

Горшкалев Алексей Александрович

МЕТОД ПРОЕКТНОГО РАСЧЁТА ТЕПЛОВОГО АККУМУЛЯТОРА
ДЛЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки
летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Самара – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» на кафедре теплотехники и тепловых двигателей.

Научный руководитель:

Бирюк Владимир Васильевич, доктор технических наук, профессор.

Официальные оппоненты:

Еникеев Рустэм Далилович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский университет науки и технологий», заведующий кафедрой двигателей внутреннего сгорания;

Шайкин Александр Петрович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тольяттинский государственный университет», ведущий научный сотрудник института машиностроения, химии и энергетики.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва.

Защита состоится 25 декабря 2025 г. в 12:00 на заседании диссертационного совета 24.2.379.10, созданном на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» и на сайте: https://ssau.ru/storage/pages/6832/file_68f221a1f00ef6.44671830.pdf.

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.379.10

Виноградов
Александр Сергеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

По статистике Федерального агентства воздушного транспорта РОСАВИАЦИЯ на 2024 год в России эксплуатируется около 5000 летательных аппаратов (ЛА) малой авиации. Многие из лёгких многоцелевых самолётов и лёгких вертолёт (Cessna 172, Piper PA-28, Ан-2, Robinson R44) оснащены поршневыми двигателями внутреннего сгорания (ДВС).

Использование беспилотной и малой авиации в развивающихся районах Крайнего Севера и Арктики, сопряжено с дополнительными затратами топлива на прогрев двигателей. Это связано с низкой среднегодовой температурой в вышеуказанных районах, которая достигает -10°C , а минимальная температура может достигать -67°C .

Процесс прогрева двигателя является негативным по многим параметрам. В частности, он сопровождается высоким уровнем шума и вибрации, требует определённого рабочего времени, в течение которого не производится полезная работа, затрачивается достаточно большое количество топлива, смазочных материалов, а также в атмосферу с отработавшими газами выбрасывается большое количество всевозможных токсичных и ядовитых компонентов и их соединений.

Чтобы избавиться от всех вышеприведенных негативных явлений, необходимо исключить либо минимизировать процесс прогрева двигателя. Поэтому актуальной задачей является снижение времени процесса прогрева за счёт температурной предпусковой подготовки двигателя.

На сегодняшний день широкое распространение приобрели следующие виды предпускового подогрева двигателей: применение электрических подогревателей; применение автономных (топливных) подогревателей, работающих на применяемом топливе; использование подогрева горячей газовой смеси.

В настоящее время для двигателей внутреннего сгорания начинают приобретать всё большее распространение тепловые аккумуляторы (ТА), предназначенные для сохранения тепловой энергии охлаждающей жидкости во время стоянки.

Степень разработанности темы.

Большое развитие и вклад в данном направлении были сделаны выдающимися советскими и российскими учёными: Кукисом В.С., Марковым В.А., Луканиным В.Н., Шатровым М.Г., Романовым В.А., Шульгиным В.В., Шапошниковым Ю.А., Федяниным В.Я., Фоминым В.М., Лукачёвым В.П., Лукачёвым С.В., Стукановым В.Р. Среди научных школ, как наиболее значимых в этой области, можно отметить МГУ имени М.В. Ломоносова, МГТУ им. Баумана, МАДИ, Московский авиационный институт и Самарский университет.

Цель работы: повышение эффективности процесса запуска двигателя внутреннего сгорания при низкой температуре окружающей среды с помощью метода проектного расчёта теплового аккумулятора, учитывающего нестационарность процессов теплообмена и фазовый переход теплоаккумулирующего вещества.

Для достижения поставленной цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Анализ существующих систем аккумуляирования энергии;
2. Анализ влияния теплового аккумулятора на двигатель внутреннего сгорания и обоснование повышения его эффективности;
3. Разработка и создание экспериментальной установки для исследования теплового аккумулятора;
4. Разработка способа оценки эффективности предпускового подогрева двигателя внутреннего сгорания летательного аппарата тепловым аккумулятором;
5. Разработка метода проектного расчёта теплового аккумулятора.

Научная новизна:

1. Разработана математическая модель теплового аккумулятора для двигателя внутреннего сгорания, отличающаяся учётом нестационарности процессов и фазового перехода теплоаккумулирующего вещества.

2. Впервые экспериментально установлены зависимости времени заряда, разряда и сохранения заданного уровня температуры теплового аккумулятора от температуры окружающей среды и массы теплоаккумулирующего вещества.

3. Разработан способ оценки эффективности предпускового подогрева двигателя внутреннего сгорания тепловым аккумулятором в зависимости от температурного диапазона его работы, отличающийся учётом калорических и экстенсивных параметров.

4. Разработан метод проектного расчёта теплового аккумулятора для двигателя внутреннего сгорания, отличающийся использованием экспериментально установленных зависимостей (времени заряда, разряда и сохранения заданного уровня температуры теплового аккумулятора от температуры окружающей среды и массы теплоаккумулирующего вещества) и применением способа оценки эффективности предпускового подогрева двигателя внутреннего сгорания тепловым аккумулятором.

Теоретическая значимость работы заключается в создании математической модели, описывающей рабочий процесс теплового аккумулятора с учётом нестационарности процессов и фазового перехода теплоаккумулирующего вещества

Практическая значимость результатов работы заключается в получении экспериментальных характеристик, позволяющих подтвердить применимость разработанной математической модели теплового аккумулятора.

Результаты исследования могут быть использованы при создании новых и модернизации существующих поршневых ДВС и комбинированных двигателей, предпусковых подогревателей и отопителей, при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, а также в учебном процессе.

Методы и средства исследований.

Работа выполнена на основе классических методов математического анализа, а также эмпирического метода, использованного в экспериментальной части.

Объект исследований. Термодинамические процессы, протекающие в тепловом аккумуляторе.

Предмет исследований. Тепловой аккумулятор.

Положения, выносимые на защиту:

- разработанная математическая модель теплового аккумулятора для двигателя внутреннего сгорания, отличающаяся учётом нестационарности процессов и фазового перехода теплоаккумулирующего вещества;
- экспериментально полученные зависимости времени заряда, разряда и сохранения заданного уровня температуры теплового аккумулятора от температуры окружающей среды и массы теплоаккумулирующего вещества;
- разработанный способ оценки эффективности предпускового подогрева двигателя внутреннего сгорания тепловым аккумулятором в зависимости от температурного диапазона его работы, с учётом калорических и экстенсивных параметров;
- разработанный метод проектного расчёта теплового аккумулятора, отличающийся использованием экспериментально установленных зависимостей (времени заряда, разряда и сохранения заданного уровня температуры теплового аккумулятора от температуры окружающей среды и массы теплоаккумулирующего вещества) и применением способа оценки эффективности предпускового подогрева двигателя внутреннего сгорания тепловым аккумулятором.

