Министерство науки и высшего образования Российской Федерации ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА» (САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

На правах рукописи

ГОРШКАЛЕВ АЛЕКСЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

МЕТОД ПРОЕКТНОГО РАСЧЁТА ТЕПЛОВОГО АККУМУЛЯТОРА ДЛЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: Бирюк Владимир Васильевич, доктор технических наук, профессор

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ4
1 Современные системы преобразования и аккумулирования тепловой
энергии
1.1 Тепловые аккумуляторы и технологии аккумулирования энергии
1.2 Обзор установок аккумулирования энергии16
1.3 Применение тепловых аккумуляторов в тепловых двигателях 30
2 Математическая модель теплового аккумулятора
2.1 Математическая модель заряда теплового аккумулятора 35
2.2 Математическая модель разряда теплового аккумулятора 37
2.3 Корректировка математических моделей переходных процессов в
модуле теплового аккумулятора48
3 Численные исследования влияния геометрических параметров
теплообменных поверхностей на работу теплового аккумулятора56
3.1 Подготовка модели
3.2 Численное моделирование
3.3 Анализ полученных результатов
4 Экспериментальных исследованиях теплового аккумулятора 65
4.1 Описание экспериментальной установки и образцов для
испытания65
4.2 Описание эксперимента и методики расчета71
4.3 Экспериментальные данные и результаты расчета72
5 Метод проектного расчёта теплового аккумуляторадля предпускового
подогрева ДВС ЛА75

5.1 Способ оценки эффективности предпускового подогрева
тепловым аккумулятором75
5.2 Метод проектного расчёта теплового аккумулятора75
5.3 Экспериментальные исследования теплового аккумулятора на
моторном стенде76
Заключение
Список литературы
Приложение А Результаты численного моделирования макетных
образцов единичных модулей

ВВЕДЕНИЕ

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 многоцелевые самолётов и лёгких вертолётов (Cessna 172, Piper PA-28, Aн-2, Robinson R44) оснащены поршневыми двигателя внутреннего сгорания (ДВС) [1].

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

В настоящее время начинают приобретать всё большее распространение тепловые аккумуляторы (ТА) для двигателей, 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., Романовым В.А., Рахимовым С.К., Берестневым Г.А., Шульгиным В.В., Емельяновым 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 аккумулирования 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 времени 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 времени 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 «FarEastCon», современным технологиям 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 Н.Д. конференция Кузнецова «Перспективы имени развития двигателестроения», Самара, 2023; 2023 10th International Conference on Power and Energy Systems Engineering, CPESE 2023, Япония, г. Нагоя, 2023; Всероссийский научно-технический форум двигателей и энергетических установок имени Н.Д. Кузнецова, Самара, 2024; Международная научнотехническая конференция имени Н.Д. Кузнецова «Перспективы развития двигателестроения», Самара, 2025.

Внедрение результатов работы.

Результаты диссертационной работы использованы при выполнении государственного задания по проекту №FSSS-2024-0017 (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. Полученные результаты соответствуют следующим пунктам паспорта специальности «2.5.15 - Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов»: 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...».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 16 работ, из них 3 статьи в периодических изданиях, включённых в список ВАК РФ, 6 статей в изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus и 1 монография.

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.

1 СОВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И АККУМУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

1.1 Тепловые аккумуляторы и технологии аккумулирования энергии

Тепловое аккумулирование применяется в современных энергетических установках в трех основных случаях:

- 1) Использование естественных источников энергии (солнечная энергия, энергия ветра и т.д.), а потребитель требует равномерной выработки электроэнергии. Обычно в таком случае используются электрохимические аккумуляторы, в которых осуществляется накопление электроэнергии, но также возможна реализация схем, в которых аккумулируется тепловая энергия в теплоносителе, который потом обеспечивает равномерный подвод тепла в цикл генерации энергии (цикл Ренкина, Брайтона и т.д.), тем самым обеспечивая стабильный режим работы энергетической установки и оптимальные показатели эффективности.
- 2) В настоящее время существуют значительные колебания объемов потребления электроэнергии. Как уже говорилось выше, энергетическая установка показывает оптимальные показатели эффективности при работе на определенном оптимальном режиме. Однако потребителю не всегда нужно подавать одно и то же количество энергии. При работе в централизованной системе электроснабжения подобные отклонения зачастую компенсируют друг друга, а при работе автономного источника энергии, энергетической установке приходится работать на неоптимальном режиме, что в свою очередь приводит к снижению эффективности и повышению расхода топлива. В подобных случаях перспективно применение тепловых аккумуляторов на этапе, когда производительность установки превышает потребление для запасания тепловой энергии, и её последующее использование на этапе, когда потребление энергии превышает производство. В таком случае энергетическая установка может продолжать работу на оптимальном режиме, сохраняя оптимальные параметры рабочего процесса.

3) Тепловые аккумуляторы также могут использоваться для повышения быстродействия определенного рода энергетических установок. Например, некоторые виды энергетических установок (например, двигатели внутреннего требуют поддержания определенной температуры для сгорания) оптимальной работы. Соответственно, в те периоды времени, когда температура окружающей среды относительно низка (зимой, в высокогорных условиях, в полете на большой высоте и т.д.) необходимо сначала разогреть энергетическую потребует определенное установку, ЧТО дополнительного расхода топлива. Тепловой аккумулятор в такой системе может применяться для накопления тепловой энергии во время работы установки (например, за счет отвода теплоты выхлопных газов, что в свою очередь снизит их температуру на выходе и как следствие тепловую заметность), и использовать накопленную теплоту для предварительного подогрева энергетической установки.

Тепловые аккумуляторы можно классифицировать по уровню температуры накапливаемой энергии:

- низкотемпературные — $T < 200 \, ^{\circ}$ C;
- среднетемпературные $200 \, ^{\circ}\text{C} < T < 500 \, ^{\circ}\text{C};$
- высокотемпературные T > 500 °C [2, 3].

Наиболее широкое применение нашли низкотемпературные тепловые аккумуляторы, использование которых связано с системами жизнеобеспечения человека, экологически чистыми способами производства энергии и оптимизацией потребления энергии.

Кроме того, тепловые аккумуляторы различаются по типу происходящего в них процесса [4]:

- тепловое аккумулирование энергии твердыми и жидкими телами за счет изменения температуры вещества — теплоёмкостная аккумуляция;
- тепловое аккумулирование энергии посредством использования теплоты фазового перехода;
 - термохимическое аккумулирование тепловой энергии.

Величина запасенной тепловым аккумулятором энергии определяется по формуле [5]:

$$Q = m \cdot (c \cdot \Delta T + r + \Delta H) = \rho \cdot V \cdot (c \cdot \Delta T + r + \Delta H),$$

где m — масса теплоносителя, ρ — плотность теплоносителя, V — объем теплоносителя, c — теплоемкость, ΔT - разница температур в зараженном и разряженном аккумуляторе, r — теплота фазового перехода, ΔH — изменение энтальпии в химической реакции.

Таким образом, можно выделить требования к рабочему телу, которое будет использоваться в качестве теплоаккумулирующего материала:

- 1) Должно обладать высокой теплоемкостью, иметь высокую теплоту фазового перехода и изменения энтальпии в ходе химической реакции.
- 2) Должно обладать высокой плотностью для минимизации массогабаритных параметров энергетической установки.
- 3) Должно иметь возможность нагреваться до высокой температуры без значительного усложнения конструкции для обеспечения безопасности эксплуатации установки.

В разработках современных энергетических установок предлагается использовать такие рабочие тела, как нитраты щелочных металлов (как по отдельности, так и смеси), растворы этих нитратов в щелочах, кремний, парафин, оксиды меди, бетон, висмут и другие.

Технология аккумулирования тепловой энергии (АТЭ) играет все более важную роль в преодолении энергетического кризиса и экологические проблемы. Различные технологии АТЭ, включая АТЭ с теплоемкостным теплом, АТЭ со теплотой фазового перехода и термохимические АТЭ, были интенсивно исследованы с точки зрения принципов, материалов и приложений. В то время как существующие исследования сосредоточены на базовых АТЭ, передовые/гибридные технологии АТЭ вызвали растущий интерес и продемонстрировали выдающиеся достоинства в преодолении недостатков базовых АТЭ, например, увеличение плотности накопления энергии или эффективности хранения, снижение температуры заряда,

повышение теплопроводности сорбентов, стабилизация температуры нагнетания или повышение производительности интегрированных систем. Отдельно от опубликованные результаты, некоторые потенциальные передовые/гибридные технологии АТЭ предлагаются для дальнейшего расширения ассортимента тепловых аккумуляторов.

Базовые хранения ощутимой тепловой энергии имеют свои недостатки, теплоемкостного аккумулирования например, система имеет плотность накопленной энергии и значительные тепловые потери, система с теплоемкостным накопление - низкую теплопроводность, а термохимические аккумуляторы заряжаются при обеспечении высокой температуры этого процесса. Кроме того, остается место для повышения энергетической плотности, скорости заряда/разряда, стабильности разрядки и т.д. Таким образом, чтобы в полной мере использовать источники энергии и улучшить производительность системы АТЭ. предлагается использование усовершенствованных / гибридных технологий АТЭ, включая расширенный цикл хранения, гибридный материал для хранения и гибридную систему хранения. Передовые/гибридные технологии хранения ощутимой тепловой энергии определяются следующим образом:

- Высокоэффективный цикл хранения относится к изменению или оптимизации конфигураций внутри цикла АТЭ, что может значительно улучшить производительность АТЭ.
- Гибридные материалы АТЭ относится к комбинации отдельных материалов АТЭ, направленной на улучшение неудовлетворительных свойств (например, низкой теплопроводности и высокой температуры заряда), которые сдерживают дальнейшее улучшение характеристик.
- Гибридная система АТЭ относится к комбинации отдельных систем АТЭ, направленной на преодоление недостатков (например, низкой плотности накопленной энергии) автономной системы.

Технологии хранения тепловой энергии, их преимущества и недостатки представлены в таблице 1.1. Различные типы передовых/гибридных

технологий хранения тепловой энергии постоянно развиваются и изучаются, при этом достигаются некоторые определенные преимущества, например, более низкая температура процесса заряда, более высокая плотность хранения энергии или более высокая эффективность хранения энергии. При этом возникают некоторые проблемы при развитии таких технологий. Таким образом, для дальнейшего прогресса в области хранения тепловой энергии необходимо провести дополнительные исследования для решения этих проблем.

Таблица 1.1 – Параметры и характеристики современных технологий хранения тепловой энергии

Вид технологии	Раздел технологии	Преимущества	Недостатки	Ссылка на источники
Базовое хранение тепловой энергии	Хранение ощутимой тепловой энергии	Простота, практичность, низкая стоимость	Низкая плотность хранения энергии, большие потери тепла	[6, 7]
	Хранение скрытой тепловой энергии	Средняя плотность хранения энергии, низкая стоимость	Низкий теплообмен	[8-10]
	Термохими- ческое хранение тепловой энергии	Высокая плотность хранения энергии, незначительные тепловые потери	Высокая температура зарядки	[11-13]
Передовой цикл хранения	Многоступен- чатый	Снижение температуры зарядки, повышение плотности хранения энергии	Проблемы кристаллизации	[14-17]
	Множествен- ного эффекта	Повышение эффективности хранения энергии	Необходимость повышения температуры зарядки, низкая плотность хранения энергии	[18]
	С вспомога- тельным компрессором	Снижение температуры зарядки, стабилизация температуры разрядки температуру, повышение плотности хранения энергии	Дополнительное энергопотреб- ление, повышение цены	[19-21]

Продолжение таблицы 1.1

продолжение таолицы 1.1						
Передовой	Т 1	Значительное	[22, 22]			
цикл	Трехфазные	повышение плотности	кристаллизации	[22, 23]		
хранения		хранения энергии Смещение	Сложная			
		электрической				
	С интегриро-	нагрузки, приемлемая	программа управления,			
	ванным	плотность	управления, высокие	[24-27]		
	охлаждением	аккумулирования	требования по			
		тепловой энергии	безопасности			
		Temioben sneprim	Большие размеры			
	Потенциальные	_	теплового			
	жидкостное	Выходная	коллектора,			
	хранение	высокоэффективная	низкая	[28-30]		
	тепловой	мощность	эффективность			
	энергии		хранения энергии			
Гибридные	Гибридные		•			
материалы	материалы	Ионон зовачил в				
хранения	хранение	Использование в		[21 22]		
	ощутимой	конкретных		[31-33]		
	тепловой	ситуациях				
	энергии					
		Улучшение				
	Гибридные	теплопередачи,				
	материалы	повышение	Сложность в			
	хранение	эффективности	подготовке	[34-41]		
	скрытой	плотности хранения	материалов,	[51]		
	тепловой	энергии и	marephanes,			
	энергии	эксергетического				
		КПД				
		Улучшение теплопередачи,				
	Гибридные	повышение плотности				
	материалы	хранения энергии,	Сложность в			
	хранение тер-	снижение	подготовке			
	мохимической	температуры зарядки	материалов,	[42-45]		
	тепловой	температуры зарядки	усложненная			
	энергии	расширение	схема			
	1	температурного				
		диапазона зарядки				
Гибридные		Повышение				
системы	Аккумулирова	плотности хранения				
хранения	ние явной	энергии, увеличение				
	тепловой	времени работы	_			
	энергии и	системы, повышение	Низкая	[46-56]		
	аккумулирован	эффективности	теплоемкость	[.0.00]		
	ие скрытой	хранения,				
	тепловой	регулирование				
	энергии	температуры в				
		помещении				

1.2 Обзор установок аккумулирования энергии

Использование теплового аккумулятора совместно с солнечными концентраторами и паросиловой установкой

Схема такой установки представлена на рисунке 1.1 и предложена в работе [57].

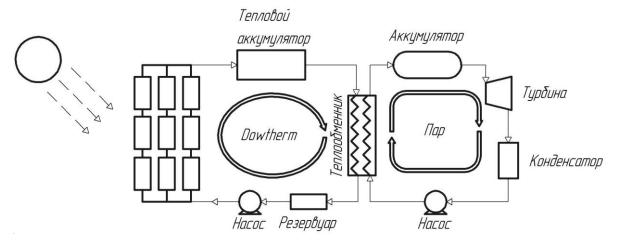


Рисунок 1.1 – Схема энергетической установки на основе цикла Ренкина и солнечных концентраторов

Установка состоит из двух контуров. Основной контур включает в себя параболический концентратор, тепловой аккумулятор, использующий теплоту фазового перехода, теплообменник и насос. Второй контур включает в себя паровую турбину, теплообменник и насос. Рабочим телом основного контура является специальная жидкость «Dowtherm A», которая представляет собой эвтектическую смесь двух весьма стабильных органических соединений: бифенила ($C_{12}H_{10}$) и дифенилоксида ($C_{12}H_{10}O$). Эти вещества имеют очень близкие значения давления паров, поэтому их смесь работает как одно соединение [58]. Вода и водяной пар используются в качестве рабочего тела второго контура, в котором генерируется электроэнергия. Тепловой сделанный кожухо-трубного теплообменника, аккумулятор, виде устанавливается после солнечного концентратора для того, чтобы запасать излишнюю энергию дня. Из-за сравнительно низкой В течение теплопроводности (0,2 Вт/м К) рабочего тела и материала аккумулятора, необходимо внедрить оребрение стенок на трубках аккумулятора. Нагретое рабочее тело из солнечного коллектора проходит через тепловой аккумулятор

в теплообменник, в котором передает тепловую энергию из основного контура во второй, тем самым испаряя воду. Применение теплоаккумулирующего материала с возможностью фазового перехода позволяет уменьшить габаритные размеры аккумулятора, а также поддерживать постоянное аккумулятора. Поэтому давление при разрядке ДЛЯ поддержания необходимого уровня давления и расхода рабочего тела перед паровой турбиной установлен паровой аккумулятор. Во время процесса зарядки при постоянном подводе теплоты температура и давление в паровом аккумуляторе постепенно возрастает. На выходе из теплового аккумулятора установлен контрольный клапан, поддерживающий постоянное значение расход пара перед турбиной.

Тепловой аккумулятор с зарядкой от источника электрической энергии

Энергетические установки с тепловым аккумулятором, заряжаемым от электричества [59], находят свое применение при конверсии существующих электростанций. Основным достоинством такой схемы является возможность применение с любым типом электростанций (паросиловые, газотурбинные, солнечные и др.). Схема установки, сопряженной с паросиловой электростанцией, представлена на рисунке 1.2.

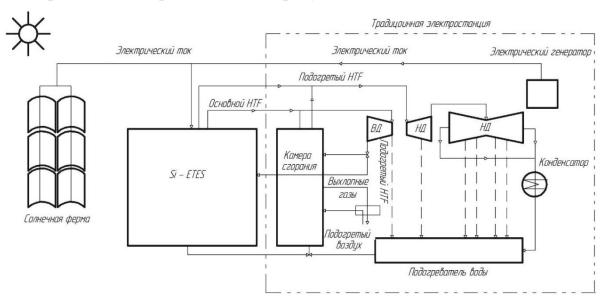


Рисунок 1.2 – Схема паросиловой электростанции с тепловым аккумулятором, заряжаемым электричеством

Излишняя энергия хранится в виде тепловой энергии в расплавленном кремнии и преобразуется обратно в электроэнергию за счет теплоты передаваемой сверхкритическому пару за счет теплообмена излучением. Преимущество теплообмена излучением заключается в том, что избегается возможный контакт между жидкостью под высоким давлением и расплавленным металлом, таким образом гарантируя высокий уровень безопасности системы.

