов конструкции таких аккумуляторных батарей. Поэтому и в электромобилях, и в литий-ионных хранилищах электроэнергии целесообразно использование автономных систем обеспечения теплового режима, обеспечивающих отвод избыточной теплоты от поверхности корпуса ЛИАБ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Сформулирована математическая модель, разработан и проверен новый подход к обеспечению регламентного теплового режима энергоемких аккумуляторных батарей при высоких токовых (более 50 А) и, соответственно, тепловых нагрузках (более 200 Вт/м²) с использованием системы обеспечения теплового режима на основе замкнутых двухфазных термосифонов. Проведена проверка адекватности и работоспособности выбранного метода решения путем решения тестовых задач и сравнения с известными экспериментальными данными.

2. Впервые проведено численное моделирование теплопереноса в двухфазном термосифоне прямоугольного поперечного сечения и теплопереноса в литий-ионной аккумуляторной батарее при омическом нагреве с использованием программных пакетов ANSYS Fluent и ANSYS Thermal Electric с целью анализа процессов отвода теплоты при достаточно высоких токовых нагрузках (более 50 А). В результате численного исследования получены распределения температур (также линии тока и векторы скорости), отражающие влияние плотности теплового потока на тепловой режим системы «аккумуляторная батарея – термосифон» и обосновывающие эффективность

использования предложенного в диссертации нового подхода при тепловых потоках до 550 Вт/м^2 .

3. Проведено численное моделирование процесса теплопереноса при различных коэффициентах заполнения хладагентом замкнутого двухфазного термосифона, по результатам которого установлены распределения температур в исследуемой области и определены характерные температуры источника тепловыделения (аккумуляторной батареи). Выявлено, что при критической токовой нагрузке на аккумуляторную батарею 60 А и в диапазоне изменения толщины пленки жидкости на нижней крышке от 20 до 40 мм, наступает кризис теплоотдачи, температура поверхности аккумуляторной батареи поднимается выше предельно допустимой (333 °K). При увеличении толщины слоя хладагента на нижней крышке до 60 мм температура источника тепловыделения не поднимается выше регламентных (не превышает 310 °K).

4. Проведен численный анализ влияния свойств теплоносителя на распределения температур в замкнутом двухфазном термосифоне. Математическое моделирование выполнено в диапазоне критических тепловых потоков от 200 Вт/м^2 до 550 Вт/м^2 для аккумуляторных батарей и с хладагентами: вода; метанол; ацетон; фреон-113, температура кипения, которых соответствует допустимой для литий-ионных АБ. В результате параметрического анализа установлено, что во всем диапазоне плотности теплового потока на нижней крышке температура литий-ионной аккумуляторной батареи не превышает регламентных значений для этого типа батарей и находится в диапазоне от 299 °K до 319 °K .

5. По результатам численного моделирования влияния условий теплообмена на верхней крышке замкнутого двухфазного термосифона на тепловой режим литий-ионной аккумуляторной батареи установлено, что при интенсификации теплоотвода с внешней поверхности верхней крышки термосифона в диапазоне изменения коэффициентов теплоотдачи от $9 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{K}$ до $15 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{K}$ температура аккумуляторной батареи находится ниже критических даже при высоких токовых нагрузках (от 50 А до 70 А) и составляет от 308 °K до 315 °K .

6. Сформулированные в настоящей работе результаты и выводы могут быть использованы при определении условий, необходимых и достаточных для создания систем обеспечения теплового режима энергонасыщенных (при токах нагрузки до 70 А) аккумуляторных батарей различного назначения на базе замкнутых двухфазных термосифонов.

Основное содержание диссертации отражено в следующих публикациях:

Статьи в рецензируемых научных журналах, включенных в перечень изданий, рекомендуемых ВАК:

1. **Красношлыков, А.С.** Численный анализ температурных полей литий-ионного аккумулятора в условиях высоких токовых нагрузок / А.С. Красношлыков, Г.В. Кузнецов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики, – 2017. – Т. 19, № 11-12. – С. 126-134.

2. **Krasnoshlykov, A.S.** Numerical Investigation of the Influence of the Geometric Dimensions of a Thermosyphon on the Efficiency of Heat Transfer / A.S. Krasnoshlykov, G.V. Kuznetsov // *Chemical and Petroleum Engineering*, – 2017. – Vol. 53(7-8). – P. 435-440.
3. **Krasnoshlykov, A.S.** Mathematical modeling of thermal modes of thermosyphons in operation with characteristic heat loads of aircraft equipment batteries / A.S. Krasnoshlykov, G.V. Kuznetsov // *Russian Aeronautics*, – 2017. – Vol. 60 (2). – P. 251-256.

Статьи в научных изданиях, индексируемых Web of Science и / или Scopus:

4. **Krasnoshlykov, A.** Numerical analysis of influence of heat load on temperature of battery surface with cooling by a two-phase closed thermosyphon / A. Krasnoshlykov // *MATEC Web of Conferences*, – 2016. – Vol. 92. – Article number 01047.
5. **Krasnoshlykov, A.** Analysis of Influence of Heat Transfer Conditions on the Upper Cover to Heat Transfer in Thermosyphon / A.S. Krasnoshlykov // *MATEC Web of Conferences*, – 2016. – Vol. 72. – Article number 01052.
6. **Krasnoshlykov, A.S.** Mathematical modeling of thermal modes of closed two-phase thermosyphons with refrigerant R600a / A.S. Krasnoshlykov, Y.A. Zagromov // *EPJ Web of Conferences*, – 2016. – Vol. 110. – Article number 01051.
7. **Krasnoshlykov, A.S.** Numerical analysis of influence of thickness of liquid film on bottom cover to heat transfer in thermosyphon in conditions emergency modes of work the rechargeable batteries of aircrafts / A.S. Krasnoshlykov // *EPJ Web of Conferences*, – 2016. – Vol. 110. – Article number 01032.
8. **Krasnoshlykov, A.** Numerical investigation of heat transfer in thermosyphon under the emergency mode of operation of lithium-ion batteries of aircraft / A. Krasnoshlykov // *MATEC Web of Conferences*, – 2017. – C. 01007.
9. **Krasnoshlykov, A.** Analysis of influence of heat exchange conditions on the outer surface of the lithium-ion battery to electrolyte temperature under the conditions of high current loads / A. Krasnoshlykov // *MATEC Web of Conferences*, – 2017. – Vol. 110. – Article number 01045.

Публикации в прочих научных изданиях:

10. **Красношлыков, А.С.** Влияние высоты термосифона на характеристики теплопереноса / А.С. Красношлыков, Г.В. Кузнецов // В сборнике: Перспективы развития фундаментальных наук сборник научных трудов XIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 7 томах, – 2016. – С. 127-129.
11. **Красношлыков, А.С.** Исследование влияния свойств теплоносителей на интенсивность теплопереноса в замкнутых двухфазных термосифонах / А.С. Красношлыков // В сборнике: Интеллектуальные энергосистемы труды IV Международного молодёжного форума: в 3 томах. Томский политехнический университет, – 2016. – С. 13-16.

Подписано к печати 29.04.2019. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 1,22. Уч.-изд. л. 1,10.
Заказ 99-19. Тираж 100 экз.



Издательство

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