Достоверность результатов обеспечивается обоснованностью принятых допущений и упрощений в моделях рабочего процесса теплового аккумулятора; применением фундаментальных уравнений термодинамики и теплопередачи; приемлемым совпадением экспериментальных и расчётных данных, использованием в экспериментальном исследовании метрологически аттестованных и поверенных средств измерения.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях: 5th International Conference on Mechanical Engineering and Automation Science

(ICMEAS 2019), China, Wuhan, 2019; XI Всероссийская научно-техническая конференция «Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей», Самара, 2019; LXIX Молодёжная научная конференция, посвящённая 85-летию со дня рождения первого космонавта Земли Ю. А. Гагарина, Самара, 2019; Международная мультидисциплинарная конференция по промышленному инжинирингу и современным технологиям «FarEastCon», 2020, Владивосток; Международный научный форум Наука и инновации - современные концепции, Москва, 2020; Международная научно-техническая конференция «Проблемы и перспективы развития двигателестроения», Самара, 2021; Международная молодёжная научная конференция "XVI Королёвские чтения", посвящённая 60-летию полёта в космос Ю.А. Гагарина, Самара, 2021; Всероссийский научно-технический форум по двигателям и энергетическим установкам имени Н.Д. Кузнецова, посвящённый 110-летию ПАО «ОДК-КУЗНЕЦОВ», Самара, 2022; Международная научно-техническая конференция имени Н.Д. Кузнецова «Перспективы развития двигателестроения», Самара, 2023; 2023 10th International Conference on Power and Energy Systems Engineering, CPSE 2023, Япония, г. Нагоя, 2023; Всероссийский научно-технический форум двигателей и энергетических установок имени Н.Д. Кузнецова, Самара, 2024; Международная научно-техническая конференция имени Н.Д. Кузнецова «Перспективы развития двигателестроения», Самара, 2025.

Внедрение результатов работы.

Результаты диссертационной работы использованы при выполнении государственного задания по проекту №FSSS-2024-0015 (акт внедрения от 16.06.2025 г.), а также использовались производителем силовой техники ООО «КОРОНА» (г. Нижний Новгород) (акт внедрения от 20.06.2025 г.).

Соответствие паспорту специальности. Область исследования по содержанию, объекту и предмету соответствуют п. 1 в части «Теория и рабочий процесс тепловых и электроракетных двигателей летательных аппаратов, а также силовых и энергетических установок, их узлов и систем...»; п. 2 в части «Характеристики тепловых, электроракетных двигателей летательных аппаратов и их энергетических установок, отдельных узлов и систем ...»; п. 6 в части «Методы конструирования тепловых и электроракетных двигателей летательных аппаратов, их узлов и систем...» направлений исследований паспорта научной специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов (технические науки).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 16 работ, в том числе 1 монография, 3 статьи, опубликованные в периодических изданиях, рекомендованных ВАК России, 6 статей в изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 82 наименований. Текст изложен на 115 страницах, содержит 67 рисунков и 13 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель исследования и пути её достижения. Отмечена научная новизна, практическая значимость и достоверность выполненной работы, приведены результаты, выносимые на защиту автором. Представлена информация по апробации и публикации результатов.

Первая глава содержит сведения о выполненных ранее исследованиях. Проведён обзор развития тепловых аккумуляторов и их применения для повышения эффективности двигателей внутреннего сгорания. Определены задачи исследования и пути их достижения.

Из всех способов аккумуляции энергии, наиболее энергоёмким является тепловой. Тепловая аккумуляция энергии в энергосиловых установках может превосходить электрохимическую по удельной массе в 1,3 - 4 раза, а механическую – до 10 раз.

Перспективность аккумуляции энергии с использованием теплоты фазового перехода напрямую связана с повышением КПД поршневых ДВС и ростом удельных характеристик самих аккумуляторов. На расплавах солей, только за счёт их теплоёмкости и превышения температуры над рабочей, можно запастись порядка 350 кДж/кг. А за счёт теплоты фазового перехода можно запасти ещё до 400 кДж/кг.

Для аккумулирующей среды с использованием теплоты фазового перехода важны следующие свойства: высокие энтальпия фазового перехода и плотность; соответствующая условиям эксплуатации температура плавления; высокая теплопроводность и теплоёмкость в твёрдой и жидкой фазах; температурная стабильность; отсутствие возможности переохлаждения при затвердевании и перегрева при плавлении; низкое термическое расширение и незначительное изменение объёма при плавлении; слабая химическая активность и безопасность.

Для решения задачи облегчения пуска и сокращения времени прогрева силовой установки и её отдельных элементов посредством аккумулированного тепла можно регенерировать тепло из трёх систем ДВС, таких как система охлаждения, система смазки и система выпуска отработанных газов. Охлаждающую жидкость системы охлаждения и масло системы смазки можно использовать для заряда низкотемпературных тепловых аккумуляторов, а продукты сгорания топливно-воздушной смеси системы выпуска отработанных газов – для заряда высокотемпературных тепловых аккумуляторов.

При использовании теплового аккумулятора для предпускового подогрева двигателя внутреннего сгорания можно оценить эффективность данного процесса такими параметрами как сокращение расхода топлива на режиме прогрева и изменение времени прогрева ДВС.

Во второй главе представлена математическая модель теплового аккумулятора.

Математическая модель переходного процесса подразумевает собой определение изменения температуры теплоаккумулирующего вещества по времени. При этом зависимости для режима заряда и разряда будут различаться.

Уравнение теплового баланса математической модели заряда теплового аккумулятора рассматриваемого объёма, отнесённого к единице времени, имеет вид:

$$\begin{cases} Q_{\text{под}} = \int_{V_a} \rho_{a.т.} c_{a.т.} \frac{dt}{d\tau} dv + \int_{V_o} \rho_o c_o \frac{dt}{d\tau} dv + \int_{F_o} \lambda grad t df, & \text{при } t < t_{\text{плав}}, \\ Q_{\text{под}} = \rho_{a.ж.} r \frac{dv}{d\tau} + \int_{V_o} \rho_o c_o \frac{dt}{d\tau} dv + \int_{F_o} \lambda grad t df, & \text{при } t = t_{\text{плав}}, \\ Q_{\text{под}} = \int_{V_a} \rho_{a.ж.} c_{a.ж.} \frac{dt}{d\tau} dv + \int_{V_o} \rho_o c_o \frac{dt}{d\tau} dv + \int_{F_o} \lambda grad t df, & \text{при } t > t_{\text{плав}}, \end{cases}$$

где $Q_{\text{под}}$ – энергия, подводимая к теплому аккумулятору, $\int_{V_a} \rho_{a.т.} c_{a.т.} \frac{dt}{d\tau} dv$ – определяет рост энергетического потенциала теплового аккумулятора за счёт нагрева теплоаккумулирующего вещества в твердом состоянии, $\int_{V_a} \rho_{a.ж.} c_{a.ж.} \frac{dt}{d\tau} dv$ – определяет рост энергетического потенциала теплового аккумулятора за счёт нагрева теплоаккумулирующего вещества в жидком состоянии, $\rho_{a.ж.} r \frac{dv}{d\tau}$ – определяет рост энергетического потенциала теплового аккумулятора за счёт фазового перехода теплоаккумулирующего вещества, $\int_{V_o} \rho_o c_o \frac{dt}{d\tau} dv$ – выражает накопление энергии в оболочке теплового аккумулятора, $\int_{F_o} \lambda grad t df$ – определяет рассеивание энергии через внешнюю оболочку в окружающее пространство.