Как видно из схемы тепловой аккумулятор устанавливается параллельно камере сгорания. Часть воды из водоподогревателей поступает в камеру, а часть в тепловой аккумулятор, где она нагревается и поступает в турбину высокого давления, после которой потоки опять разделяются и поступают в тепловой аккумулятор и камеру сгорания, после которых опять смешиваются и поступают в турбину среднего давления, после которой направляются в турбину низкого давления. Часть пара ИЗ турбин отводится В водоподогреватели для повышения эффективности установки.

Однако стоит отметить, что универсальность и безопасность подобной установки достигаются за счет относительно низкой эффективности использования аккумулированной энергии. Так как электрическая энергия запасается в виде теплоты, то для того, чтобы снова преобразовать ее в электрическую необходимо провести несколько этапов преобразования энергии. Таким образом её величина уменьшается в $1/\eta$ раз, где η — эффективность электростанции. Таким образом, если принять эффективность электростанции 40%, из 100 МДж запасенной энергии, будет получено 40 МДж, т.е. в 2,5 раза меньше.

Энергетическая установка с накоплением теплоты выхлопных газов двигателя внутреннего сгорания

Выхлопные газы двигателей внутреннего сгорания обладают тепловой энергией, которая может быть сохранена при помощи теплового аккумулятора. Авторы работы [60] предлагают использовать накопленную теплоту в системах осушки. Схема установки представлена на рисунке 1.3.

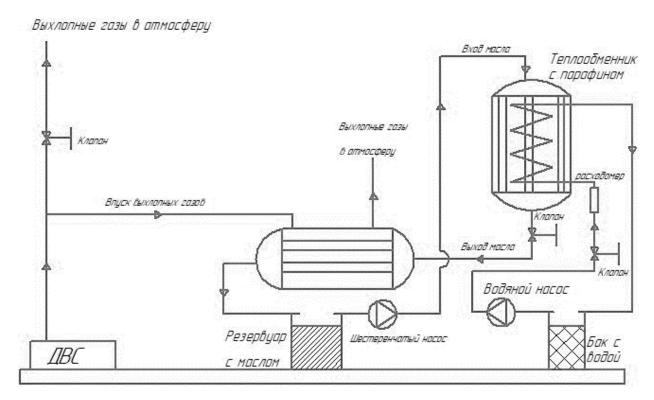


Рисунок 1.3 - Установка с запасанием тепла выхлопных газов двигателя внутреннего сгорания

Выхлопные поступают кожухо-трубный газы ИХ двигателя В теплообменник, в котором передается теплота теплоносителю, который циркулирует по собственному контуру. Теплоноситель (жидкость Balmerol prototherm) поступает в кожухо-трубный теплообменник, выполняющий функцию теплового аккумулятора, межтрубное пространство парафином. Когда возникает потребность заполнены использовать накопленную теплоту, в теплообменник подается вода, которая нагревается и подается поступает потребителю.

Энергетическая установка на основе солнечных концентраторов с добавлением ступени опреснения морской воды

Использование солнечных концентраторов позволяет производить подвод тепла в цикл генерации электроэнергии при достаточно высокой температуре, что приводит к тому, что отвод теплоты также производится при достаточно высокой температуре, и это тепло можно использовать для какихлибо других целей. Установка, предложенная в работе [61] (рисунок 1.4), предлагает использовать это тепло для опреснения морской воды.

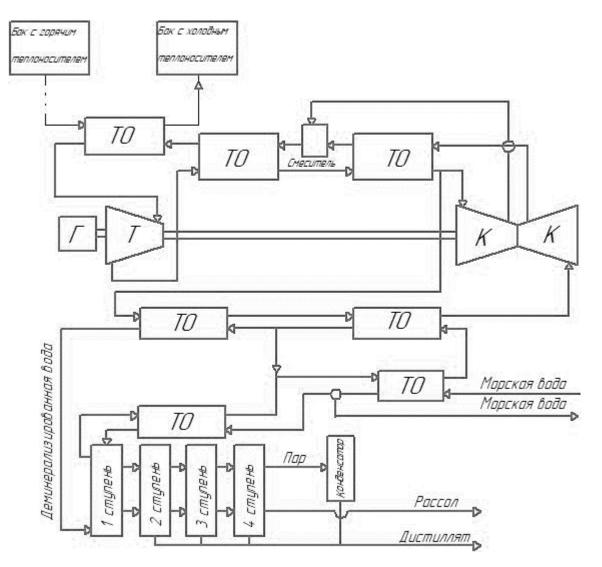


Рисунок 1.4 — Энергетическая установка на основе солнечных концентраторов с добавлением ступени опреснения морской воды

Основной энергетической контур работает по циклу Брайтона. Рабочее тело - углекислый газ поступает в теплообменник, в котором получает теплоту от расплавленной соли (смесь нитрата натрия и калия), а далее поступает в турбину, где расширяется, совершая механическую работу. После турбины газ поступает в высокотемпературный и низкотемпературный теплообменникрекуператор для обеспечения высокой регенерации энергии в цикле. Затем поток углекислого газа разделяется на две части, одна из которых идет в ступень дополнительного повышения давления, а вторая – в теплообменники опреснительной установки. Дополнительная ступень повышения давления позволяет увеличить эффективность цикла за счет наличия теплообменников-рекуператоров. низкотемпературных Опреснительная

установка работает по классической схеме многоступенчатого испарения (MED). Преимуществами такой установки является высокая экологическая и энергетическая эффективность, когенерация электроэнергии и пресной воды, а недостатками — большое количество теплообменников типа «газ»-«газ», что приводит к значительным площадям теплообмена, и как следствие, большой массе и габаритам энергетической установки, что ограничивает возможность применения на автономных источниках энергии.

Трехступенчатые энергетические установки

Данная установка [62] предполагает, что накопление энергии будет осуществляться как теплоёмкостным способом, так и при помощи фазового перехода и химической реакции. Это осуществляется за счет применения оксида меди СиО, который подводе теплоты высокого уровня температуры (1200 °C) не только плавится, но и частично теряет кислород, становясь смесью из СиО и Си₂О. Во время разрядки смесь оксидов окисляется, что позволяет охладить смесь. Достаточно высокая температура теплового аккумулятора позволяет построить двухконтурную установку, что в свою очередь позволяет повысить энергетическую эффективность цикла (рисунок 1.5). Тепловая энергия, накапливается в тепловом аккумуляторе, подводится в газотурбинную установку, из которой отводимая теплота цикла ГТД подводится к паросиловой энергетической установке, тем самым эффективно работая в качестве парогазовой установки.

Зарядка теплового аккумулятора производится за счет профицита электроэнергии из сети или от солнечной или ветряной электростанции. Подобная энергетическая установка позволяет достичь наиболее высокой плотности накапливаемой тепловой энергии, а также высокой эффективности ее работы. Однако такие системы отличаются сложностью конструкции (нагнетатель для подачи расплавленного оксида меди, должен выдерживать температуру 1200 °C, в реакторе окисления происходит впрыск расплавленных оксидов при помощи специальных форсунок).

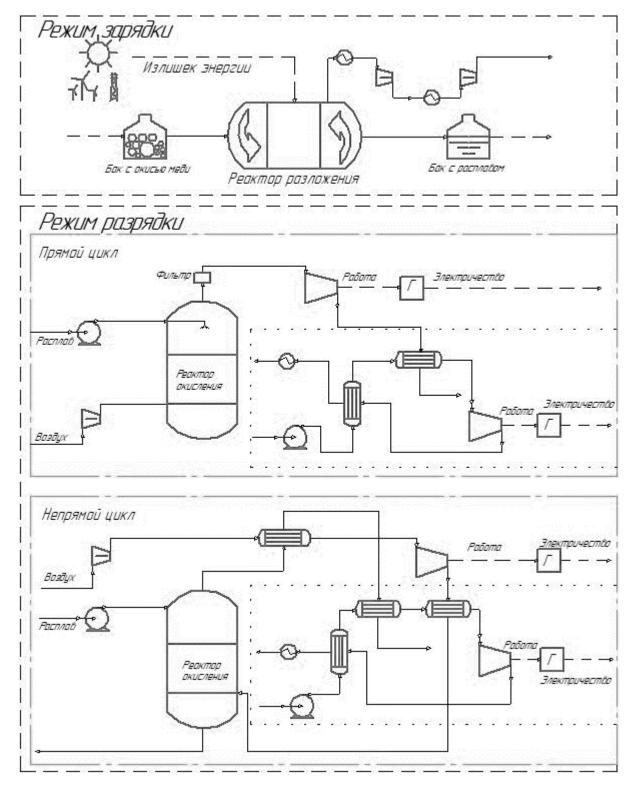


Рисунок 1.5 — Трехкомпонентная энергетическая установка

Энергетическая установка для компенсации неравномерности нагрузки потребления

Данная энергетическая установка [63] предполагается в качестве модернизации существующих парогазовых установок, в которых компенсация

неравномерности нагрузки осуществляется за счет утилизации регулирования распределения их потоков выхлопных газов контура ГТУ. У установки существует три режима: заряд, хранение и разряд теплового аккумулятора. На этапе заряда (рисунок 1.6) часть выхлопных газов отводится в тепловой аккумулятор, тем самым снижая количество тепла, подведенного к паросиловой установке и тем самым уменьшая её мощность. На этапе хранения (рисунок 1.7) все выхлопные газы направляются в контур паросиловой установки, и парогазовая установка в целом работает на номинальном режиме. На этапе разрядки (рисунок 1.8) теплота из теплового аккумулятора добавляется к тепловой энергии выхлопных газов, тем самым повышая количество тепла, подведенного к паросиловой установке, следовательно, и её мощность.

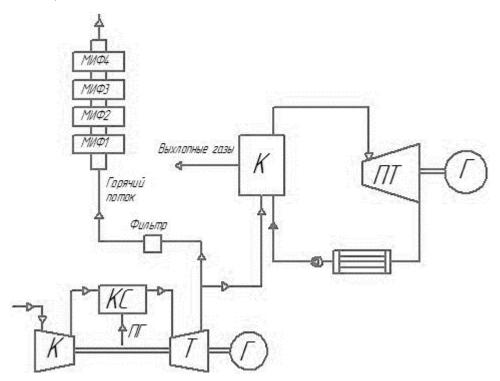


Рисунок 1.6 – Схема работы энергетической установки на этапе заряда теплового аккумулятора

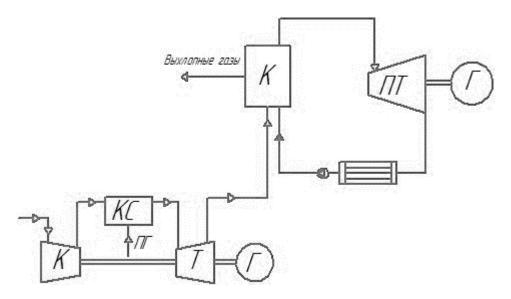


Рисунок 1.7 – Схема работы установки на этапе хранения тепловой энергии

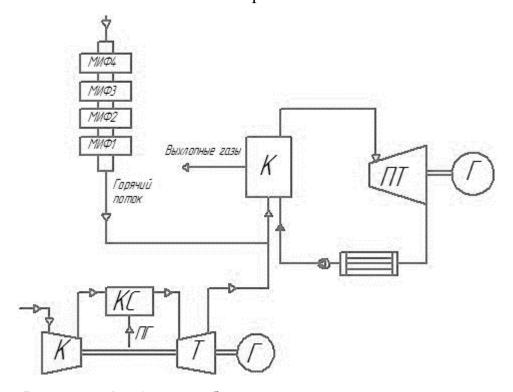


Рисунок 1.8 – Схема работы установки на этапе разряда энергии

Энергетическая установка для компенсации неравномерности нагрузки на атомной электростанции

В целом назначение и основной принцип действия аналогичны установке, рассмотренной выше. Основные отличия заключаются в месте отвода теплоты в тепловой аккумулятор: в данной установке [64] пар отводится из парогенератора. На режиме разрядки пар поступает в турбину низкого давления (рисунок 1.9).

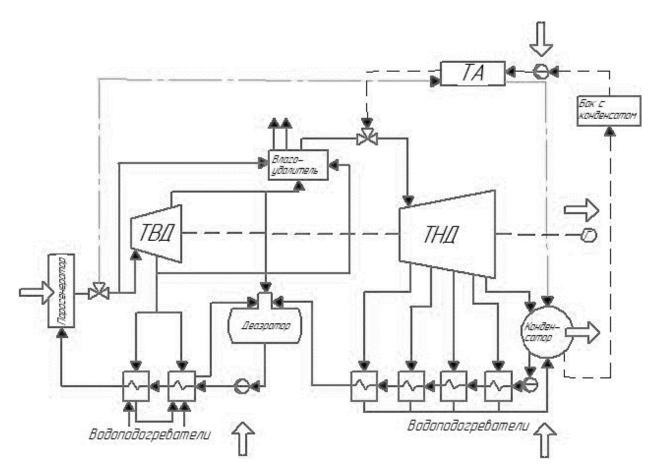


Рисунок 1.9 – Энергетическая установка для компенсации неравномерности нагрузки на атомной электростанции

Двухконтурная энергетическая установка на основе солнечных концентраторов и цикла Ренкина

Предложенная установка [65] в целом аналогична энергетической установке, представленной на рисунке 1.1, но в данной системе в тепловой аккумулятор подается не все рабочее тело, воспринимающее теплоту в солнечном концентраторе, а только его часть. Во время дневного режима работы контур паросиловой установки функционирует напрямую с солнечными концентраторами, а во время ночного режима — воспринимает теплоту, накопленную в солнечных концентраторах. Это, с одной стороны, позволяет повысить эффективность использования тепловой энергии во время дневного режима работы, когда происходит накопление солнечной энергии. С другой стороны, это приводит к увеличению количества используемого оборудования. Схема энергетической установки представлена на рисунке 1.10.

Вторым отличием является использования тепловых аккумуляторов, накапливающтх химическую энергию.

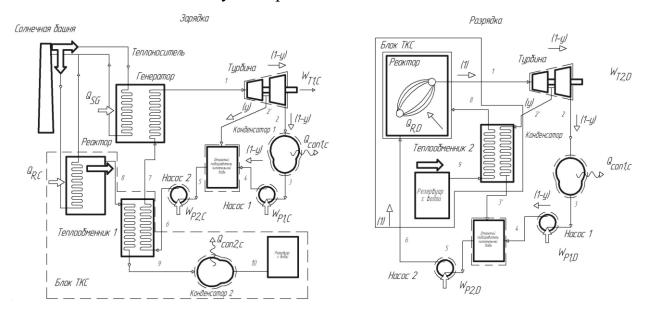


Рисунок 1.10 — Схема двухконтурной энергетической установки на основе солнечных концентраторов и цикла Ренкина

Энергетическая установка на основе теплового аккумулятора и ветроэнергетической установки

Предложенная установка [66] в целом аналогична энергетической установке, изображенной на рисунке 1.1. Основным отличием является другой источник энергии – вместо солнечных концентраторов используется индукционный нагрев от электричества, вырабатываемого с помощью ветроэнергетической установки. Стоит отметить, что при данной схеме вся электроэнергия, вырабатываемая ветроэнергетической установкой, нагрев расплавленных солей, хотя с точки зрения направляется на эффективности, наиболее эффективно подавать часть электроэнергии напрямую потребителю. Это позволит сократить количество преобразований энергии и повысить эффективность энергетической установки в целом. Схема установки представлена на рисунке 1.11.

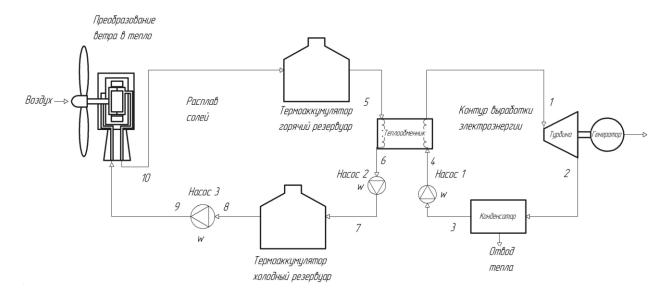


Рисунок 1.11 — Схема энергетической установки на основе теплового аккумулятора и ветроэнергетической установки

Прочие рассмотренные схемы [67-72] либо являются различными вариантами приведенным выше с другими рабочими телами, либо параметрами цикла, либо являются комбинацией различных элементов этих схем.

Анализ всех представленных схем приведен в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Сравнительный анализ схем, использующих тепловые аккумуляторы

	таолица 1.2 — Сравнительный анализ схем, использующих тепловые аккумуляторы					
$N_{\underline{0}}$	Уровень температуры	Тип теплового	Теплоаккумулирующее	Энергетический	Достоинства	Недостатки
	аккумулятора	аккумулятора	вещество/Промежуточный	контур		
			теплоноситель			
1	2	3	4	5	6	7
1.1	Среднетемпературный	Теплоемкостный,	NaNO ₃ /Dowtherm A	Паросиловая	Низкая стоимость теплового	Низкая теплопроводность
		С фазовым		установка (цикл	аккумулятора	рабочего тела основного
		переходом		Ренкина)	Высокая плотность запасаемой	контура и
					энергии	теплоаккумулирующего
					Работа при достаточно	вещества
					высокой температуре	Необходимость установки
					2 22	парового аккумулятора
1.2	Высокотемпературный	Теплоемкостный,	Кремний (Si)/Водяной пар	Любой	Возможность подключения к	Относительно низкая
		С фазовым			существующей	эффективность переноса
		переходом			инфраструктуре Высокая	тепла (только излучением)
					безопасность по сравнению с	Низкая эффективность
					трубными аккумуляторами	преобразования энергии
					Высокая объемная плотность	Необходима модернизация
					запасаемой энергии, высокая	турбин (увеличение
					температура плавления и	массового расхода)
					приемлемая теплопроводность	-
					теплоаккумулирующего	
					вещества	
1.3	Низкотемпературный	Теплоемкостный,	Парафин/ Balmerol	Двигатель	Простота конструкции	Низкая температура
		С фазовым	prototherm	внутреннего	Возможность подключения к	запасенной энергии,
		переходом		сгорания	существующей	вследствие чего
		•		•	инфраструктуре	ограниченная область
						применения
						Низкая плотность
						запасенной энергии
						Низкая теплопроводность
						выхлопных газов, большая
						площадь теплообменника
1.4	Высокотемпературный	Теплоемкостный,	Смесь солей (60% NaNO3 и	Газотурбинный	Высокая энергетическая	Большие площади
		С фазовым	40% KNO3 по массе)	контур (цикл	эффективность	теплообмена в
		переходом	/Воздух / вода	Брайтона),	энергетического контура	теплообменниках, большие
		* · · ·		работающий на	Когенерация электроэнергии и	габариты и масса
				углекислом газе	пресной воды	Локальность применения

Продолжение таблицы 1.2

1	2	3	4	5	6	7
1.5	Высокотемпературный	Теплоемкостный, С фазовым переходом, с теплом химической реакции	Оксид меди CuO /Воздух / вода	Парогазовая установка	Наиболее высокая эффективность запасания энергии Высокая эффективность энергетического контура	Низкая эффективность преобразования энергии Необходимость установки сложного оборудования Необходимость наличия окислителя
1.6	Среднетемпературный	Теплоемкостный, С фазовым переходом	1 слой: 33% (NaCl), 67% (CaCl ₂) 2 слой: 63% (MgCl ₂), 22,3% (NaCl), 14% (KCl) 3 слой: 37% (LiCl), 63% (LiOH) 4 слой: 55,4 (LiNO ₃), 4,5 (NaNO ₃), 40,1 (KCl) Воздух/вода	Парогазовая установка	Возможность подключения к существующей инфраструктуре Простота конструкции Относительно высокая плотность запасенной энергии	Большой диапазон режимов работы паросиловой установки
1.7	Среднетемпературный	Не указан	Не указан / Вода	Паросиловая установка (Атомная электростанция)	Возможность подключения к существующей инфраструктуре Простота конструкции Относительно высокая плотность запасенной энергии	Большой диапазон режимов работы паросиловой установки
1.8	Средне- и высоко- температурный	Теплоемкостный, с теплом химической реакции	СаО/Н ₂ О / вода	Паросиловая установка (цикл Ренкина)	Высокая плотность запасаемой энергии Работа при достаточно высокой температуре Относительно высокая эффективность при работе на дневном режиме	Относительное большое количество используемого оборудования
1.9	Высокотемпературный	Теплоемкостный, С фазовым переходом	58% KF, 42% ZrF ₄ / вода	Паросиловая установка (цикл Ренкина)	Высокая плотность запасаемой энергии Работа при достаточно высокой температуре	Относительно низкая эффективность работы

Анализ рассмотренных схем показывает, что при выборе схемы подключения теплового аккумулятора к энергетической электростанции нужно руководствоваться несколькими факторами. В случае наземной установки снижаются требования к массогабаритным характеристикам установки, тогда есть возможность использования среднетемпературных тепловых аккумуляторов, запасающих тепло выхлопных газов. В случае, когда массогабаритные минимальные характеристики являются ключевым фактором, имеет смысл рассмотреть возможность установки теплового аккумулятора с электрическим нагревом. Такие установки имеют наибольшую плотность запасаемой энергии, однако с точки зрения анализа энергетической эффективности они уступают другим типам установок 3a счет дополнительных преобразований энергии (тепло→механическая работа -> электроэнергия -> тепло -> механическая работа -> электроэнергия по сравнению с циклом тепло→механическая работа→электроэнергия обычных установок). Такие установки могут быть более эффективны, например, на транспортном средстве при условии предварительной зарядки теплового аккумулятора до начала движения. При необходимости резкого повышения мощности энергетической установки производится включение теплового аккумулятора.

С точки зрения выбора рабочего тела оптимальным является теплоаккумулирующий материал, который сочетает в себе все три вида накопления тепловой энергии. Однако, стоит отметить, что подобные материалы как правило наиболее эффективны при высокой температуре аккумулирования, и могут подходить не ко всем случаям.

1.3 Применение тепловых аккумуляторов в тепловых двигателях

Требования к системам энергетического обеспечения и двигателям внутреннего сгорания постоянно возрастают и могут быть обеспечены только на основе решения широкого спектра физико-технических проблем создания принципиально новых и модернизации существующих двигательных и

энергетических установок, качественного улучшения их эксплуатационных свойств, удельных энергетических и массогабаритных характеристик.

Традиционные пути совершенствования тепловых двигателей, связанные с увеличением параметров цикла - степени сжатия, максимальной температуры, отношения максимальной температуры цикла к минимальной и др., уже практически достигли предела, так, рост параметров цикла сдерживается ужесточением экологических требований и характеристиками жаропрочных и жаростойких конструкционных материалов, используемых в наиболее напряженных узлах и деталях установок и двигателей.

Дальнейшее повышение экономичности, надежности, безопасности тепловых двигателей и энергетических установок при уменьшении массогабаритных характеристик, может быть достигнуто рациональной оптимизацией циклограммы подвода и отвода теплоты, благодаря применению тепловых аккумуляторов, использующих как теплоту фазовых переходов и эндотермических взаимодействий, так и теплоемкость материалов.

Анализ показывает, что при использовании ДВС на органическом топливе для морского и наземного использования рациональным (на существующем уровне развития техники) может быть использование тепловых аккумуляторов (предпусковых подогревателей и устройств для снижения термоцикличности) и 2-х фазных теплоносителей в системах охлаждения.

Одним из способов значительно повысить эффективность тепловых двигателей является рациональное использование тепловых аккумулятороврегенераторов. Это позволяет на этапах переходных процессов и на режимах частичной мощности изменить циклограмму подвода и отвода теплоты (приблизив ее к расчетной точке установки) и, таким образом, повысить КПД установки при одновременном снижении тепловых нагрузок, возникающих циклично.

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

Однако такого превышения оказывается обычно недостаточно, т.к. потом обычно идет преобразование теплоты в электрическую или механическую энергию на валу. При этом в большинстве случаев КПД преобразования невысокий и по сравнению с электрохимическим способом аккумуляции энергии большой выигрыш в полезной работе получить не удается. Тем не менее, этот способ аккумуляции энергии уже используется в солнечных энергоустановках космического базирования и представляет интерес для малоразмерных долгоресурсных объектов. При нахождении на освещенной части траектории происходит аккумуляция части подведенной теплоты, а при уходе на теневую сторону — возврат теплоты в цикл энергоустановки.

Для аккумулирующей среды с использованием теплоты фазового перехода важны следующие свойства:

- высокие энтальпия фазового перехода и плотность;
- удобная из эксплуатационных условий температура плавления;
- высокая теплопроводность и теплоемкость в твердой и жидкой фазах;
- температурная стабильность;
- отсутствие возможности переохлаждения при затвердевании и перегрева при плавлении;
- низкое термическое расширение и незначительное изменение объема при плавлении;
 - слабая химическая активность и безопасность и т.д.

Основными задачами в области систем аккумулирования теплоты в контурах энергоустановок для повышения эксплуатационных характеристик двигателей внутреннего сгорания являются:

- облегчение пуска и сокращение времени прогрева силовой установки и отдельных её элементов.
- дополнительное охлаждение энергетической установки при пиковых нагрузках.

Перспективность аккумуляции энергии с использованием теплоты фазового перехода напрямую связана с повышением КПД поршневых ДВС и ростом удельных характеристик самих аккумуляторов. Так на расплавах солей только за счет их теплоемкости и превышения температуры над рабочей температурой можно запасать порядка 350 кДж/кг. За счет теплоты фазового перехода можно запасти еще порядка 400 кДж/кг, обеспечивая стабильные температурные условия в нагревателе или охладителе рабочего тела. Применяя сплав двух или более солей за счет эндотермической теплоты растворения, можно достичь запаса энергии еще порядка 500 кДж/кг. Т.е. достижимый уровень накапливаемой тепловой энергии в тепловом аккумуляторе может составить порядка 1 250 кДж/кг.

Для решения первой задачи, облегчения пуска и сокращения времени прогрева силовой установки и её отдельных элементов посредством аккумулированного тепла можно регенерировать тепло из трех систем ДВС, таких как система охлаждения, система смазки и система выпуска отработанных газов (рисунок 1.12) [73, 74].

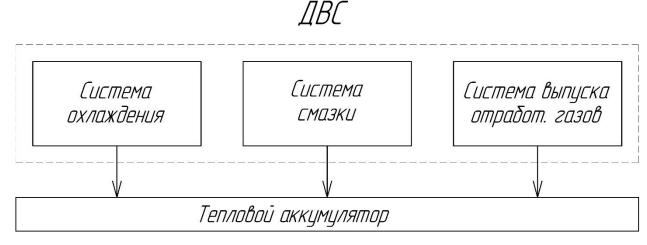


Рисунок 1.12 - Структурная схема применения ТА в составе ДВС

Охлаждающую жидкость системы охлаждения можно использовать для заряда низкотемпературных тепловых аккумуляторов, масло системы смазки – для заряда среднетемпературных тепловых аккумуляторов, продукты сгорания топливно-воздушной смеси системы выпуска отработанных газов – для заряда тепловых аккумуляторов. В высокотемпературных зависимости циклограммы нагружения и назначения ДВС выбирается необходимый температурный диапазон работы теплового аккумулятора, а в следствии комбинация система ДВС или ИХ ДЛЯ поддержания необходимого температурного диапазона работы теплового аккумулятора.

2 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОВОГО АККУМУЛЯТОРА

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

2.1 Математическая модель заряда теплового аккумулятора

Уравнение теплового баланса рассматриваемого объема, отнесенного к единице времени, имеет вид:

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

где $Q_{no\partial}$ – энергия, подводимая к тепловому аккумулятору,

 $\int_{V_a} \rho_{a.\mathrm{T}.} c_{a.\mathrm{T}.} \frac{dt}{d\tau} dv$ — определяет рост энергетического потенциала теплового аккумулятора за счёт нагрева теплоаккумулирующего вещества в твердом состоянии,

 $\int_{V_a}
ho_{a.ж.} c_{a.ж.} rac{dt}{d au} dv$ — определяет рост энергетического потенциала теплового аккумулятора за счёт нагрева теплоаккумулирующего вещества в жидком состоянии,

 $\int_{V_o} \rho_o c_o \frac{dt}{d\tau} dv$ — выражает накопление энергии в оболочке теплового аккумулятора,

 $\int_{F_0} \lambda gradt df$ — определяет рассеивание энергии через внешнюю оболочку в окружающее пространство.

 ρ_a , c_a — плотность и теплоемкость материала аккумулятора,

 V_a – объем аккумулятора,

 ρ_o , c_o – плотность и теплоемкость материала оболочки аккумулятора,

 V_0 – объем оболочки аккумулятора,

 λ – теплопроводность,

 F_o – поверхность теплообмена с окружающей средой.

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

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

При этом значения средней температуры теплоаккумулятора $t_{a.cp}$ и $t_{o.cp}$ 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 $t_{o.2}$ ее поверхностях.

Рассеивание энергии q_{nom} определяется конвективной и лучистой составляющими теплообмена поверхности оболочки установки с окружающей средой, и может быть выражено соотношениями:

$$q_{\text{пот}} = \int_{F_0} \alpha_i (t_i - t_{\text{B}}) dF_i + \int_{F_0} C_0 \alpha_{1-2} \left[\left(\frac{t_i + 273,15}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{\text{F}} + 273,15}{100} \right)^4 \right] dF_i,$$

где α_i – локальный коэффициент конвективной теплоотдачи,

 t_i – температура на i-поверхности оболочки dF_i ,

 $t_{\scriptscriptstyle \theta}$ – температура окружающего воздуха,

 t_{c} — средняя температура ограждающих конструкций,

 α_{I-2} – приведенный коэффициент поглощения,

 C_o – излучательная способность серого тела.

Общее количество аккумулированной энергии:

$$\begin{split} q_{\text{зап}} &= \int_{0}^{\tau} k F_{\text{To}} \Delta t d\tau - \int_{0}^{\tau} q_{\text{пот}} d\tau = \rho_{a} c_{a.\text{T.}} V_{a} (t_{\text{плав.}} - t_{\text{H}}) + \\ &+ \rho_{a} c_{a.\text{ж.}} V_{a} (t_{\text{к.cp}}^{\text{a}} - t_{\text{плав.}}) + \rho_{a.\text{ж.}} r V_{a} + \rho_{\text{o}} c_{\text{o}} V_{\text{o}} (t_{\text{к.cp}}^{\text{o}} - t_{\text{H}}), \end{split}$$

где τ –длительность заряда,

 $\int_0^{\tau} q_{\text{пот}} d\tau$ – потери энергии в процессе заряда теплового аккумулятора, taкср, toкср, th, tплав. – температура аккумулятора, оболочки в конце заряда, начальная температура и температура плавления теплоаккумулирующего вещества.

2.2 Математическая модель разряда теплового аккумулятора

Уравнение первого закона термодинамики для удельного потока газовой среды без внутренних источников работы имеет вид:

$$dq_w(\tau) = \frac{d}{d\tau} \left(di + d \left(\frac{w^2}{2} \right) \right)$$

где $d/d\tau$ – дифференциальный оператор,

 dq_w – количество энергии, поступающей в элементарный объем среды, i – энтальпия,

 ω – скорость движения воздуха,

 τ – время.

По условию неразрывности струи и с учетом массы фиксированного вещества в потоке G, получим:

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

или с учетом $i = c_p t$

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

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

$$\begin{cases} \frac{d}{d\tau} \Big(\rho_{a.\mathrm{T.}} c_{a.\mathrm{T.}} V_a \big(t_{\mathrm{K.cp}}^{\mathrm{a}} - t_{\mathrm{H}} \big) + \rho_{\mathrm{o}} c_{\mathrm{o}} V_{\mathrm{o}} \big(t_{\mathrm{K.cp}}^{\mathrm{o}} - t_{\mathrm{H}} \big) \Big) - q_{\mathrm{пот}} = \\ = \Big(G \big(c_{p2} t_2 - c_{p1} t_1 \big) + G \big(\frac{w_2^2}{2} - \frac{w_1^2}{2} \big) \Big), & \text{при } t < t_{\mathrm{плав}} \,, \\ \frac{d}{d\tau} \Big(\rho_{a.\mathrm{T.}} r V_a + \rho_{\mathrm{o}} c_{\mathrm{o}} V_{\mathrm{o}} \big(t_{\mathrm{K.cp}}^{\mathrm{o}} - t_{\mathrm{H}} \big) \Big) - q_{\mathrm{пот}} = \\ = \Big(G \big(c_{p2} t_2 - c_{p1} t_1 \big) + G \big(\frac{w_2^2}{2} - \frac{w_1^2}{2} \big) \Big), & \text{при } t = t_{\mathrm{плав}} \,, \\ \frac{d}{d\tau} \Big(\rho_{a.\mathrm{Ж.}} c_{a.\mathrm{Ж.}} V_a \big(t_{\mathrm{K.cp}}^{\mathrm{a}} - t_{\mathrm{H}} \big) + \rho_{\mathrm{o}} c_{\mathrm{o}} V_{\mathrm{o}} \big(t_{\mathrm{K.cp}}^{\mathrm{o}} - t_{\mathrm{H}} \big) \Big) - q_{\mathrm{пот}} = \\ = \Big(G \big(c_{p2} t_2 - c_{p1} t_1 \big) + G \big(\frac{w_2^2}{2} - \frac{w_1^2}{2} \big) \Big), & \text{при } t > t_{\mathrm{плав}} \,. \end{cases}$$

Экспериментальное исследование процессов зарядки и разрядки теплового аккумулятора подразумевает имитацию реальных процессов теплообмена, проходящих внутри экспериментального образца, с учетом требований эксперимента. В случае испытаний имитация реальных условий заключается в определении интенсивности процессов нагрева и охлаждения теплового аккумулятора.

Исследуемый образец представлен на рисунке 2.1.

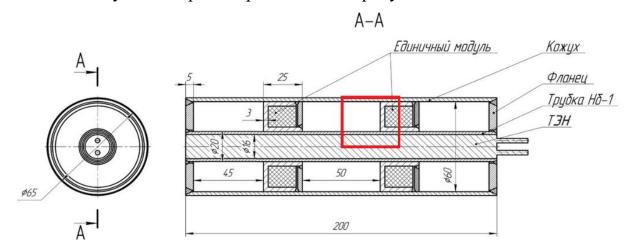


Рисунок 2.1 – Схема исследуемого образца теплового аккумулятора

В кожух вставлены два единичных модуля (высокотемпературных или низкотемпературных) тепловых аккумуляторов. Внутри модулей располагается припаянная трубка из ниобия, в которую вставлен нагревательный элемент – трубчатый электронагреватель (ТЭН). С торцов

кожуха располагаются фланцы. В левом фланце предусмотрено отверстие для фитинга вакуумного насоса.

В целях ускорения расчета было принято решение о моделировании половины экспериментального образца, так как конструкция симметрична. Расчетная модель экспериментального образца представлена на рисунке 2.2.