Введя значение средней температуры из соотношения $t_{cp}V = \int_V t_V dv$: было получено следующее выражение:

$$\begin{cases} Q_{\text{под}} = \rho_{a.t.} c_{a.t.} V_a \frac{dt_{a.cp}}{d\tau} + \rho_o c_o V_o \frac{dt_{o.cp}}{d\tau} - q_{\text{пот}}, & \text{при } t < t_{\text{плав}}, \\ Q_{\text{под}} = \rho_{a.ж.} r \frac{dv}{d\tau} + \rho_o c_o V_o \frac{dt_{o.cp}}{d\tau} - q_{\text{пот}}, & \text{при } t = t_{\text{плав}}, \\ Q_{\text{под}} = \rho_{a.ж.} c_{a.ж.} V_a \frac{dt_{a.cp}}{d\tau} + \rho_o c_o V_o \frac{dt_{o.cp}}{d\tau} - q_{\text{пот}}, & \text{при } t > t_{\text{плав}}. \end{cases}$$

При этом значения средней температуры теплоаккумулирующего вещества теплового аккумулятора $t_{a.cp}$ и средней температуры оболочки теплового аккумулятора $t_{o.cp}$ лежат в пределах значений температуры в центральной части $t_{a.1}$ и на периферии аккумулятора $t_{a.2}$, а теплоизолирующей оболочки – в пределах значений температуры на внутренней $t_{o.1}$ и внешней $t_{o.2}$ её поверхностях.

Для описания математической модели разряда теплового аккумулятора при условии неразрывности струи было записано следующее выражение:

$$dQ_w(\tau) = \frac{d}{d\tau} \left(G(i_2 - i_1) + G\left(\frac{w_2^2}{2} - \frac{w_1^2}{2}\right) \right)$$

или с учётом $i = c_p t$

$$dQ_w(\tau) = \frac{d}{d\tau} \left(G(c_{p2}t_2 - c_{p1}t_1) + G\left(\frac{w_2^2}{2} - \frac{w_1^2}{2}\right) \right).$$

Величина $dQ_w(\tau)$ определяет количество теплоты, отданной теплоаккумулятором проходящему газовому потоку с массовым расходом G в фиксированный момент времени τ , и определяется выражением:

$$\begin{cases} \frac{d}{d\tau} \left(\rho_{a.t.} c_{a.t.} V_a (t_{k.cp}^a - t_n) + \rho_o c_o V_o (t_{k.cp}^o - t_n) \right) - q_{\text{пот}} = \\ = \left(G(c_{p2}t_2 - c_{p1}t_1) + G\left(\frac{w_2^2}{2} - \frac{w_1^2}{2}\right) \right), & \text{при } t < t_{\text{плав}}, \\ \frac{d}{d\tau} \left(\rho_{a.t.} r V_a + \rho_o c_o V_o (t_{k.cp}^o - t_n) \right) - q_{\text{пот}} = \\ = \left(G(c_{p2}t_2 - c_{p1}t_1) + G\left(\frac{w_2^2}{2} - \frac{w_1^2}{2}\right) \right), & \text{при } t = t_{\text{плав}}, \\ \frac{d}{d\tau} \left(\rho_{a.ж.} c_{a.ж.} V_a (t_{k.cp}^a - t_n) + \rho_o c_o V_o (t_{k.cp}^o - t_n) \right) - q_{\text{пот}} = \\ = \left(G(c_{p2}t_2 - c_{p1}t_1) + G\left(\frac{w_2^2}{2} - \frac{w_1^2}{2}\right) \right), & \text{при } t > t_{\text{плав}}. \end{cases}$$

Для подтверждения достоверности разработанной математической модели были проведены экспериментальные исследования процессов заряда и разряда экспериментального образца теплового аккумулятора. Исследуемый образец теплового аккумулятора представлен на рисунке 1.

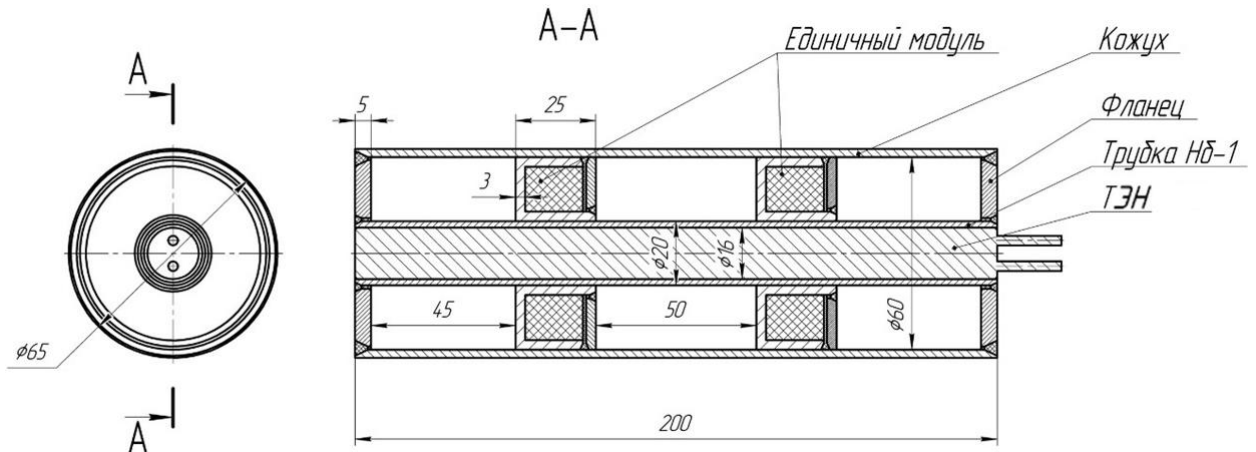


Рисунок 1 – Схема исследуемого образца теплового аккумулятора

В кожух встроены два единичных модуля тепловых аккумуляторов. Для имитации подвода тепла от выхлопных газов двигателя внутреннего сгорания внутри модулей располагается трубка из ниобия с трубчатым электронагревателем (ТЭН).