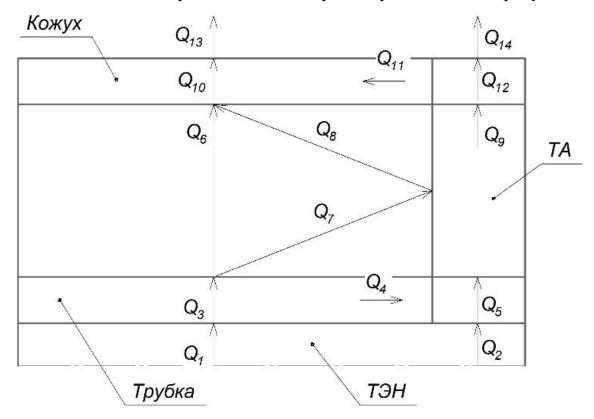


Рисунок 2.2 – Схема расчетной модели экспериментального образца

В расчетной модели присутствуют две основные области — область между плоскостью симметрии модуля теплового аккумулятора и плоскостью лицевой поверхности аккумулятора и область между лицевой поверхностью аккумулятора и границей расчетной области.

На режиме нагрева тепло ТЭН расходуется на нагрев самого ТЭН, затем часть тепла переходит к частям внутренней трубки (Q_1 и Q_2). Затем тепловой поток проходит через элементы внутренних трубок (Q_3 и Q_5). Из-за того, что температура этих элементов может отличаться, возможен тепловой поток между различными элементами внутренней трубки (Q_4). Внутри экспериментального образца обеспечиваться разряжение, теплообмен с наружной поверхности внутренней трубки без теплового аккумулятора

осуществляется только при помощи излучения: Q_6 – от наружной поверхности внутренней трубки к внутренней поверхности наружной трубки, Q_7 - от наружной поверхности внутренней трубки к лицевой поверхности теплового аккумулятора. Через сам тепловой аккумулятор тепло передается следующим образом: за счет теплопроводности тепло Q_{12} передается к элементу наружной трубки, а за счет излучения тепло Q_8 передается наружной внутренней поверхности наружной трубки. Через элементы наружной трубы передаются тепловые потоки Q_{10} и Q_{12} . От наружной поверхности наружной трубки осуществляется теплообмен с окружающей средой при помощи конвекции Q_{13} , Q_{14} (принята естественная конвекция при зарядке и вынужденная при разрядке).

Для составления математической модели рассматриваемого процесса температуры поверхностей обозначены следующим образом (рисунок 2.3).

T5

74 74 74 74 74 77 77 77 71 71 71 71 71

Рисунок 2.3 – Обозначение температуры

В качестве допущения приянято, что ТЭН прогревается равномерно. Температуру воздуха вокруг наружной стенки принимаем равной T_5 .

Тогда тепловые потоки будут равны:

$$\begin{split} Q_3 &= \pi \lambda_{Nb} \cdot l_1 \cdot \frac{T_1 - T_{22}}{\ln \left(\frac{R_2}{R_1}\right)}; \\ Q_4 &= \lambda_{Nb} \cdot F_{in} \cdot 2 \left(\frac{T_{22} + T_1}{2} - \frac{T_2 + T_1}{2}\right); \end{split}$$

$$\begin{split} Q_5 &= \pi \lambda_{Nb} \cdot l_2 \cdot \frac{T_1 - T_2}{\ln(\frac{R_2}{R_1})}; \\ Q_6 &= \varepsilon_{ww} \cdot \sigma \cdot F_{22} \cdot \left[\left(\frac{T_{22}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{33}}{100} \right)^4 \right]; \\ Q_7 &= \varepsilon_{tw} \cdot \sigma \cdot F_{22} \cdot \left[\left(\frac{T_{22}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2 + T_3}{100} \right)^4 \right]; \\ Q_8 &= \varepsilon_{tw} \cdot \sigma \cdot F_{TA} \cdot \left[\left(\frac{T_2 + T_3}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{33}}{100} \right)^4 \right]; \\ Q_9 &= \pi \lambda_{TAM} \cdot l_2 \cdot \frac{T_2 - T_3}{\ln(\frac{R_3}{R_2})}; \\ Q_{10} &= \pi \lambda_{Nb} \cdot l_1 \cdot \frac{T_{33} - T_{44}}{\ln(\frac{R_4}{R_3})}; \\ Q_{11} &= \lambda_{Nb} \cdot F_{out} \cdot 2 \left(\frac{T_3 + T_4}{2} - \frac{T_{33} + T_{44}}{2} \right); \\ Q_{12} &= \pi \lambda_{Nb} \cdot l_2 \cdot \frac{T_3 - T_4}{\ln(\frac{R_4}{R_3})}; \\ Q_{13} &= \alpha_1 \cdot F_{44} \cdot (T_{44} - T_5) + \varepsilon_1 \cdot \sigma \cdot F_{44} \left[\left(\frac{T_{44}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_5}{100} \right) \right]^4; \\ Q_{14} &= \alpha_1 \cdot F_4 \cdot (T_{44} - T_5) + \varepsilon_1 \cdot \sigma \cdot F_4 \left[\left(\frac{T_4}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_5}{100} \right) \right]^4. \end{split}$$

Моделирование процесса зарядки

На нагрев тел тратится энергия Q, которую можно определить, зная удельные характеристики ТЭН:

$$Q = qF$$
,

где q — удельная мощность ТЭН.

Зная удельную мощность ТЭН, можно определить, до какой температуры нагреются элементы экспериментального образца, если составить следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} Q_1 = Q_3 + Q_4 \\ Q_2 + Q_4 = Q_5 \\ Q_3 = Q_6 + Q_7 \\ Q_5 + Q_7 = Q_8 + Q_9 \\ Q_6 + Q_8 + Q_{11} = Q_{10} \\ Q_9 = Q_{12} + Q_{11} \\ Q_{10} = Q_{13} \\ Q_{12} = Q_{14} \\ Q = Q_1 + Q_2 \end{cases}$$

Получается система из 9 уравнений, в которой 9 неизвестных: Т₁, Т₂, Т₃, Т₄, Т₂, Т₃, Т₄, Q₁ и Q₂. Решая эту систему, можно определить какие температуры будут у элементов на стационарном режиме, когда все тепло, выделяемое ТЭН, проходит через тепловой аккумулятор и передается в окружающую среду. Коэффициент теплоотдачи находится из условия теплообмена свободной конвекции в неограниченном пространстве. На практике будет иметь место свободная конвекция между двумя стенками, однако на данном этапе невозможно определить диаметр трубы кожуха. Режим свободной конвекции в неограниченном пространстве является более худшим с точке зрения режима передачи тепла (Термическое сопротивление меньше, поэтому внутренняя часть экспериментального образца нагревается медленнее), поэтому на данном этапе расчета приемлемо считать как свободную конвекцию в неограниченном пространстве [75, 76]. Уравнение теплоотдачи:

$$\alpha = 0.5 \frac{\lambda_{\text{возд}}}{2R_4} \cdot (Gr \cdot Pr)^{0.25} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_w}\right)^{0.25}$$

Однако в рамах проводимого эксперимента важно выяснить не только температуру, до которой догреется тепловой аккумулятор, но и время, за которое произойдет нагрев. Для этого необходимо определить количество тепла, которое будет тратиться на нагрев элементов экспериментального образца:

$$Q = C_{\rm T3H} \cdot \Delta t_{\rm T3H} + c_{\rm внут.} \cdot m_{\rm внут.} \cdot \Delta t_{\rm внут.} + c_{\it TAM} \cdot m_{\it TAM} \cdot \Delta t_{\it TAM} + c_{\rm внеш.} \cdot m_{\rm внеш.} \cdot \Delta t_{\rm внеш.},$$

где $C_{\rm TЭH}$ – теплоёмкость трубчатого электронагревателя,

 $c_{\text{внут.}}$ – удельная теплоёмкость внутренней трубки,

 c_{TAM} - удельная теплоёмкость теплоаккумулирующего материала,

 $c_{\text{внеш.}}$ – удельная теплоёмкость внешней трубки,

 $m_{\text{внут.}}$ – масса внутренней трубки,

 m_{TAM} — масса теплоаккумулирующего вещества,

 $m_{\text{внеш.}}$ – масса внешней трубки,

 Δt_{T3H} — изменение температуры трубчатого электронагревателя,

 $\Delta t_{ ext{внут.}in}$ – изменение температуры внутренней трубки,

 Δt_{TAM} — изменение температуры теплоаккумулирующего материала,

 $\Delta t_{
m внеш.}$ – изменение температуры внешней трубки.

Тогда система уравнений примет следующий вид:

$$\begin{cases} Q_{1} = Q_{3} + Q_{4} \\ Q_{2} + Q_{4} = Q_{5} \\ Q_{3} = Q_{6} + Q_{7} \\ Q_{5} + Q_{7} = Q_{8} + Q_{9} \\ Q_{6} + Q_{8} + Q_{11} = Q_{10} \\ Q_{9} = Q_{12} + Q_{11} \\ Q_{10} = Q_{13} \\ Q_{12} = Q_{14} \\ Q_{0} = C_{\text{T3H}} \cdot n_{\text{T3H}} \cdot \Delta T_{\text{T3H}} + C_{in} \cdot m_{in} \cdot \pi_{in} + c_{TAM} \cdot m_{TAM} \cdot \Delta T_{TAM} + c_{out} \cdot m_{out} \cdot n_{out} \cdot m_{out} \cdot \Delta \tau_{out} \\ Q \cdot \Delta \tau = Q_{1} \cdot \Delta \tau + Q_{2} \cdot \Delta \tau + Q_{0} \end{cases}$$

где $\Delta \tau$ – шаг по времени.

Для решения данной системы уравнений был составлен алгоритм решения в программе Python 3.8 с использованием модулей Numpy, Pandas, Scipy, Fsolve [77].

Для выбора оптимального шага по времени было проведено исследование влияния временного шага на результаты расчета. График изменения температуры модуля теплового аккумулятора в зависимости от выбранного временного шага представлен на рисунке 2.4.

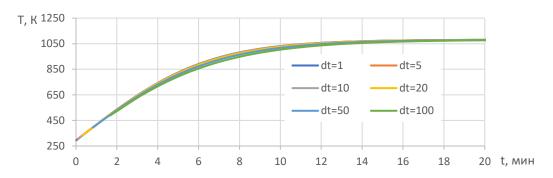


Рисунок 2.4- График изменения температуры модуля теплового аккумулятора в зависимости от временного шага при моделировании нагрева при удельной мощности ТЭН $q=25~\mathrm{Bt/cm^2}$

Видно, что при временном шаге в 10 секунд, уменьшение шага не приводит к значительному изменению результата, так что дальнейшее уменьшение временного шага нерационально.

Оценена зависимость температуры и времени нагрева в зависимости от удельной мощности ТЭН (рисунок 2.5).

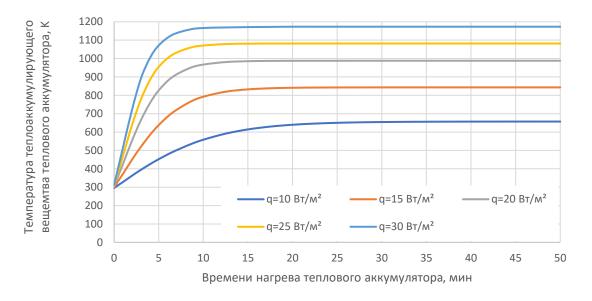


Рисунок 2.5 - Зависимость температуры от времени нагрева для различной удельной мощности ТЭН

Можно увидеть, что необходимая температура (900 °C) достигается при ТЭН с удельной мощностью 30 Вт/см², поэтому для экспериментального образца выбирается ТЭН РНП 16*200;3.0*220 с заданной мощностью.

Моделирование процесса разрядки

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

$$\alpha = 0.021 \frac{\lambda_{\text{возд}}}{d_{\text{akr}}} \text{Re}^{0.8} Pr^{0.43},$$

здесь $d_{\text{экв}}$ — эквивалентный гидравлический диаметр, определяется по величине внутреннего диаметра кожуха и наружной поверхности наружной трубы экспериментального образца.

Временной шаг определяется аналогично процессу зарядки. В качестве начальной температуры была взята температура 900 °С. Для определения рабочего тела, которым будет производиться охлаждение, был произведен ориентировочный расчет, в котором коэффициент теплоотдачи не рассчитывался, а задавался. Результаты такого расчета приведены на рисунке 2.6.

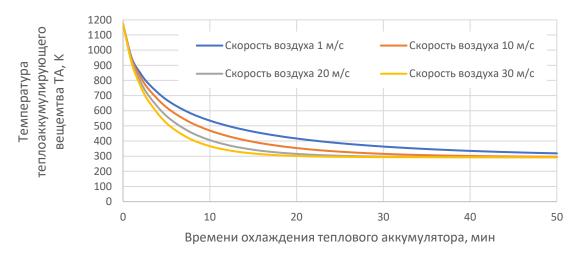


Рисунок 2.6 – Время охлаждения теплового аккумулятора в зависимости от условий теплообмена

Из графика видно, что при охлаждении воздухом со скоростью 30 м/с темп охлаждения совпадает с темпом нагрева, поэтому при экспериментальном исследовании можно использовать воздух, а интенсивность теплоотдачи регулировать при помощи изменения давления

воздуха (что приведет к изменению плотности и, следовательно, коэффициента теплоотдачи) и установки размеров под соответствующий гидравлический диаметр.

Гидравлический диаметр зависит от наружного диаметра внешней трубы экспериментального образца и внутреннего диаметра кожуха. Было произведено моделирование процесса охлаждения при различных внутренних диаметрах кожуха. Результаты моделирования представлены на рисунке 2.7.

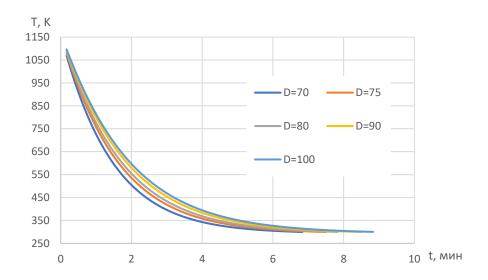


Рисунок 2.7 – Время охлаждения в зависимости от диаметра кожуха

Из графика видно, что в принципе все рассчитанные размеры позволяют охладить тепловой аккумулятор до требуемой температура за заданное время.

В зависимости от диаметра кожуха было определено минимальное проходное сечение в воздухопроводе. Для этого определена величина удельной приведенной скорости:

$$\lambda_{\text{возд}} = \frac{w_{\text{возд}}}{\sqrt{\frac{2k}{k+1}RT^*}} = 0,1$$

Тогда удельный приведенный расход согласно таблицам газодинамических функций [78] равен 0,167. Минимальное потребное проходное сечение определено исходя из условия, что истечение через данное сечение имеет критический режим (скорость равно скорости звука).

В таком случае минимальная площадь проходного сечения будет равна

Удельный расход на звуковом режиме равен 1. Результаты расчета минимального проходного сечения и диаметра, соответствующего минимальному проходному сечения представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Минимальное проходное сечение и диаметр патрубка

D, мм	$S_{\kappa p}, M^2$	D _{патр.мин} , мм
70	8,32565·10 ⁻⁵	10,2
75	0,000172796	14,8
80	0,000267049	18,4
90	0,000477546	24,6
100	0,000706894	30,0

Таким образом, была подготовлена расчетно-математическая модель процессов заряда и разрядка экспериментального образца учетом теплообмена между аккумулятора с 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, а также к окружающей среде. Необходимая температура (900°С) достигается при ТЭН с удельной мощностью 30 Вт/см², поэтому для экспериментального образца выбран ТЭН РНП 16*200;3.0*220 с заданной мощностью. При охлаждении воздухом со скоростью 30 м/с темп охлаждения совпадает с темпом нагрева, поэтому при экспериментальном исследовании можно использовать воздух, а интенсивность теплоотдачи регулировать при помощи изменения давления воздуха (что приведет к изменению плотности и, следовательно, коэффициента теплоотдачи) и установки размеров под соответствующий гидравлический диаметр [79].

2.3 Корректировка математических моделей переходных процессов в модуле теплового аккумулятора

Корректировка математических моделей переходных процессов в модуле теплового аккумулятора по результатам экспериментальных исследований заключается в уточнении значений теоретических показателей или их полной замены на экспериментально полученные значения.

В расчетно-математических моделях переходных процессов используются такие теплофизические величины, как теплопроводность и теплоемкость материалов, коэффициенты теплоотдачи от материала теплового аккумулятора к окружающей среде, значения действительной мощности ТЭН.

Исследование теплофизических свойств материалов теплообменной поверхности теплового аккумулятора и теплоаккумулирующего вещества показало значительное соответствие со значениями, используемыми в справочной литературе [80].

Тогда основной задачей становится определение действительных значений коэффициентов теплоотдачи от теплового аккумулятора к окружающей среде.

Определение коэффициента теплоотдачи при заряде теплового аккумулятора

Для оценки параметров при разрядке (остывании) теплового аккумулятора использовались данные экспериментальных исследований высокотемпературного теплового аккумулятора (глава 6).

Для обработки экспериментальных данных использовались зависимости температуры от времени. Для сравнения использовались процессы охлаждения с незначительным различием начальной температуры, до которой был догрет тепловой аккумулятор в процессе зарядки (рисунок 7.1).

Для определения коэффициента теплопередачи необходимо определить тип аналитической зависимости температуры от времени. Для упрощения расчета предположим, что температура всего теплового аккумулятора

равномерна и равна измеренной температуре. Как показано в главе 1, изменение температуры внутри теплового аккумулятора незначительно по сравнению с разницей температуры между тепловым аккумулятором и окружающей средой.

Математически процесс нагрева можно записать следующим образом:

$$c_{\text{TA}}m_{\text{TA}}dT = qF_{\text{HAF}}d\tau - kF(T_{\text{TA}} - T_{\text{B}})d\tau.$$

Обозначим избыточную температуру $T_{\mathrm{TA}} - \mathrm{T_{\scriptscriptstyle B}}$ как θ .

Тогда:

$$c_{\mathrm{TA}}m_{\mathrm{TA}}d\theta = qF_{\mathrm{Har}}d\tau - kF\theta d\tau$$
,

где $c_{\text{ТА}}m_{\text{ТА}} = \sum c_i m_i$ — сумма произведений теплоемкости и масс всех элементов теплового аккумулятора, включая ТЭН, теплообменную поверхность теплового аккумулятора, кожух теплового аккумулятора, теплоаккумулирующий материал.

Данное уравнение представляет собой линейное однородное дифференциальное уравнение. Для получения зависимости температуры от времени решим его методом разделения переменных. Обозначим следующие константы:

$$E = \frac{qF_{\text{HAF}}}{c_{\text{TA}}m_{\text{TA}}}, F = \frac{kF}{c_{\text{TA}}m_{\text{TA}}}$$

Тогда уравнение примет вид:

$$d\theta = Ed\tau - F\theta d\tau$$

Решим данное уравнение методом разделения переменных:

$$\frac{d\theta}{E-F\theta} = d\tau;$$

$$-\frac{1}{F}\frac{d(E-F\theta)}{E-F\theta} = d\tau;$$

$$-\frac{1}{F}\int \frac{d(E-F\theta)}{E-F\theta} = \int d\tau;$$

$$-\frac{1}{F}\ln(E-F\theta) = \tau + C_1;$$

$$\ln(E-F\theta) = -F\tau + C_2;$$

$$E-F\theta = e^{-F\tau + C_2};$$

$$\theta = E \frac{e^{-F\tau + C_2}}{F}.$$

Очевидно, что необходимо искать зависимость избыточной температуры от времени в виде экспоненциальной зависимости:

В общем виде зависимость будет выглядеть следующим образом:

$$\theta(\tau) = Ae^{B\tau + C} + D$$

Получаем четыре неизвестных: A,B,C и D. Их значения, а также значение коэффициента детерминации представлены в таблице 2.2, а наложение полученной теоретической зависимости на экспериментальные значения представлено на рисунке 2.8.

Таблица 2.2 – Параметры математической зависимости

A	В	C	D	\mathbb{R}^2
-940	-0,001	0,03	1000	0,998

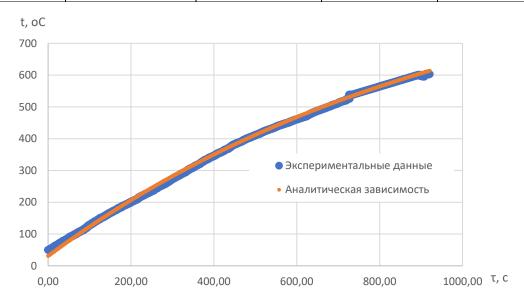


Рисунок 2.8 — Сравнение экспериментальных значений и теоретической зависимости процесса зарядки

Определить коэффициент теплопередачи можно на основе анализа коэффициента В. Сравнивая выражения экспериментальной и аналитических зависимостей, получим:

$$B = -k \frac{F}{c_{\text{TA}} m_{\text{TA}}}.$$

Выражая отсюда коэффициент k, получим значение 24,97 Вт/м 2 К.

Данное значение коэффициента теплопередачи можно использовать для математических моделей, описывающих процессы в данной экспериментальной установке.

Определение коэффициента теплопередачи при разряде теплового аккумулятора

Для оценки параметров при разрядке (остывании) теплового аккумулятора использовались данные экспериментальных исследований высокотемпературного теплового аккумулятора.

Для обработки экспериментальных данных использовались зависимости температуры от времени. Для сравнения использовались процессы охлаждения с незначительным различием начальной температуры, до которой был догрет тепловой аккумулятор в процессе зарядки (рисунок 2.9).

Для определения коэффициента теплопередачи необходимо определить тип аналитической зависимости температуры от времени. Для упрощения расчета предположим, что температура всего теплового аккумулятора равномерна и равна измеренной температуре. Как показано в главе 1, изменение температуры внутри теплового аккумулятора незначительно по сравнению с разницей температур между тепловым аккумулятором и окружающей средой.

Математически процесс остывания можно записать следующим образом:

$$c_{\text{TA}}m_{\text{TA}}dT = -kF(T_{\text{TA}} - T_{\text{B}})d\tau.$$

Обозначим избыточную температуру $T_{\text{TA}} - T_{\text{в}}$ как θ .

Тогда: $c_{\mathrm{TA}}m_{\mathrm{TA}}d\theta = -kF\theta d au$,

где $c_{\text{ТА}}m_{\text{ТА}} = \sum c_i m_i$ — сумма произведений теплоемкости и масс всех элементов теплового аккумулятора, включая ТЭН, теплообменную поверхность теплового аккумулятора, кожух теплового аккумулятора, теплоаккумулирующий материал.

Тогда зависимость избыточной температуры от времени можно будет записать следующим образом:

$$\frac{d\theta}{\theta} = -k \frac{F}{c_{\text{TA}} m_{\text{TA}}} d\tau$$

здесь $\frac{F}{c_{\text{ТА}}m_{\text{ТА}}}$ – константа, обусловленная свойствами материала.

Проинтегрируем обе части уравнения, получим зависимость:

$$\int \frac{d\theta}{\theta} = \int -k \frac{F}{c_{\mathsf{TA}} m_{\mathsf{TA}}} d\tau$$

Тогда получим следующую зависимость:

$$\ln(\theta) = -k \frac{F}{c_{\text{TA}} m_{\text{TA}}} \tau + const$$

Возведем обе части уравнения в степень е, получим:

$$\theta = e^{-k\frac{F}{c_{\text{TA}}m_{\text{TA}}}\tau + const}$$

Очевидно, что необходимо искать зависимость избыточной температуры от времени в виде экспоненциальной зависимости:

В общем виде зависимость будет выглядеть следующим образом:

$$\theta(\tau) = Ae^{B\tau + C} + D$$

Получаем четыре неизвестных: A,B,C и D.

При бесконечно долгом остывании избыточная температура стремится к 0, т.е. D=0. Осталось определить коэффициенты A,B и C. Их значения, а также значение коэффициента детерминации представлены в таблице 2.3, а наложение полученной теоретической зависимости на экспериментальные значения представлено на рисунке 2.9.

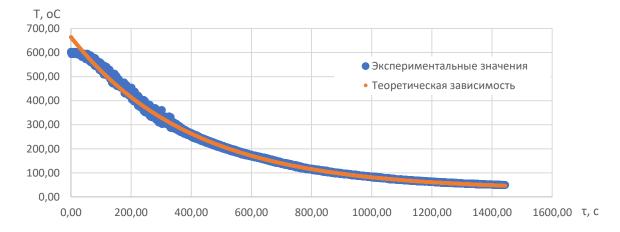


Рисунок 2.9 — Сравнение экспериментальных значений и теоретической зависимости процесса разрядки

Таблица 2.3 – Данные о полученной теоретической зависимости

A	В	С	\mathbb{R}^2
610	-0,0025	0,04	0,994

Определить коэффициент теплопередачи можно на основе анализа коэффициента В. При сравнении выражения экспериментальной и аналитической зависимостей было получено:

$$B = -k \frac{F}{c_{\rm TA} m_{\rm TA}}$$

Выражая отсюда коэффициент k, получим значение 62,45 Bт/м²К.

Определение коэффициента теплопередачи также можно выполнить на основе анализа уравнения

$$\frac{d\theta}{\theta} = -k \frac{F}{c_{\text{TA}} m_{\text{TA}}} d\tau.$$

$$k = \frac{F}{c_{\text{TA}} m_{\text{TA}}} \cdot - \frac{\frac{d\theta}{\theta}}{d\tau}$$

При интегрировании числителя и знаменателя от произвольных точек по времени было получено следующее выражение:

$$k = \frac{F}{c_{\text{TA}}m_{\text{TA}}} \cdot - \frac{\int_{\tau_1}^{\tau_2} \frac{d\theta}{\theta}}{\int_{\tau_1}^{\tau_2} d\tau} = \frac{F}{c_{\text{TA}}m_{\text{TA}}} \cdot - \frac{\ln \theta(\tau_2) - \ln \theta(\tau_1)}{\Delta \tau}$$

Коэффициент теплопередачи постоянный на протяжении определенного временного шага. Необходимо задаться величиной этого временного шага. Так как у оборудования есть предел чувствительности, то выбор минимального шага не обязательно гарантирует высокую точность расчета. Выберем, величину временного шага 50 с. Для расчета используем экспериментальные данные, использовавшиеся для получения теоретической зависимости. Результаты расчета представлены на рисунке 2.10.

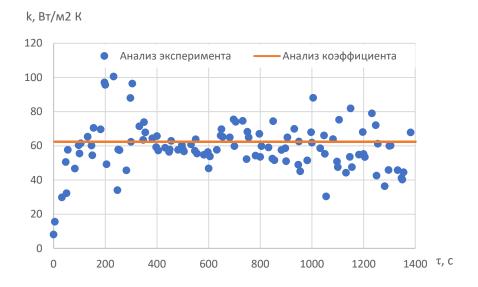


Рисунок 2.10 – Зависимость коэффициента теплопередачи от времени

Можно отметить, что величина коэффициента теплоотдачи незначительно меняется от времени и в большинстве своем находится в диапазоне между 40 и 80 Bt/м 2 K.

Определим стандартное отклонение для коэффициента теплопередачи:

$$S_k = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (k_i - \bar{k})^2}.$$

Тогда величина коэффициента теплоотдачи будет равна $59,17\pm17,3$ Вт/м 2 К. Отклонение среднего значения от величины, полученной анализом коэффициента В составляет 5,53%.

Данное значение коэффициента теплопередачи можно использовать для математических моделей, описывающих процессы в данной экспериментальной установке.

Таким образом, была подготовлена и верефицирована расчётноматематическая 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, а также к окружающей среде. Учет нестационарности и фазового перехода позволяет обеспечить точность определения рабочих параметров и выбор наиболее эффективного режима работы теплового аккумулятора.

З ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА РАБОТУ ТЕПЛОВОГО АККУМУЛЯТОРА

3.1 Подготовка модели

Численные исследования влияния геометрических параметров теплообменных поверхностей на эффективность процессов переноса теплоты при течении воздуха осуществлялись в программном комплексе Ansys Fluent. В качестве расчётной модели был выбран макетный образец теплового аккумулятора, состоящий из двух единичных модулей (рисунок 3.1).

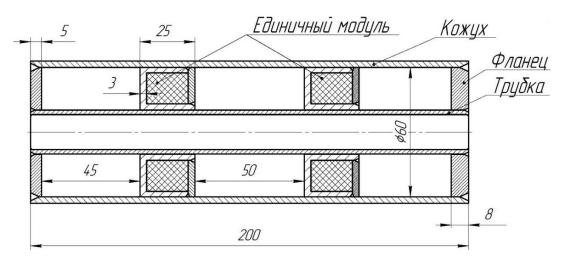


Рисунок 3.1 - Макетный образец теплового аккумулятора

В качестве исходных данных были определены параметры, представленные в таблице 3.1

Таблица 3.1 — Параметры рабочего тела для численного исследования влияния геометрических параметров теплообменных поверхностей

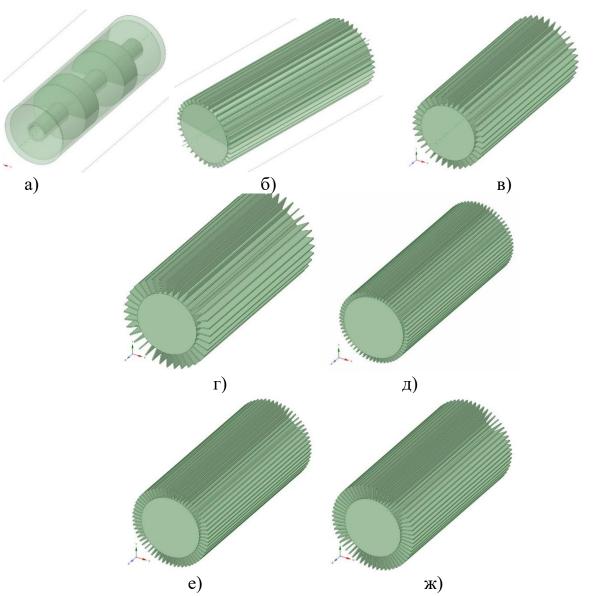
№	Параметр	Значение
1	Расход рабочего тела, кг/с	0,36
2	Температура рабочего тела, °С	0
3	Давление рабочего тела на выходе из теплового аккумулятора, Па	101325

В качестве рабочего тела использовался воздух с температурой 0°С. Для исследования влияния геометрических параметров теплообменных поверхностей на эффективность процессов переноса теплоты поверхность теплообмена макетного образца была оребрена в соответствии с таблицей 3.2.

Таблица 3.2 – Параметры оребрения макетного образца

Ромионт	Высота	Ширина	Количество	Площадь
Вариант	ребра, мм	ребра, мм	рёбер, шт	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

Расчётные модели исследуемых макетных образцов представлены на рисунке 3.2



а) без оребрения, б) вариант 1, в) вариант 2, г) вариант 3, д) вариант 4, е) вариант 5, ж) вариант 6.

Рисунок 3.2 – Расчётные модели исследуемых макетных образцов

Численное моделирование проводилось для следующих вариантов начальной температуры единичных модулей теплового аккумулятора 600, 700, 800, 900°С. Полная вариация расчётов представлен в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Параметры оребрения единичных модулей макетных образцов

№ расчёта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Вариант оребрения	Б/о	1	2	3	4	5	6	Б/о	1	2	3
Температура единичных модулей, °С	600	600	600	600	600	600	600	700	700	700	700
№ расчёта	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Вариант оребрения	4	5	6	Б/о	1	2	3	4	5	6	Б/о
Температура единичных модулей, °С	700	700	700	800	800	800	800	800	800	800	900
№ расчёта	23	24	25	26	27	28					
Вариант оребрения	1	2	3	4	5	6					
Температура единичных модулей, °С	900	900	900	900	900	900					

3.2 Численное моделирование

Результаты численного моделирования представлены на рисунках 3.3 – 3.10 и в Приложении A.

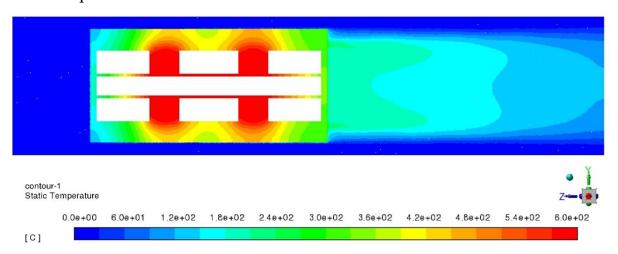


Рисунок 3.3 – Поле распределения температуры воздуха и единичных модулей с вариантом оребрения № 6 при температуре 600°C

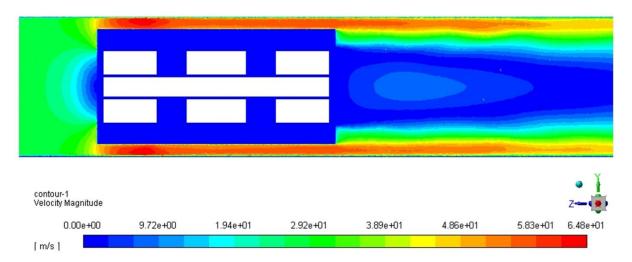


Рисунок 3.4 – Поле распределения скорости воздуха при обтекании единичных модулей с вариантом оребрения № 6 при температуре 600°C

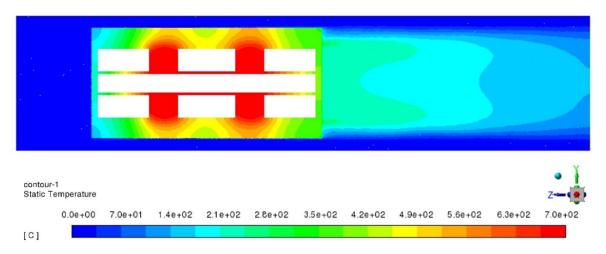


Рисунок 3.5 – Поле распределения температуры воздуха и единичных модулей с вариантом оребрения № 6 при температуре 700°C

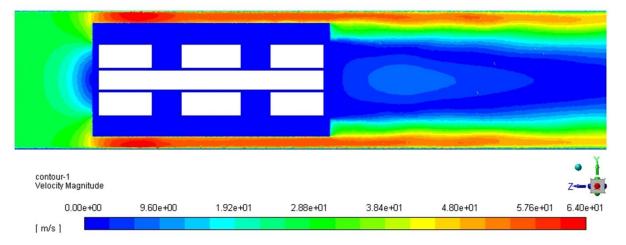


Рисунок 3.6 – Поле распределения скорости воздуха при обтекании единичных модулей с вариантом оребрения № 6 при температуре 700°C

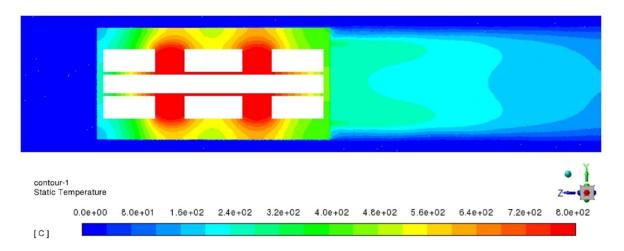


Рисунок 3.7 – Поле распределения температуры воздуха и единичных модулей с вариантом оребрения № 6 при температуре 800°C

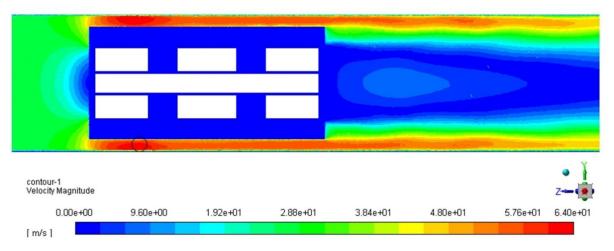


Рисунок 3.8 – Поле распределения скорости воздуха при обтекании единичных модулей с вариантом оребрения № 6 при температуре 800°C

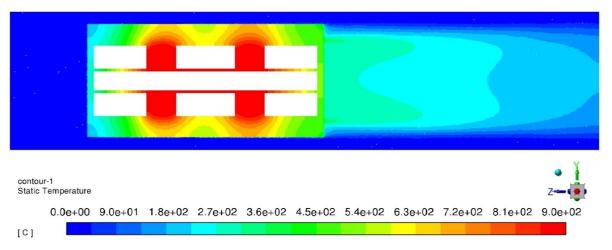


Рисунок 3.9 – Поле распределения температуры воздуха и единичных модулей с вариантом оребрения № 6 при температуре 900°C

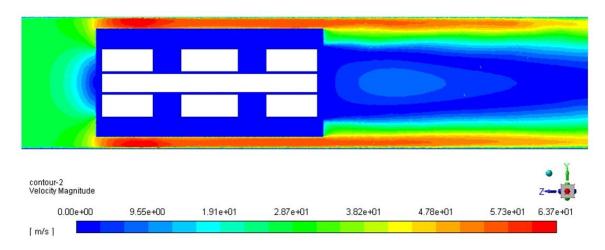


Рисунок 3.10 – Поле распределения скорости воздуха при обтекании единичных модулей с вариантом оребрения № 6 при температуре 900°C

3.3 Анализ полученных результатов

По результатам численного моделирования были получены температура рабочего тела после прохождения единичных модулей (таблица 3.4), изменение количества движения (таблица 3.5), коэффициент теплоотдачи единичных модулей макетных образцов (таблица 3.6).