При моделировании процесса заряда принято, что на нагрев тел тратится энергия Q , которая определена из удельных характеристик трубчатого электронагревателя. Однако в рамках проводимого эксперимента важно выяснить не только температуру, до которой прогреется тепловой аккумулятор, но и время, за которое произойдет нагрев. Для этого было определено количество тепла, которое будет тратиться на нагрев элементов экспериментального образца:

$$Q = C_{\text{ТЭН}} \cdot \Delta t_{\text{ТЭН}} + c_{\text{внут.}} \cdot m_{\text{внут.}} \cdot \Delta t_{\text{внут.}} + c_{\text{ТАМ}} \cdot m_{\text{ТАМ}} \cdot \Delta t_{\text{ТАМ}} + c_{\text{внеш.}} \cdot m_{\text{внеш.}} \cdot \Delta t_{\text{внеш.}},$$

где $C_{\text{ТЭН}}$ – теплоёмкость трубчатого электронагревателя, $c_{\text{внут.}}$ – удельная теплоёмкость внутренней трубки, $c_{\text{ТАМ}}$ – удельная теплоёмкость теплоаккумулирующего материала, $c_{\text{внеш.}}$ – удельная теплоёмкость внешней трубки, $m_{\text{внут.}}$ – масса внутренней трубки, $m_{\text{ТАМ}}$ – масса теплоаккумулирующего вещества, $m_{\text{внеш.}}$ – масса внешней трубки, $\Delta t_{\text{ТЭН}}$ – изменение температуры трубчатого электронагревателя, $\Delta t_{\text{внут.}}$ – изменение температуры внутренней трубки, $\Delta t_{\text{ТАМ}}$ – изменение температуры теплоаккумулирующего материала, $\Delta t_{\text{внеш.}}$ – изменение температуры внешней трубки.

Для решения систем уравнений был составлен алгоритм решения в программе Python 3.8. Для выбора оптимального шага по времени было проведено исследование его влияния на результаты расчёта. Уменьшение временного шага расчёта менее 10 секунд не приводит к значительному изменению результата, поэтому расчёты проводились с данным выбранным шагом.

Также определены температура и время нагрева в зависимости от удельной мощности трубчатого электронагревателя (рисунок 2).

Необходимая температура (900°C) достигается при удельной мощности трубчатого электронагревателя равной 30 Вт/см^2 , поэтому для экспериментального образца выбран трубчатый электронагреватель диаметром 16 мм, длиной 200 мм с заданной удельной мощностью.

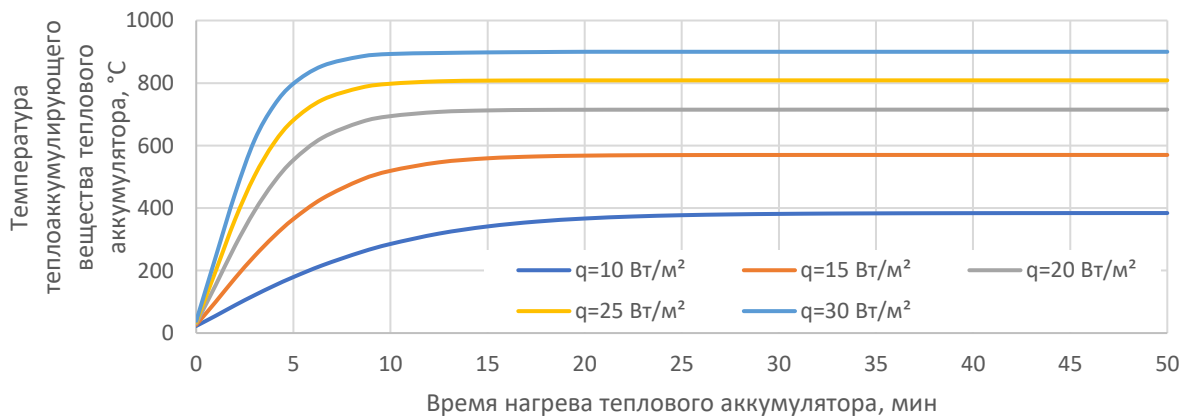


Рисунок 2 - Время нагрева теплового аккумулятора

в зависимости от удельной мощности трубчатого электронагревателя

Отличие математического моделирования процесса разряда заключается в том, что количество подводимого тепла $Q=0$, а вместо условий теплообмена для естественной конвекции используется теплоотдача при вынужденной конвекции:

$$\alpha = 0,021 \frac{\lambda_{\text{возд}}}{d_{\text{экв}}} \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^{0,43},$$

где $\lambda_{\text{возд}}$ – коэффициент теплопроводности воздуха, $d_{\text{экв}}$ – эквивалентный гидравлический диаметр, определяемый по величине внутреннего диаметра кожуха экспериментальной установки и внешнего диаметра кожуха экспериментального образца, Re – число Рейнольдса, Pr – число Прандтля.

В качестве начальной температуры была взята температура 900°C. Для определения времени охлаждения теплового аккумулятора в зависимости от условий теплообмена был произведён расчёт для различной скорости течения воздуха, обдувающего тепловой аккумулятор. Результаты расчёта приведены на рисунке 3.

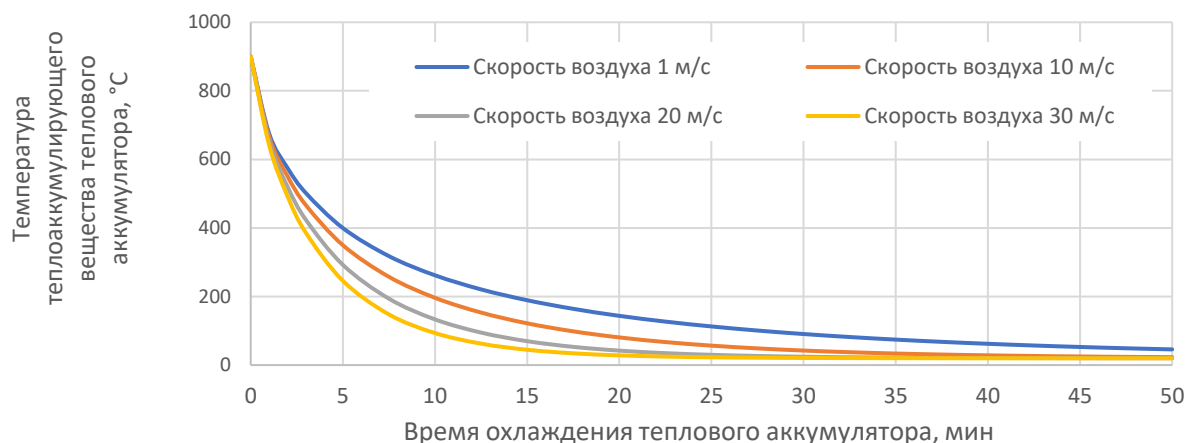


Рисунок 3 – Время охлаждения теплового аккумулятора в зависимости от условий теплообмена

Таким образом, была подготовлена расчётно-математическая модель процессов заряда и разряда экспериментального образца теплового аккумулятора с учётом теплообмена между элементами теплового аккумулятора, включая теплообмен теплопроводностью между нагревателем и материалом теплового аккумулятора, конвекцию между наружной поверхностью кожуха и окружающей средой, излучение между элементами теплового аккумулятора и окружающей средой. Учёт нестационарности и фазового перехода позволяет обеспечить точность определения рабочих параметров и выбор наиболее эффективного режима работы теплового аккумулятора.