Таблица 3.4 — Температура рабочего тела после прохождения единичных модулей макетных образцов

Вариант оребрения Темпе-	Без оребрения	1	2	3	4	5	6
ратура единичных модулей, °C			-	о тела по	-	хождени зцов, °С	Я
600	33,37	47,38	62,31	83,94	50,72	74,85	94,85
700	36,94	55,24	75,34	105,08	59,85	92,85	114,85
800	40,25	62,78	88,53	126,71	68,85	113,85	134,85
900	42,85	67,67	97,33	141,45	77,85	128,18	150,85

Таблица 3.5 – Изменение количества движения

Вариант оребрения Темпе-ратура	Без оребрения	1	2	3	4	5	6
единичных модулей, °C	Изменение количества движения, кг⋅м/с2						
600	0,1908	0,1548	0,4968	0,6948	0,3384	0,6912	0,72
700	0,2376	0,2196	0,6228	0,8028	0,4968	0,7884	0,882
800	0,2808	0,4068	0,72	1,0764	0,7344	1,026	1,134
900	0,3096	0,576	0,7848	1,3212	1,0404	1,17	1,422

Таблица 3.6 – Коэффициент теплоотдачи единичных модулей макетных образцов

Вариант оребрения Темпе- ратура	Без оребрения	1	2	3	4	5	6
единичных	Коэффі	ициент	теплоот	дачи ед	иничнь	іх моду.	лей
модулей, °С		маке	тных о	бразцов	$, B_T/M^2$	(
600	109,41	87,99	81,6	97,39	66,16	69,4	103,88
700	102,15	81,57	76,76	93,53	61,41	64,8	97
800	96,12	77,77	72,87	90,31	55,29	59,5	93,6
900	92,63	73,97	70,69	88,41	51,69	56	91

Зависимость повышения температуры рабочего тела от температуры единичных модулей для разной схемы оребрения представлена на рисунке 3.14.

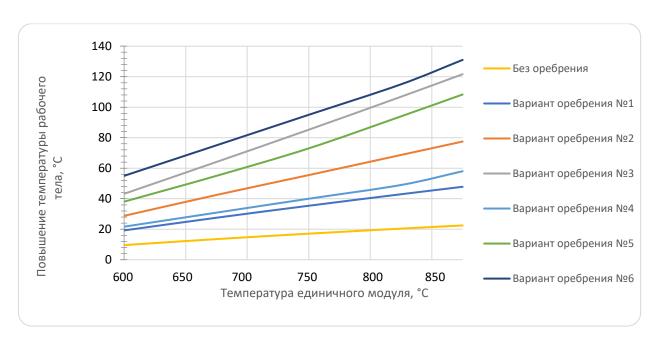


Рисунок 3.14 — Зависимость повышения температуры рабочего тела от температуры единичных модулей макетных образцов для разной схемы оребрения

Зависимость изменения количества движения от температуры единичных модулей макетных образцов для разной схемы оребрения представлена на рисунке 3.15

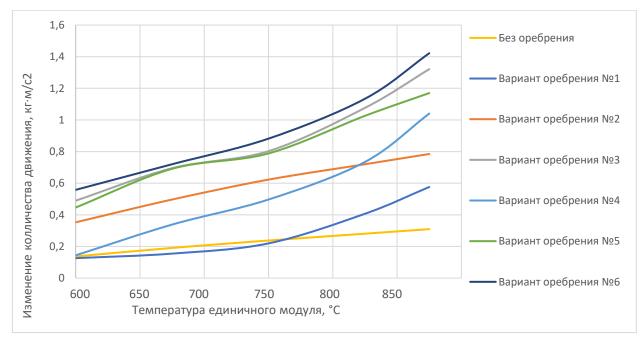


Рисунок 3.15 — Зависимость изменения количества движения от температуры единичных модулей макетных образцов для разной схемы оребрения

Зависимость изменения коэффициента теплоотдачи единичных модулей макетного образца от температуры единичных модулей для разной схемы оребрения представлена на рисунке 3.16

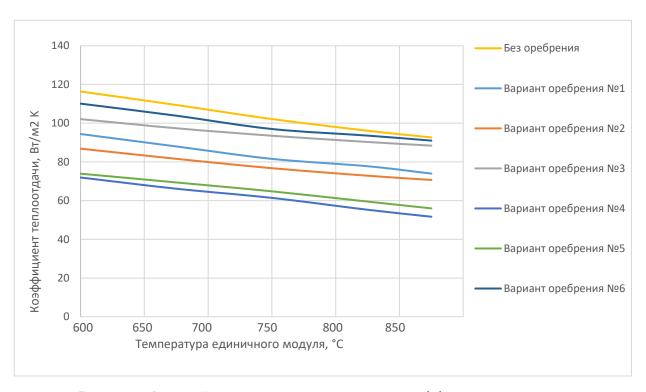


Рисунок 3.16 — Зависимость изменения коэффициента теплоотдачи единичных модулей макетных образцов от температуры единичных модулей для разной схемы оребрения

По результатам численного моделирования наибольший нагрев рабочего тела происходит при 6 варианте оребрения. Температура рабочего тела в зависимости от температуры единичных модулей и варианта схемы оребрения повышается от 9,6 до 131 °C. Наибольший коэффициент теплоотдачи достигается в варианте без оребрения и варьируется от 92,63 - 116,38 Вт/м²К в зависимости от температуры.

Результаты подобрать численного моделирования позволяют оптимальные геометрические характеристики для поддержания заданного температурного режима для подогрева рабочего тела в диапазоне температуры единичных модулей от 600 до 900°C. Результаты позволяют выбрать необходимые геометрические размеры И количество модулей ДЛЯ высокотемпературного теплового аккумулятора.

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ТЕПЛОВОГО АККУМУЛЯТОРА.

4.1 Описание экспериментальной установки и образцов для испытания

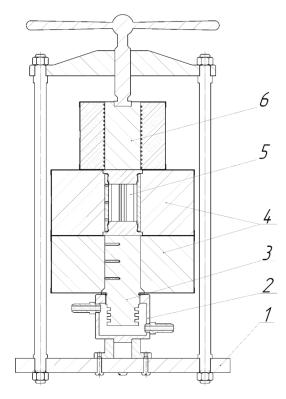
Накопление сведений о влиянии структуры и материала теплообменной поверхности теплового аккумулятора является важной задачей при проектировании и изготовлении изделий.

В настоящее время известно большое многообразие видов и конструкций тепловых аккумуляторов, обусловленное широким спектром областей применения аккумуляторов тепла.

Традиционно рассматриваются тепловые аккумуляторы с неподвижной или подвижной теплообменной поверхностью. Использование неподвижной теплообменной поверхности обеспечивает максимальную простоту конструкции, но требует больших масс теплоаккумулирующего материала. Кроме этого, температура теплоносителя на выходе из аккумулятора изменяется в течение времени, что требует дополнительной системы поддержания постоянных параметров путем перепуска.

Использование подвижной теплообменной поверхности предполагает применение тепловых аккумуляторов, как правило, в виде вращающегося регенератора, устройств с падающими шарами и т. п. Такие аккумуляторы применяются в аппаратах регенерации тепловой энергии, и вследствие малой продолжительности рабочего цикла они имеют небольшие конструктивные размеры. Для тепловых аккумуляторов с подвижной теплообменной поверхности характерна постоянная температура газа на выходе.

Общий вид экспериментальной установки для исследования влияния структуры и материала теплообменной поверхности на характеристики модуля теплового аккумулятора представлен на рисунке 4.1.



1 – станина; 2– холодильник; 3 – стержень охлаждения;

4 — теплоизоляционный материал; 5 — исследуемый образец; 6 — нагреватель Рисунок 4.1 — Экспериментальная установка

Экспериментальная установка состоит из станины 1, холодильника 2, металлического стержня охлаждения 3, теплоизоляционного материала 4, исследуемого образца 5, нагревателя 6.

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

Материал металлического стержня 3 — сталь 12X18H10T. Коэффициент теплопроводности данного материала равен — $\lambda=16$ Вт/(м·град). Нагреватель 6 необходим для подвода тепла к исследуемому образцу 5. Нагреватель питается через автотрансформатор, что позволяет задавать различную мощность нагрева. Через холодильник 2 с помощью штуцеры 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.

Стержень 3 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 сверление 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.

Схема подключения и циркуляции контура охлаждения, крепление металлического стержня охлаждения приведены на рисунке 4.2.

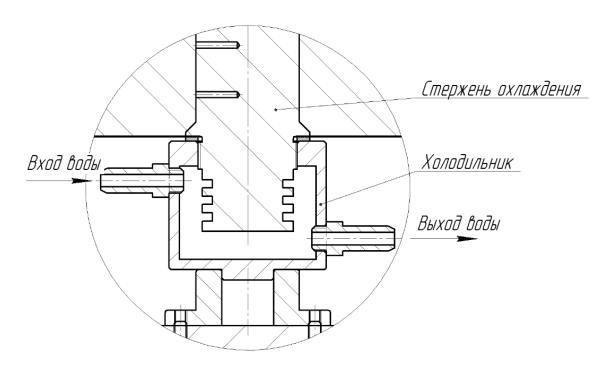


Рисунок 4.2 – Схема подключения контура охлаждения

Конструкция образцов для испытаний изображена на рисунках, приведенных ниже.

Образец для испытания №1 (рисунок 4.3) представляет собой цилиндр с внутренними теплоотводящими ребрами. Ребра необходимы для интенсификации процесса теплопередачи от теплообменной поверхности к теплоаккумулирующему веществу, которое находится внутри цилиндра. Количество ребер у образца для испытания №1 составляет 6 штук. Ребра имеют прямоугольное сечение размерами 15х4 мм. Ребра выполнены заедино с боковой поверхностью цилиндра. Образец изготовлен из ниобия.

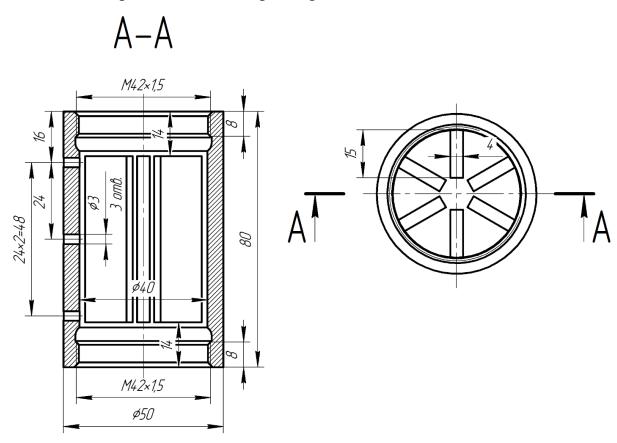
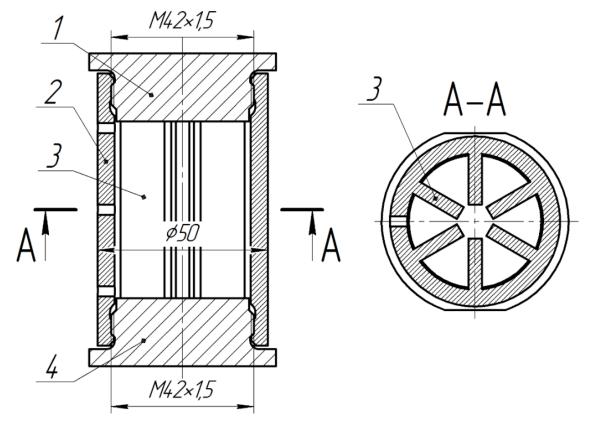


Рисунок 4.3 – Образец для испытания №1 без крышек

Образец для испытаний №1 в сборе показан на рисунке 4.4. Крышка верхняя 1 и крышка нижняя 4 крепятся к цилиндру 2 с помощью резьбового соединения. Данное решение обусловлено технологическими ограничениями при изготовлении образца. Резьбовое соединение деталей также позволяет разобрать модуль теплового аккумулятора.

Нагрев модуля для испытания осуществляется путем контакта крышки верхней 1 с нагревателем. Крышка верхняя контактирует с металлическим стержнем нагревателя (рисунок 4.5). Для определения температуры в

исследуемом образце предусмотрены отверстия, в которые установлены термопары. Расстояние между отверстиями для термопар составляет 24 мм.



1-крышка верхняя; 2-цилиндр; 3-ребра; 4-крышка нижняя Рисунок 4.4 — Образец для испытания в сборе

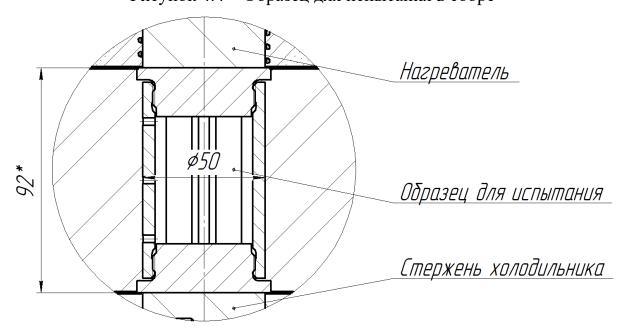


Рисунок 4.5 – Расположение исследуемого образца

Образец для испытания №2 представляет собой схожую конструкцию с образцом для испытания №1. Отличие заключается в количестве ребер

теплообменной поверхности (четыре ребра) внутри цилиндра образца. Схематичное изображение образца для испытания №2 представлено на рисунке 4.6. Четыре ребра прямоугольного сечения размерами 15х4 мм выполнены заодно с корпусом цилиндра. Образец в сборе показан на рисунке 4.7.

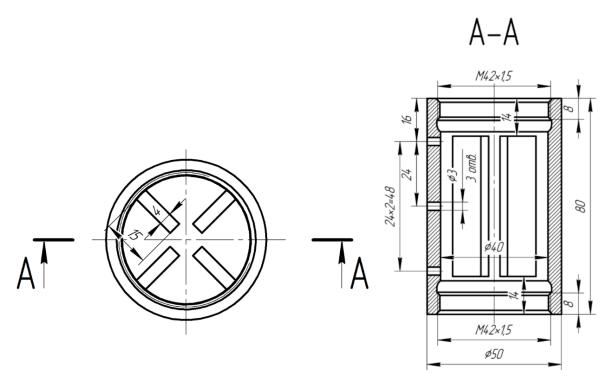
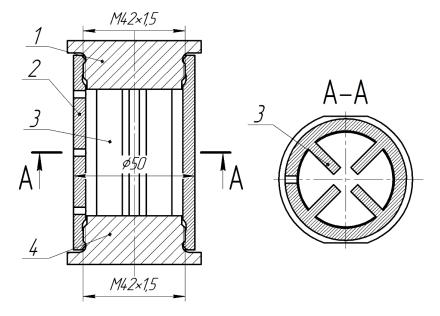


Рисунок 4.6 – Образец для испытания №2



1-крышка верхняя; 2-цилиндр; 3-ребра; 4-крышка нижняя Рисунок 4.7 — Образец для испытания №2 в сборе

4.2 Описание эксперимента и методики расчета

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. В данной работе используется метод стационарного теплового потока, основанный на измерении плотности теплового потока q, $grad\ t$ и вычислении теплопроводности λ по следующей формуле:

$$\lambda = \frac{|\vec{q}|}{|grad\ t|}$$

Из данной формулы следует, что теплопроводность численно равна количеству тепла, проходящего в единицу времени через единицу площади изотермической поверхности при значении градиента температуры на ней, равного единице.