В третьей главе представлены закономерности влияния температуры и оребрения поверхности теплового аккумулятора на его работу.

Численные исследования влияния геометрических параметров теплообменных поверхностей на эффективность процессов переноса теплоты осуществлялись в программном комплексе Ansys Fluent. В качестве расчётной модели был выбран макетный образец единичного модуля теплового аккумулятора (рисунок 1). Численное моделирование проводилось для температуры модулей от 600°C до 900°C. Было рассмотрено шесть вариантов оребрения при одинаковой толщине рёбер, равной 1 мм, с различными высотой рёбер (5, 10 и 15 мм) и количеством рёбер (36 и 60). Конфигурация исследуемых вариантов оребрения макетного образца представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры оребрения макетного образца

Вариант	Высота ребра, мм	Ширина ребра, мм	Количество рёбер, шт	Площадь теплообмена, м ²
Без оребрения	-	-	-	0,0408
1	5	1	36	0,1128
2	10	1	36	0,1848
3	15	1	36	0,2568
4	5	1	60	0,1608
5	10	1	60	0,2808
6	15	1	60	0,4008

Результаты численного моделирования для температуры модуля теплового аккумулятора равной 600°C представлены на рисунках 4 – 5. На рисунке 4 указана шкала температуры в диапазоне от 0°C до 600°C. На рисунке 5 указана шкала скорости потока воздуха в диапазоне от 0 м/с до 64,8 м/с.

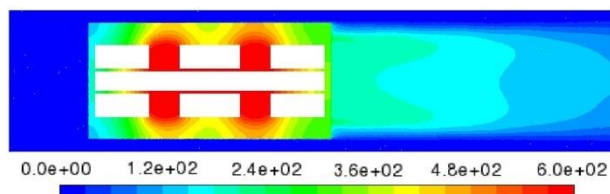


Рисунок 4 – Поле распределения температуры теплоносителя и единичных модулей теплового аккумулятора, °C

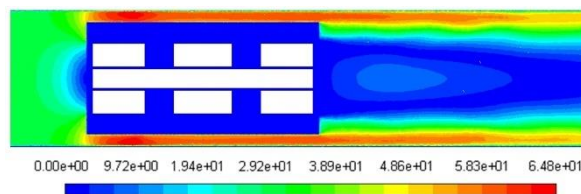


Рисунок 5 – Поле распределения скорости теплоносителя при обтекании единичных модулей теплового аккумулятора, м/с

По результатам численного моделирования были получены температура рабочего тела после прохождения единичных модулей теплового аккумулятора и коэффициент теплоотдачи единичных модулей теплового аккумулятора. Зависимости повышения температуры рабочего тела от температуры единичных модулей теплового аккумулятора для разных схем оребрения представлены на рисунке 6.

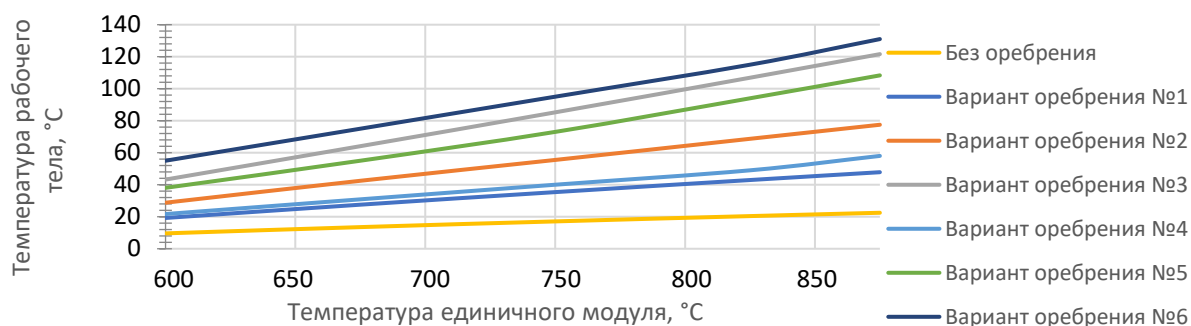


Рисунок 6 – Зависимости повышения температуры рабочего тела от температуры единичных модулей

По результатам численного моделирования наибольший нагрев рабочего тела происходит при варианте оребрения №6. Температура рабочего тела в зависимости от температуры единичных модулей и варианта схемы оребрения повышается от 9,6 до 130K.

В четвёртой главе приведены данные об экспериментальных исследованиях структуры и материала теплообменной поверхности теплового аккумулятора.

Накопление сведений о влиянии структуры и материала теплообменной поверхности теплового аккумулятора является важной задачей, так как на этой основе производится проектирование и изготовление изделия. Масса или объём теплоаккумулирующего вещества зависит от соответствующей плотности запасаемой энергии и КПД процесса аккумуляирования тепла.

Общий вид экспериментальной установки для исследования влияния структуры и материала теплообменной поверхности на характеристики модуля теплового аккумулятора представлен на рисунке 7.

Необходимым условием образования теплового потока является неравномерность распределения температуры в рассматриваемой среде. Для передачи тепла теплопроводностью необходимо обеспечение температурного градиента в различных точках тела. Поэтому в данной экспериментальной установке присутствуют такие элементы как нагреватель и холодильник.

Нагреватель 6 необходим для подвода тепла к исследуемому образцу 5. Регулировка мощности нагревателя обеспечивается автотрансформатором.

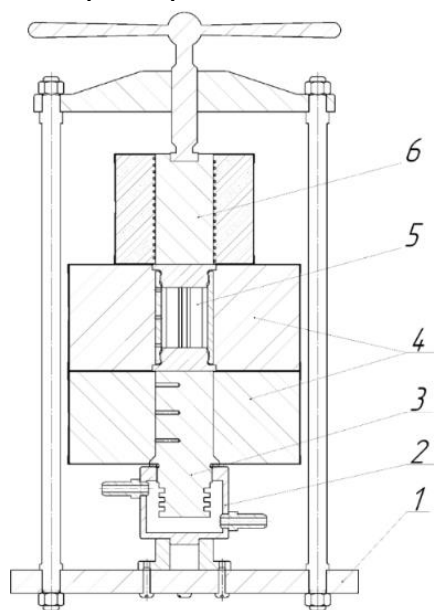
Через холодильник 2 с помощью штуцеров подключен контур охлаждения. Проточная вода, проходя через корпус холодильника 2, позволяет охлаждать нижний конец металлического стержня 3 для создания одномерного теплового потока вдоль оси стержневой системы.

Металлический стержень 3 сделан из стали 12Х18Н10Т. Стержень имеет радиальные проточки (оребрение) для увеличения площади теплообмена. Диаметр верхней части стержня составляет 50 мм. Нижняя часть стержня вкручивается в холодильник 2.