Для нахождения коэффициента теплопроводности в данном эксперименте применен метод продольного теплового потока. Вдоль образца с площадью поперечного сечения F создается равномерный тепловой поток Q. Между двумя сечениями образца, расположенными на расстоянии l друг от друга, измеряют разность температур $\Delta t = t_2 - t_1$.

При отсутствии боковых тепловых потерь (что достигается применением вдоль стержня теплоизолятора, который минимизирует тепловые потери в радиальном направлении), теплопроводность вычисляют по формуле

$$\lambda_c = \frac{Q_c \cdot l_c}{F_c \cdot (t_{c2} - t_{c1})}$$

где λ_c — коэффициент теплопроводности металлического стержня (Bт/м·°C), l_c — расстояние между сечениями, в которых установлены термопары (м), F_c — площадь поперечного сечения стержня (м²), t_{c2} и t_{c1} — температуры в соответствующих сечениях (°C).

При такой конфигурации образца становится возможным создать одномерное температурное поле и достаточно точно измерить разность температуры, а также точно измерить расстояние между изотермическими плоскостями l.

В данном эксперименте исследованы образцы с теплообменной поверхности из ниобия с разной структурой: с четырьмя и шестью ребрами внутри цилиндра.

В качестве теплоаккумулирующего вещества использовано теплоаккумулирующее вещество LiF. Температура плавления составляет 848°С. Для определения влияния структуры и материала теплообменной поверхности на эквивалентную теплопроводность теплового аккумулятора необходимо провести ряд экспериментов. Нужно испытать образцы из ниобия с разной структурой теплообменной поверхности (образец для испытания №1 и образец для испытания №2) с теплоаккумулирующим веществом LiF, а также провести численное моделирование образцов, выполненных из других материалов. Верификация модели ДЛЯ численного моделирования осуществляется на эксперименте образцов из ниобия. Это необходимо для качественной картины взаимодействия теплообменной формирования поверхности и теплоаккумулирующего вещества между собой, так как это и будет определять эффективность теплового аккумулятора.

Эксперимент также необходимо проводить с разной мощностью нагревателя для изменения нагрева образца. Это вызвано зависимостью коэффициента теплопроводности материалов от температуры.

Коэффициент теплопроводности образца из ниобия имеет следующее значение: λ =53 Bt/(м·град).

4.3 Экспериментальные данные и результаты расчета

На начальном этапе рассчитан объем внутренней полости образцов для испытания №1 и №2. Объем внутренней полости «образца для испытания №1» составил $V=46,67\cdot10^{-6}$ м³. Объем внутренней полости «образца для испытания №2» составил $V=52,89\cdot10^{-6}$ м³.

В ходе экспериментов были получены значения температуры в исследуемых образцах и нижнем металлическом стержне. Эксперименты были проведены для различных структур теплообменной поверхности образца, выполненного из ниобия. В таблице 4.1 представлены данные для исследуемых образцов из ниобия и различных структур теплообменной поверхности при различных режимах работы нагревателя.

Таблица 4.1 – Значения температуры в образцах из ниобия

		Температура			Температура		
Наименование	Мощность	исследуемого			металлического		
образца	нагрева, Вт	образца, °С			стержня, °С		
_		t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6
Образец для испытания	50	105,3	98,2	93,9	67,2	54,3	41,8
№1 из ниобия	100	157,3	149,4	138,4	107,3	84,3	61,5
Образец для испытания	50	102,3	95,2	88,2	67,2	57,1	41,8
№2 из ниобия	100	149,3	141,4	132,1	107,3	78,8	61,5

По полученным в ходе эксперимента 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 представлены в таблице 4.2

Таблица 4.2 — Коэффициент теплопроводности модуля теплового аккумулятора из ниобия

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

В результате проведенного исследования подтверждено, что параметры теплообменной поверхности оказывает значительное влияние на эффективную теплопроводность всего модуля. При мощности нагрева 100 Вт значение коэффициента теплопроводности для образца №1 составило 38 Вт/(м·град), для образца №2 коэффициент теплопроводности равен 43 Вт/(м·град).

Установлена зависимость коэффициента теплопроводности от температуры (мощности нагрева). С ростом мощности (и, соответственно, температуры) значения теплопроводности увеличиваются для обоих образцов.

Полученные экспериментальные данные для образцов из ниобия использованы для верификации разработанной математической модели.

5 МЕТОД ПРОЕКТНОГО РАСЧЁТА ТЕПЛОВОГО АККУМУЛЯТОРАДЛЯ ПРЕДПУСКОВОГО ПОДОГРЕВА ДВС ЛА.

5.1 Способ оценки эффективности предпускового подогрева тепловым аккумулятором.

Способ оценки эффективности предпускового подогрева тепловым аккумулятором в зависимости от температурного диапазона работы двигателя внутреннего сгорания летательного аппарата включает в себя следующие пункты:

- расчет расхода топлива при прогреве без предпускового подогрева двигателя внутреннего сгорания летательного аппарата от теплового аккумулятора [81];
- расчет времени прогрева без предпускового подогрева двигателя внутреннего сгорания летательного аппарата от теплового аккумулятора;
- расчет расхода топлива при прогреве после предпускового подогрева двигателя внутреннего сгорания летательного аппарата от теплового аккумулятора;
- расчет времени предпускового подогрева двигателя внутреннего сгорания летательного аппарата от теплового аккумулятора;
- определение времени прогрева двигателя внутреннего сгорания летательного аппарата при предпусковом подогреве от теплового аккумулятора;
- определение изменения расхода топлива при предпусковом подогреве двигателя внутреннего сгорания летательного аппарата от теплового аккумулятора.

5.2 Метод проектного расчёта теплового аккумулятора

Метод проектного расчёта теплового аккумулятора для двигателей внутреннего сгорания летательных аппаратов, алгоритм которого представлен на рисунке 5.1, включает в себя математическую модель теплового аккумулятора, учитывающую нестационарность процессов и фазовый переход

рабочего тела и способ оценки эффективности предпускового подогрева тепловым аккумулятором в зависимости от температурного диапазона работы.

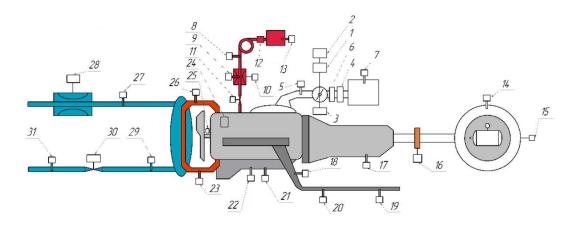


Рисунок 5.1 – Алгоритм метода проектного расчета теплового аккумулятора

Для верификации метода проектного расчета (рисунок 5.1) теплового аккумулятора был разработан и изготовлен низкотемпературный тепловой аккумулятор и проведены экспериментальные исследования режимов заряда и разряда системы хранения тепловой энергии.

5.3 Экспериментальные исследования теплового аккумулятора на моторном стенде

Для проведения исследования был использован моторный стенд лаборатории двигателей внутреннего сгорания кафедры Теплотехники и тепловых двигателей Самарского университета, блок схема которого представлена на рисунке 5.2. Для поддержания нормальных условий во время испытаний в помещении лаборатории смонтирована приточно-вытяжная вентиляция с подогревом приточного воздуха и вытяжка отработавших газов от двигателя.



- I шаговый двигатель, 2 –потенциометр, 3 датчик положения дроссельной заслонки, 4 –датчик массового расхода воздуха,
- 5 датчик давления воздуха, 6 регулятор холостого хода, 7 датчик температуры воздуха, 8 датчик давления топлива, 9 датчик температуры топлива, 10 расходомер топлива, 11 электромагнитный клапан, 12 топливный насос,
- 13 датчик уровня топлива, 14 датчик температуры, 15 датчик момента, 16 датчик оборотов,
- 17 датчик температуры коробки передач, 18 кислородный датчик, 19 датчик давления выхлопных газов, 20 датчик температуры выхлопных газов, 21 датчик давления масла, 22 датчик температуры масла ,
- 23 датчик температуры охлаждающей жидкости, 24 датчик фаз, 25 датчик положения коленчатого вала, 26 датчик температуры охлаждающей жидкости, 27 датчик температуры воды на выходе, 28 электромагнитный клапан, 29 датчик температуры воды на входе, 30 электромагнитный клапан, 31 датчик давления воды на входе,

Рисунок 5.2 - Структурная схема моторного стенда

состав испытательного стенда входит балансирная машина VEM GPFc 13h с весовым устройством, тахогенератором для определения скорости вращения вала двигателя и вентилятором для независимого охлаждения. Система топливоподачи включает в себя: топливный бак; топливоподкачивающий насос, фильтр, соединительные трубопроводы. Для охлаждения двигателя установлена система охлаждения закрытого типа, включающая в себя: расширительный бачок, соединительные патрубки, водоводяной теплообменник, трубопроводы подвода и отвода воды от центрального водоснабжения. Система выпуска отработавших газов состоит штатной выхлопной системы, подключенной через газоанализатор Автотест 02.03П класса 0 к вытяжной системе вентиляции. Система впуска так же состоит из штатной впускной системы. Далее для контроля работы систем установки используется пульт дистанционного управления двигателем и электротормозной установкой. На пульте управления установлены: цифровой блок контроля для установки требуемой величины скорости вращения и крутящего момента двигателя, приборы для аналогового измерения числа оборотов и тока в цепи якорей, переключатели для выбора направления

вращения динамометра и остальная аппаратура, необходимая для работы динамометра и аварийной сигнализации. Требуемое значение скорости вращения и крутящего момента настраивается на персональном компьютере, подключенном к блоку управления стенда. Управление открытием дроссельной заслонкой также вынесено на пульт дистанционного управления двигателем. Внешний вид стенда представлен на рисунках 5.3 и 5.4.



Рисунок 5.3 – Фотография моторного стенда с двигателем



Рисунок 5.4 - Фотография двигателя на моторном стенде

Для исследования экспериментальных зависимостей параметров теплового аккумулятора, а именно время заряда теплового аккумулятора и время разряда теплового аккумулятора в состав стенда включен экспериментальный образец теплового аккумулятора. Схема моторного

стенда с тепловым аккумулятором представлена на рисунке 5.5.

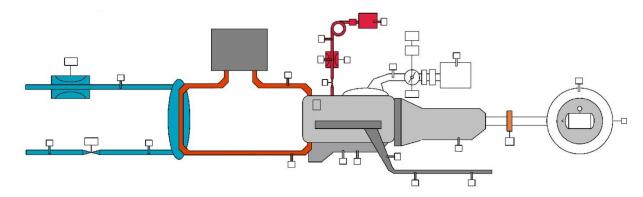
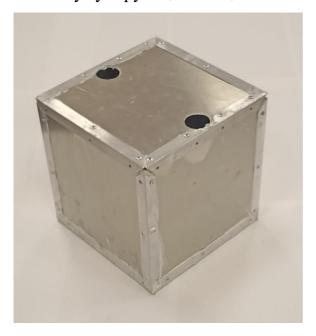


Рисунок 5.5 - Схема моторного стенда с тепловым аккумулятором Экспериментальный образец теплового аккумулятора состоит из корпуса теплового аккумулятора (рисунок 5.6), теплообменника (рисунок 5.7), теплоаккумулирующего вещества и теплоизоляционного кожуха.



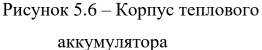




Рисунок 5.7 — Теплообменник теплового аккумулятора

Теплообменник в корпусе теплового аккумулятора представлен на рисунке 5.8. Тепловой аккумулятор заполенный теплоаккумулирующим веществом представлен на рисунке 5.9. Тепловой аккумулятор в сборе представлен на рисунке 5.10. Установленный тепловой аккумулятор, согласно схеме моторного стенда с тепловым аккумулятором, представлен на рисунках 5.11 и 5.12.



Рисунок 5.8 – Теплообменник в корпусе теплового аккумулятора



Рисунок 5.9 – Тепловой аккумулятор заполенный теплоаккумулирующим веществом



Рисунок 5.10 – Тепловой аккумулятор в сборе



Рисунок 5.11 – Фотография теплового аккумулятора на моторном стенде (вид сбоку)



Рисунок 5.12 — Фотография теплового аккумулятора на моторном стенде (вид сверху)

Экспериментальные зависимости времени заряда и времени разряда для двух вариантов массы теплоаккумулирующего вещества представлены на рисунках 5.13 и 5.14.

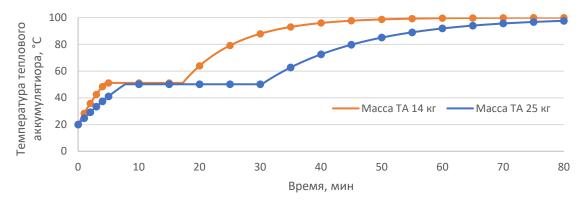


Рисунок 5.13 - Экспериментальные зависимости времени заряда

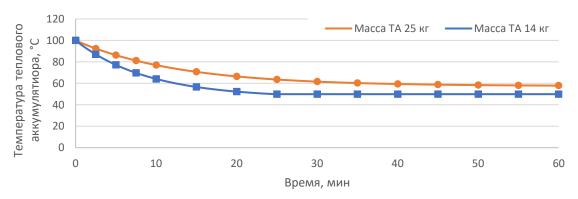


Рисунок 5.14 - Экспериментальные зависимости времени разряда

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 температуру теплоаккумулирующего вещества, но и количество запасенной энергии. Для оценки оставшегося запаса тепловой энергии в тепловом аккумуляторе представлены зависимости снижения запасенной энергии теплового аккумулятора до 50% от запасенной в зависимости от времени для различных условий окружающей среды и массы теплового аккумулятора представлено на рисунках 5.15 - 5.20.

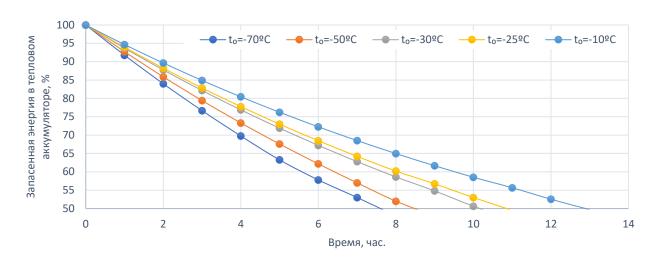


Рисунок 5.15 — Зависимость запасенной энергии теплового аккумулятора от времени хранения при массе теплоаккумулирующего вещества равной 5 кг.

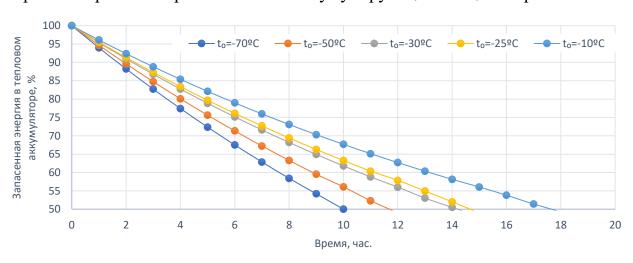


Рисунок 5.16 – Зависимость запасенной энергии теплового аккумулятора от времени хранения при массе теплоаккумулирующего вещества равной 10 кг.

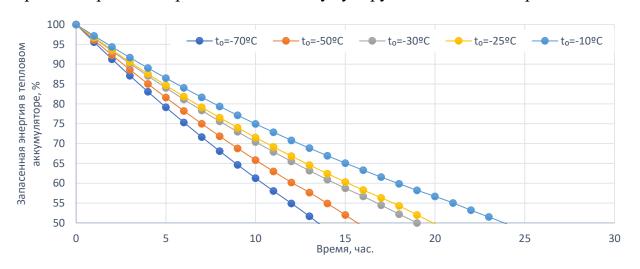


Рисунок 5.17 — Зависимость запасенной энергии теплового аккумулятора от времени хранения при массе теплоаккумулирующего вещества равной 20 кг.

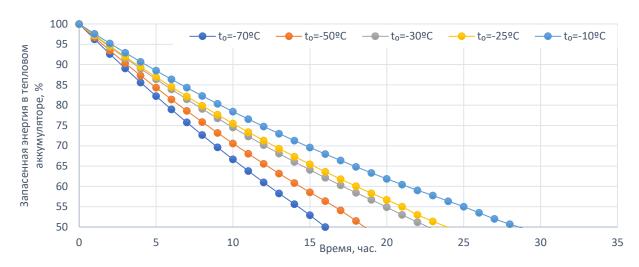


Рисунок 5.18 – Зависимость запасенной энергии теплового аккумулятора от времени хранения при массе теплоаккумулирующего вещества равной 30 кг.

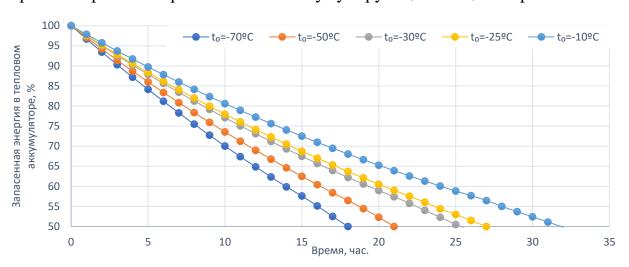


Рисунок 5.19 — Зависимость запасенной энергии теплового аккумулятора от времени хранения при массе теплоаккумулирующего вещества равной 40 кг.