По всей высоте стержня равномерно расположены 3 хромель-копелевых термопары. Каждая термопара вставлена в отверстие перпендикулярно оси образца на глубину 20 мм. Расстояние между термопарами составляет 24 мм. Стержень имеет известное значение теплопроводности, что позволяет определить тепловой поток, проходящей через данную стержневую систему. Вокруг металлического стержня холодильника 3 и исследуемого образца 5 расположен теплоизоляционный материал 4, который минимизирует потери тепла в радиальном направлении.

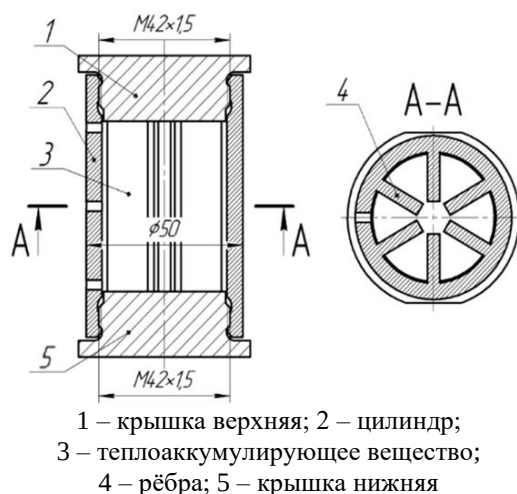
Образец для испытания №1 (рисунок 8) представляет собой цилиндр с внутренними теплоотводящими рёбрами 4. Рёбра необходимы для интенсификации процесса теплопередачи от теплообменной поверхности к теплоаккумулирующему веществу 3, которое находится внутри цилиндра. Количество рёбер у образца для испытания №1 составляет 6 штук. Рёбра имеют прямоугольное сечение размерами 15х4 мм. Образец изготовлен из ниобия. Крышка верхняя 1 и крышка нижняя 5 крепятся к цилиндру 2 с помощью резьбового соединения. Данное решение обусловлено технологическими ограничениями при изготовлении образца. Резьбовое соединение деталей позволяет разобрать модуль теплового аккумулятора.

Нагрев модуля для испытания осуществляется путём контакта крышки верхней 1 с нагревателем. Крышка верхняя контактирует с металлическим стержнем нагревателя. Для определения температуры в исследуемом образце предусмотрены отверстия, в которые установлены термопары. Расстояние между отверстиями для термопар составляет 24 мм.



- 1 – станина; 2 – холодильник;
3 – стержень охлаждения;
4 – теплоизоляционный материал;
5 – исследуемый образец; 6 – нагреватель

Рисунок 7 – Экспериментальная установка



- 1 – крышка верхняя; 2 – цилиндр;
3 – теплоаккумулирующее вещество;
4 – рёбра; 5 – крышка нижняя

Рисунок 8 – Собранный образец для испытания

Образец для испытания №2 представляет собой схожую конструкцию с предыдущим образцом. Отличие заключается в количестве рёбер теплообменной поверхности (четыре ребра) внутри цилиндра образца. Четыре ребра прямоугольного сечения размерами 15х4 мм выполнены заодно с корпусом цилиндра.

Методы определения теплопроводности многочисленны. Конструктивное разнообразие установок зависит от характера материала и уровня температуры, в пределах которых производится исследование. Все известные методы делятся на два вида: стационарные и нестационарные. Для нахождения коэффициента теплопроводности в

данном эксперименте применён стационарный метод продольного теплового потока. В данном эксперименте исследованы образцы из ниобия с разной структурой теплообменной поверхности: с четырьмя и с шестью рёбрами внутри цилиндра.

В качестве теплоаккумулирующего вещества использован фтористый литий (температура плавления 848°C). Для определения влияния структуры и материала теплообменной поверхности на эквивалентную теплопроводность теплового аккумулятора был проведён ряд экспериментов с разной мощностью нагревателя.

Эксперименты были проведены для различных структур теплообменной поверхности образца, выполненного из ниобия. В ходе экспериментов были получены значения температуры в исследуемых образцах и нижнем металлическом стержне. По полученным данным были рассчитаны коэффициенты теплопроводности модуля теплового аккумулятора из ниобия для двух конфигураций теплообменной поверхности («образец для испытания №1» и «образец для испытания №2») при разных мощностях нагрева. Значения теплопроводности модуля теплового аккумулятора представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Коэффициент теплопроводности модуля теплового аккумулятора из ниобия

Наименование образца	Мощность нагрева, Вт	Значения коэффициента теплопроводности λ , Вт/(м·град)
Образец для испытания №1	50	35
	100	38
Образец для испытания №2	50	28
	100	43

В пятой главе приведено описание метода проектного расчёта теплового аккумулятора и входящего в него способа оценки эффективности предпускового подогрева двигателя внутреннего сгорания летательного аппарата.

Способ оценки эффективности предпускового подогрева двигателя внутреннего сгорания летательного аппарата тепловым аккумулятором (учитывающий основные параметры, влияющие на рабочий процесс) в зависимости от температурного диапазона его работы включает в себя следующие пункты:

- расчёт расхода топлива при прогреве без предпускового подогрева двигателя внутреннего сгорания от теплового аккумулятора;
- расчёт времени прогрева без предпускового подогрева двигателя внутреннего сгорания от теплового аккумулятора;
- расчёт расхода топлива при прогреве после предпускового подогрева двигателя внутреннего сгорания от теплового аккумулятора;
- расчёт времени предпускового подогрева двигателя внутреннего сгорания от теплового аккумулятора;
- определение времени прогрева двигателя внутреннего сгорания при предпусковом подогреве от теплового аккумулятора;
- определение изменения расхода топлива при предпусковом подогреве двигателя внутреннего сгорания от теплового аккумулятора.

Использование способа оценки эффективности теплового аккумулятора позволяет определить суммарный эффект его применения, включая экономию топлива, сокращение времени предполётной подготовки летательного аппарата и обеспечение необходимых рабочих характеристик ДВС.

Метод проектного расчёта теплового аккумулятора для двигателей внутреннего сгорания летательных аппаратов, алгоритм которого представлен на рисунке 9, включает в себя его математическую модель, учитывающую нестационарность процессов и фазовый переход теплоаккумулирующего вещества, и способ оценки эффективности предпускового подогрева тепловым аккумулятором в зависимости от температурного диапазона работы.



Рисунок 9 – Алгоритм метода проектного расчёта теплового аккумулятора

Для верификации метода проектного расчёта теплового аккумулятора (рисунок 9) был разработан и изготовлен низкотемпературный тепловой аккумулятор и проведены экспериментальные исследования режимов заряда и разряда теплового аккумулятора.

Экспериментальные исследования проводились на моторном стенде кафедры теплотехники и тепловых двигателей Самарского университета. Фотография стенда представлена на рисунке 10. Экспериментальные зависимости времени заряда и времени разряда для двух вариантов массы теплоаккумулирующего вещества представлены на рисунках 11 и 12.



Рисунок 10 – Моторный стенд с тепловым аккумулятором

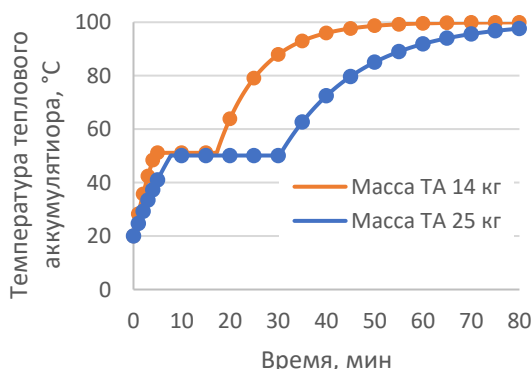


Рисунок 11 - Экспериментальные зависимости времени заряда

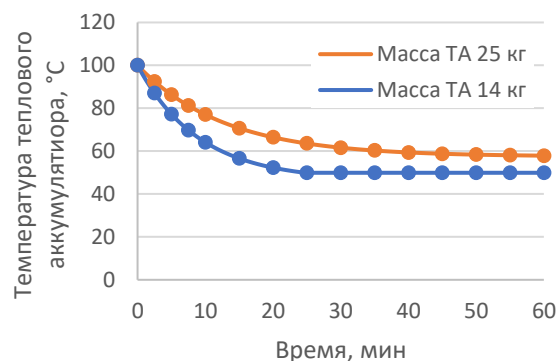


Рисунок 12 - Экспериментальные зависимости времени разряда

Время сохранения заданного уровня температуры, в зависимости от температуры окружающей среды и массы теплоаккумулирующего вещества, подразумевает сохранение температуры в диапазоне от 50°C до 100°C. В связи с наличием фазового перехода у теплоаккумулирующего вещества необходимо рассматривать не только его температуру, но и количество запасенной энергии. Для оценки оставшегося запаса тепловой энергии в тепловом аккумуляторе представлены зависимости снижения его энергии до 50% от накопленной в зависимости от времени для различных условий окружающей среды и массы теплового аккумулятора. Были проведены расчёты для диапазона массы от 5 до 50 кг, примеры зависимости запасённой энергии теплового аккумулятора от времени хранения при массе теплоаккумулирующего вещества равной 30 кг представлены на рисунке 13.

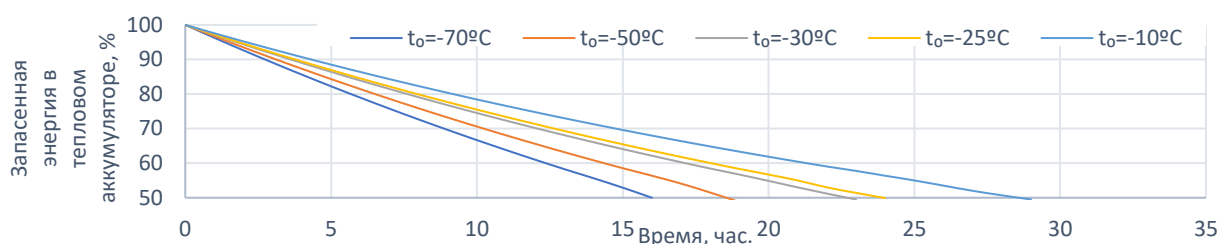


Рисунок 13 – Расчетные зависимости запасенной энергии теплового аккумулятора от времени хранения при массе теплоаккумулирующего вещества равной 30 кг

Были определены зависимости рекомендуемой удельной массы теплового аккумулятора от температуры окружающей среды при различной заданной температуре прогрева двигателя внутреннего сгорания (рисунок 14). Также получена зависимость температуры двигателя внутреннего сгорания при прогреве тепловым аккумулятором от температуры окружающей среды для различных вариантов удельной массы теплового аккумулятора (рисунок 15).

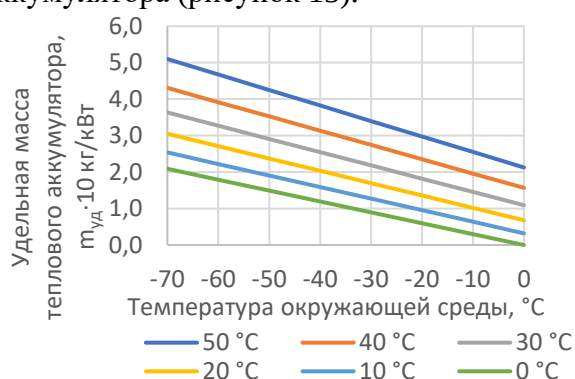


Рисунок 14 – Зависимость удельной массы теплового аккумулятора от температуры окружающей среды

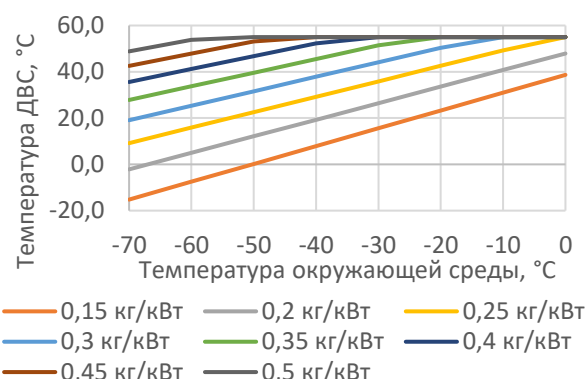


Рисунок 15 – Зависимость температуры двигателя внутреннего сгорания при прогреве от теплового аккумулятора от температуры окружающей среды

По результатам, представленным на рисунках 14 и 15, был определен рекомендуемый диапазон удельной массы теплового аккумулятора для двигателей внутреннего сгорания летательных аппаратов для районов Крайнего Севера и Арктики равный 0,15-0,3 кг теплоаккумулирующего вещества для 1 кВт мощности ДВС.

В результате определения эффективности предпускового подогрева двигателя внутреннего сгорания от теплового аккумулятора для рассматриваемой энергетической установки при температуре окружающей среды равной -25°C , было получено сокращение времени прогрева двигателя на 16,1% и сокращение расхода топлива на режиме прогрева на 65,6%. Согласно руководству по летной эксплуатации двигателей не допускается его запуск без предварительного подогрева при температуре окружающей среды -25°C . Таким образом при температуре окружающей среды от -70°C до -25°C запуск двигателя внутреннего сгорания возможен только при предварительном подогреве двигателя от теплового аккумулятора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования решена актуальная научно-техническая задача повышения эффективности запуска двигателя внутреннего сгорания летательного аппарата при низкой температуре окружающей среды.

1. Разработана математическая модель теплового аккумулятора для двигателя внутреннего сгорания, учитывающая нестационарность процессов и фазовый переход теплоаккумулирующего вещества. Учет нестационарности и фазового перехода позволяет обеспечить точность определения рабочих параметров. Согласно разработанной математической модели, требуемая масса теплоаккумулирующего вещества для рассматриваемого двигателя составляет 18,48 кг. Если рассматривать тепловой

аккумулятор без учёта фазового перехода, то масса составит 38,45 кг, разница составляет 51,9%. Если рассматривать тепловой аккумулятор без учёта изменения теплоёмкости в зависимости от температуры, то масса составит 17,35 кг, разница составляет 6,5%.

2. Проведённые экспериментальные исследования позволили получить эмпирические зависимости параметров теплового аккумулятора: время заряда, разряда и сохранения заданного уровня температуры теплового аккумулятора в зависимости от температуры окружающей среды и массы теплоаккумулирующего вещества. При массе теплоаккумулирующего вещества от 5 до 50 кг потеря половины запасённой энергии теплового аккумулятора при температуре окружающего воздуха от -70°C до -25°C будет происходить за период времени от 7,5 до 37 часов.

3. Разработан способ оценки эффективности предпускового подогрева двигателя внутреннего сгорания летательного аппарата от теплового аккумулятора в зависимости от температурного диапазона его работы, отличающийся учётом калорических и экстенсивных параметров, таких как удельная теплоёмкость и масса элементов и технических жидкостей двигателя внутреннего сгорания. Использование способа оценки эффективности теплового аккумулятора позволяет определить суммарный эффект его применения, включая экономию топлива, сокращение времени предполётной подготовки летательного аппарата и обеспечение необходимых рабочих характеристик двигателя внутреннего сгорания. Результаты экспериментального исследования на моторном стенде кафедры теплотехники и тепловых двигателей Самарского университета показали сокращение времени прогрева двигателя внутреннего сгорания и расхода топлива на режиме прогрева на 16,1% и 65,2% соответственно.

4. Разработан метод проектного расчёта теплового аккумулятора для двигателя внутреннего сгорания летательного аппарата, применение которого позволит сократить время прогрева двигателя до 33%, а расход топлива на режиме прогрева до 75% и обеспечить условия его запуска при температуре от -70°C до -25°C . Определён рекомендуемый диапазон удельной массы теплового аккумулятора для двигателей внутреннего сгорания летательных аппаратов равный 0,15-0,3 кг теплоаккумулирующего вещества для 1 кВт номинальной мощности двигателя внутреннего сгорания.

Дальнейшее проведение исследований связано с усовершенствованием массогабаритных параметров тепловых аккумуляторов с целью их применения в составе беспилотных летательных аппаратов.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Горшкалев А.А. Разработка методики расчёта рабочего процесса и мощностных характеристик малоразмерного двухтактного двигателя внутреннего сгорания / Горшкалев А.А., Бирюк В.В., Захаров М.О., Ларин В.Л. // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. — 2021. — Т. 20. № 3. — С. 97-109

2. Горшкалев А.А. Разработка и апробация методики моделирования рабочих процессов в двигатели внутреннего сгорания / Горшкалев А.А., Курчаткин И.В., Цапкова А.Б. // Международный научно-исследовательский журнал. — 2016. — № 6 (48). Ч. 2. — С. 81-84

3. Горшкалев А.А. Использование Ansys Fluent для исследования газодинамических и тепловых процессов в малоразмерном двухтактном ДВС / Горшкалев А.А., Лукачев С.В., Бирюк В.В. // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. — 2014. — № 12. — С. 416-425

Монография

4. Авиационные двигатели внутреннего сгорания: монография / М.Ю. Орлов, А.А. Горшкалев, С.С. Корнеев, В.В. Урлапкин. — Самара: Издательство Самарского университета, 2023. — 236 с

Статьи в изданиях, индексируемых базами данных Scopus, Web of Science

5. Kedam N., Uglanov D.A., Blagin E.V., Gorshkalev A.A.. Unified ANN model for heat transfer factor (j) and friction factor (f) prediction in offset strip and wavy fin PFHEs // CASE STUDIES IN THERMAL ENGINEERING 2024. — Vol. 53.
6. Kedam N., Uglanov D.A., Blagin E.V., Gorshkalev A.A.. Heat transfer factor j and friction factor f correlations for offset strip fin and wavy fin of compact plate-fin heat-exchangers // CASE STUDIES IN THERMAL ENGINEERING 2021. — Vol. 28.
7. Buryuk V.V., Kayukov S.S., Gorshkalev A.A., Belousov A.V., Gallyamov R.E., Zvyagintsev V.A. Modelling the High-speed Injector for Diesel ICE // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2018. — Vol. 302. Issue 1.
8. Anisimov M.Yu., Kayukov S.S., Gorshkalev A.A., Belousov A.V., Gallyamov R.E., Lysenko Yu.D. Developing the Model of Fuel Injection Process Efficiency Analysis for Injector for Diesel Engines // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2018. — Vol. 302. Issue 1.
9. Kurchatkin I.V., Gorshkalev A.A., Blagin E.V. Methods of the working processes modelling of an internal combustion engine by an ANSYS IC Engine module // Journal of Physics: Conference Series. — 2017. — Vol. 803. Issue 1.
10. Gorshkalev A.A., Kayukov S.S., Korneev S.S., Urlapkin V.V. Modeling a VR-type piston engine as the power plant // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2017. — Vol. 177. Issue 1.

Патент

11. Двигатель внутреннего сгорания с регенерацией тепла в цикле / Горшкалев А.А., Довгялло А.И., Угланов Д.А., Шиманова А.Б., Шиманов А.А. Шестакова Д.А. // Патент № 2823010, опубл. 17.07.2024

Другие издания

12. Горшкалев А.А. Применение тепловых аккумуляторов в авиационных двигателях внутреннего сгорания / Горшкалев А.А., Бирюк В.В. // Перспективы развития двигателестроения: материалы международной научно-технической конференции имени Н.Д. Кузнецова — 2025. — С. 714-715
13. Горшкалев А.А. Разработка программного комплекса для расчёта процессов теплопередачи в тепловых аккумуляторах для двигателей внутреннего сгорания / Горшкалев А.А., Базанов С.В., Благин Е.В. // Перспективы развития двигателестроения: материалы международной научно-технической конференции имени Н.Д. Кузнецова — 2025. — С. 779-780
14. Горшкалев А.А. Методика расчёта рабочего процесса и мощностных характеристик четырехтактного двигателя внутреннего сгорания / Горшкалев А.А., Кorneев С.С., Урлапкин В.В., Шиманов А.А. // Всероссийский научно-технический форум по двигателям и энергетическим установкам имени Н.Д. Кузнецова. — 2024. — С. 200-201
15. Горшкалев А.А. Цифровой подход к проектированию двигателей внутреннего сгорания для беспилотных летательных аппаратов / Горшкалев А.А., Бирюк В.В., Кузнецов В.В., Урлапкин В.В., Леонович Г.И. // Международная научно-техническая конференция имени Н.Д. Кузнецова «Перспективы развития двигателестроения». — 2023. — Т. 2. — С. 277-279
16. Горшкалев А.А. Разработка методики проведения ускоренных ресурсных испытаний тепловых аккумуляторов / Горшкалев А.А., Кorneев С.С., Урлапкин В.В. // Всероссийский научно-технический форум по двигателям и энергетическим установкам имени Н.Д. Кузнецова, посвященный 110-летию ПАО "ОДК-Кузнецов". — 2022. — С.50-51.