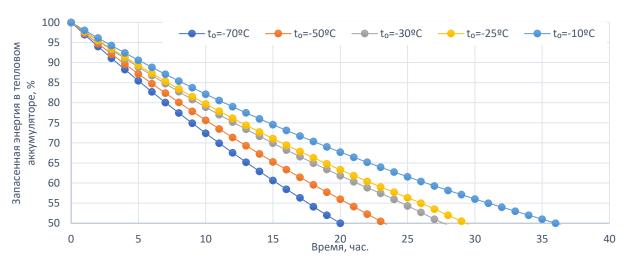


Рисунок 5.20 — Зависимость запасенной энергии теплового аккумулятора от времени хранения при массе теплоаккумулирующего вещества равной $50~\rm kr$.

Анализ зависимости запасенной энергии теплового аккумулятора от времени хранения и массы теплоаккумулирующего вещества показал, что время сохранения более 50% от запасенной энергии составляет от 7,5 до 13 часов для 5 кг теплоаккумулирующего вещества и от 20 до 37 часов для 50 кг теплоаккумулирующего вещества при температуре окружающего воздуха от -70°C до -25°C.

При использовании теплового аккумулятора для предпускового подогрева двигателя внутреннего сгорания эффективность данного процесса оценивается такими параметрами как сокращение расхода топлива на режиме прогрева и изменение времени прогрева ДВС. Для оценки изменения времени прогрева ДВС введен коэффициент сокращения времени прогрева ДВС, который определяется по следующей формуле:

$$k_{ au} = rac{ au_{ extsf{ABC}} - au_{ extsf{ABC.TA}}}{ au_{ extsf{ABC}}} \cdot 100\%,$$

где $au_{\rm двc}$ — время прогрева ДВС до заданной температуры без предпускового подогрева, $au_{\rm двc.тa}$ - время прогрева ДВС до заданной температуры с подогревом от теплового аккумулятора.

Для оценки изменения расхода топлива на прогрев ДВС введен коэффициент сокращения потребления топлива на режиме прогрева ДВС, который определяется по следующей формуле:

$$k_{ ext{топл}} = \frac{m_{ ext{топл.двс}} - m_{ ext{топл.та}}}{m_{ ext{топл.двс}}} \cdot 100\%,$$

где $m_{\text{топл.двс}}$ — масса топлива затраченного на прогрев ДВС до заданной температуры без предпускового подогрева, $m_{\text{топл.та}}$ — масса топлива затраченного на прогрев ДВС до заданной температуры после предпускового подогрева от теплового аккумулятора.

Для рассматриваемого двигателя при использовании теплового аккумулятора с массой теплоаккумулирующего вещества равной 14 кг и температуре запуска равной -25°C были получены следующие результаты оценки изменения времени и расхода топлива на прогрев ДВС. Коэффициент сокращения времени прогрева ДВС:

$$K_{\tau} = \frac{15,5-14}{15,5} \cdot 100 = 16,1\%.$$

Коэффициент сокращения потребления топлива на режиме прогрева ДВС:

$$K_{\text{топл}} = \frac{308-106}{308} \cdot 100 = 65,6\%.$$

В результате определения эффективности предпускового подогрева ДВС от ТА для рассматриваемого двигателя при температуре окружающей среды -25°С было получено сокращение времени прогрева двигателя на 16,1% и сокращение расхода топлива на режиме прогрева на 65,6%. Согласно руководствам по летной эксплуатации двигателей не допускается запуск двигателя без предварительного подогрева при температуре наружного воздуха -25°С. Таким образом при температуре окружающей среды от -70°С до -25°С запуск двигателя возможен только при помощи предварительно подогрева двигателя внутреннего сгорания от теплового аккумулятора [82].

В результате использования метода проектного расчета теплового аккумулятора были определены рекомендуемые удельные массы теплового аккумулятора в зависимости от температуры окружающей среды при различной заданной температуре прогрева двигателя внутреннего сгорания (рисунок 5.21). Также получена зависимость температуры ДВС при прогреве от теплового аккумулятора от температуры окружающей среды для различных вариантов удельной массы ТА (рисунок 5.22).

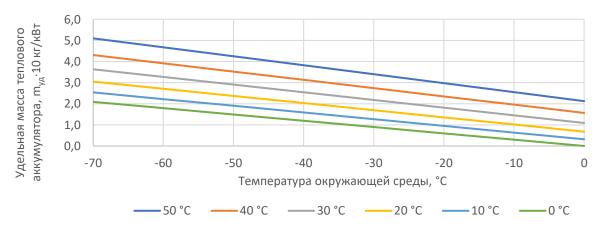


Рисунок 5.21 – Зависимость удельной массы TA от температуры окружающей среды

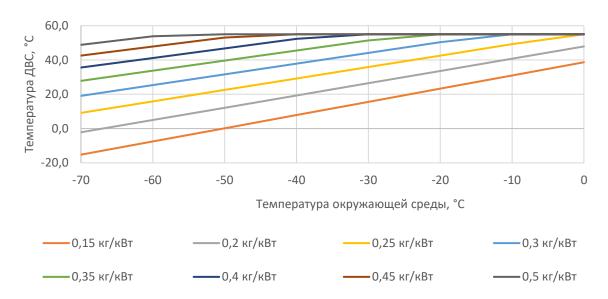


Рисунок 5.22 – Зависимость температуры ДВС при прогреве от TA от температуры окружающей среды

По результатам, представленным на рисунках 5.15 и 5.16, был определен рекомендуемый диапазон удельной массы теплового аккумулятора для двигателей внутреннего сгорания летательных аппаратов для районов Крайнего Севера и Арктики равный 0,15-0,30 кг на 1 кВт номинальной мощности двигателя внутреннего сгорания.

Разработанный метод проектного расчёта теплового аккумулятора для двигателей внутреннего сгорания летательных аппаратов показал возможность сокращения времени прогрева двигателя до 33% и сокращения расхода топлива на режиме прогрева до 75% при температуре окружающей среды -25°C и удельной массе теплового аккумулятора до 0,3 кг/кВт мощности ДВС. Так же согласно руководствам по летной эксплуатации двигателей не допускается запуск двигателя без предварительного подогрева температуре наружного воздуха -25°C. Таким образом предварительный прогрев двигателя внутреннего сгорания за счет теплового аккумулятора обеспечивает условия его запуска при температуре от -70°C до -25°C.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённого исследования решена актуальная научнотехническая 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. Учёт 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 OT температуры окружающей массы среды И При теплоаккумулирующего вещества. массе теплоаккумулирующего вещества от 5 до 50 кг потеря половины запасенной 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 Использование способа двигателя внутреннего сгорания. оценки эффективности теплового аккумулятора позволяет определить суммарный

эффект его применения, включая экономию топлива, сокращение времени предполетной подготовки летательного аппарата и обеспечение необходимых рабочих характеристик ДВС. 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 прогрев на 16,1% и 65,2% соответственно.

4. Разработан метод проектного расчёта теплового аккумулятора для двигателя внутреннего сгорания летательного аппарата, применение которого позволит сократить временя прогрева двигателя до 33%, сократить расход топлива на режиме прогрев 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 для вышеуказанного диапазона температуры равный 0,15-0,3 кг теплоаккумулирующего вещества для 1 кВт номинальной мощности двигателя внутреннего сгорания летательного аппарата.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авиационные двигатели внутреннего сгорания: монография / М.Ю. Орлов, А.А. Горшкалев, С.С. Корнеев, В.В. Урлапкин. Самара: Издательство Самарского университета, 2023. 236 с
- 2. Левенберг В.Д., Ткач М.Р., Гольстрем В.А. Аккумулирование тепла. К.: Техника. 1991. 112 с.
- 3. Григорьев В.А. Разработка аккумуляторов теплоты с зернистым теплоносителем и метода их расчета на основе математического моделирования: дис. ... кан. тех. наук: 05.23.03 / Григорьев Валерий Александрович. Воронеж., 2003. 147 с.
- 4. Цимбалюк Ю.В. Исследование процессов с фазовыми переходами материалов с пластинчатыми инклюзивами в тепловых аккумуляторах: дис. ... кан.тех.наук: 01.04.14 / Цымбалюк Юлия Валерьевна. Астрахань., 2006. 122 с.
- 5. Куколев М. И. Модели тепловых процессов в накопителях энергии для обоснования проектных решений: дис. . . . д-ра тех. наук: 05.14.04 / Куколев Максим Игоревич. СПб., 2006. 280 с.
- 6. Arteconi, A. Thermal energy storage coupled with PV panels for demand side management of industrial building cooling loads / A. Arteconi, E. Ciarrocchi, Q. Pan, F. Carducci, G. Comodi, F. Polonara, R. Wang // Applied Energy. 2017. V. 185. P. 1984–1993.
- 7. Ahmed, N. Thermal and economic evaluation of thermocline combined sensible-latent heat thermal energy storage system for medium temperature applications / N. Ahmed, K. Elfeky, L. Lu, Q. Wang // Energy Conversion and Management. 2019. V. 189. P. 14–23.
- 8. Pereira da Cunha, J. Thermal energy storage for low and medium temperature applications using phase change materials A review / J. Pereira da Cunha, P. Eames // Applied Energy. 2016. V. 177. P. 227–238.

- 9. Xia, L. Preparation and thermal characterization of expanded graphite/paraffin composite phase change material / L. Xia, P. Zhang, R. Wang // Carbon. 2010. V. 48. P. 2538–2548.
- 10. Arshad, A. Thermal performance of phase change material (PCM) based pin-finned heat sinks for electronics devices: Effect of pin thickness and PCM volume fraction / A. Arshad, H. Ali, M. Ali, S. Manzoor // Applied Thermal Engineering. 2017. V. 112. P. 143–155.
- 11. N'Tsoukpoe, K. A review on long-term sorption solar energy storage / K. N'Tsoukpoe, H. Liu, N. Le Pierrès, L. Luo // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2009. V. 13. P. 2385–2396.
- 12. Frazzica, A. Development of "salt in porous matrix" composites based on LiCl for sorption thermal energy storage / A. Frazzica, V. Brancato, A. Caprì, C. Cannilla, L. Gordeeva, Y. Aristov // Energy. 2020. V. 208. P. 118338.
- 13. Yu, N. Sorption thermal storage for solar energy / N. Yu, R. Wang, L. Wang // Progress in Energy and Combustion Science. 2013. V. 39. P. 489–514.
- 14. Gao, J. Experimental study on a double-stage absorption solar thermal storage system with enhanced energy storage density / J. Gao, Z. Xu, R. Wang // Applied Energy. 2020. V. 262. P. 114476.
- 15. Xu, Z. A sorption thermal storage system with large concentration glide / Z. Xu, R. Wang // Energy. 2017. V. 141. P. 380–388.
- 16. Xu, Z. Absorption seasonal thermal storage cycle with high energy storage density through multi-stage output / Z. Xu, R. Wang // Energy. 2019. V. 167. P. 1086–1096.
- 17. Li, T. Experimental investigation on a dual-mode thermochemical sorption energy storage system / T. Li, S. Wu, T. Yan, R. Wang, J. Zhu // Energy. 2017. V. 140. P. 383–394.
- 18. Ding, Z. Dynamic characteristics and performance improvement of a high-efficiency double-effect thermal battery for cooling and heating / Z. Ding, W. Wu, Y. Chen, M. Leung // Applied Energy. 2020. V. 264. P. 114768.

- 19. Voigt, H. Heat pumping and transforming processes with intrinsic storage / H. Voigt // Energy Conversion and Management. 1985. V. 25. P. 381–386.
- 20. Wu, W. Low-temperature compression-assisted absorption thermal energy storage using ionic liquids / W. Wu // Energy and Built Environment. 2020. V. 1. P. 139–148.
- 21. Mehari, A. Thermally-pressurized sorption heat storage cycle with low charging temperature / A. Mehari, Z. Xu, R. Wang // Energy. 2019. V. 189. P. 116304.
- 22. Yu, N. Evaluation of a three-phase sorption cycle for thermal energy storage / N. Yu, R. Wang, Z. Lu, L. Wang, T. Ishugah // Energy. 2014. V. 67. P. 468–478.
- 23. Bi, Y. Study on the characteristics of charging/discharging processes in three-phase energy storage coupling in solar air conditioning system / Y. Bi, G. Zang, L. Qin, H. Li, H. Wang // Energy and Buildings. 2019. V. 204. P. 109456.
- 24. Xu, S. Variable mass energy transformation and storage (VMETS) system using NH3–H2O as working fluid, Part 1: Modeling and simulation under full storage strategy / S. Xu, L. Zhang, J. Liang, R. Du // Energy Conversion and Management. 2007. V. 48. P. 9–26.
- 25. Xu, S. Variable mass energy transformation and storage (VMETS) system using NH3–H2O as working fluid. Part 2: Modeling and simulation under partial storage strategy / S. Xu, L. Zhang, J. Liang, R. Du // Energy Conversion and Management. 2007. V. 48. P. 27–39.
- 26. Ibrahim, N. Performance characteristics of a solar driven lithium bromide-water absorption chiller integrated with absorption energy storage / N. Ibrahim, F. Al-Sulaiman, F. Ani // Energy Conversion and Management. 2017. V. 150. P. 188–200.
- 27. Xu, S. An investigation of the solar powered absorption refrigeration system with advanced energy storage technology / S. Xu, X. Huang, R. Du // Solar Energy. 2011. V. 85. P. 1794–1804.

- 28. Chen, Q. Energy self-sufficient desalination stack as a potential fresh water supply on small islands / Q. Chen, Y. Liu, C. Xue, Y. Yang, W. Zhang // Desalination. 2015. V. 359. P. 52–58.
- 29. Luo, F. A power free electrodialysis (PFED) for desalination / F. Luo, Y. Wang, C. Jiang, B. Wu, H. Feng, T. Xu // Desalination. 2017. V. 404. P. 138–146.
- 30. Yip, N. Salinity Gradients for Sustainable Energy: Primer, Progress, and Prospects / N. Yip, D. Brogioli, H. Hamelers, K. Nijmeijer // Environmental Science & Energy: Technology. 2016. V. 50. P. 12072–12094.
- 31. Alptekin, E. Performance investigations on a sensible heat thermal energy storage tank with a solar collector under variable climatic conditions / E. Alptekin, M. Ezan // Applied Thermal Engineering. 2020. V. 164. P. 114423.
- 32. Lugolole, R. Experimental analyses of sensible heat thermal energy storage systems during discharging / R. Lugolole, A. Mawire, D. Okello, K. Lentswe, K. Nyeinga, A. Shobo // Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2019. V. 35. P. 117–130.
- 33. Schmidt, T. Central solar heating plants with seasonal storage in Germany / T. Schmidt, D. Mangold, H. Müller-Steinhagen // Solar Energy. 2004. V. 76. P. 165–174.
- 34. Shaikh, S. Effect of multiple phase change materials (PCMs) slab configurations on thermal energy storage / S. Shaikh, K. Lafdi // Energy Conversion and Management. 2006. V. 47. P. 2103–2117.
- 35. Xu, H. Thermal performance of cascaded thermal storage with phase-change materials (PCMs). Part I: Steady cases / H. Xu, C. Zhao // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2017. V. 106. P. 932–944.
- 36. Xu, H. Thermodynamic analysis and optimization of cascaded latent heat storage system for energy efficient utilization / H. Xu, C. Zhao // Energy. 2015. V. 90. P. 1662–1673.

- 37. Seeniraj, R. Performance enhancement of a solar dynamic LHTS module having both fins and multiple PCMs / R. Seeniraj, N. Lakshmi Narasimhan // Solar Energy. 2008. V. 82. P. 535–542.
- 38. Shabgard, H. Heat transfer and exergy analysis of cascaded latent heat storage with gravity-assisted heat pipes for concentrating solar power applications / H. Shabgard, C. Robak, T. Bergman, A. Faghri // Solar Energy. 2012. V. 86. P. 816–830.
- 39. Chiu, J. Multistage latent heat cold thermal energy storage design analysis / J. Chiu, V. Martin // Applied Energy. 2013. V. 112. P. 1438–1445.
- 40. Shamsi, H. Performance evaluation and optimization of encapsulated cascade PCM thermal storage / H. Shamsi, M. Boroushaki, H. Geraei // Journal of Energy Storage. 2017. V. 11. P. 64–75.
- 41. Mawire, A. Performance comparison of two metallic eutectic solder based medium-temperature domestic thermal energy storage systems / A. Mawire, C. Ekwomadu, T. Lefenya, A. Shobo // Energy. 2020. V. 194. P. 116828.
- 42. Zhao, Y. Development of SrBr2 composite sorbents for a sorption thermal energy storage system to store low-temperature heat / Y. Zhao, R. Wang, Y. Zhang, N. Yu // Energy. 2016. V. 115. P. 129–139.
- 43. Jiang, L. Analysis on innovative modular sorption and resorption thermal cell for cold and heat cogeneration / L. Jiang, A. Roskilly, R. Wang, L. Wang, Y. Lu // Applied Energy. 2017. V. 204. P. 767–779. Liu, J. Experimental investigation on properties of composite sorbents for three-phase sorption-water working pairs / J. Liu, J. Wang, L. Wang, R. Wang // International Journal of Refrigeration. 2017. V. 83. P. 51–59.
- 44. Brancato, V. Experimental characterization of the LiCl/vermiculite composite for sorption heat storage applications / V. Brancato, L. Gordeeva, A. Sapienza, V. Palomba, S. Vasta, A. Grekova, A. Frazzica, Y. Aristov // International Journal of Refrigeration. 2019. V. 105. P. 92–100.
- 45. Girnik, I. Composite "LiCl/MWCNT/PVA" for adsorption thermal battery: Dynamics of methanol sorption / I. Girnik, A. Grekova, T. Li, R. Wang, P.

- Dutta, S. Srinivasa Murthy, Y. Aristov // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2020. V. 123. P. 109748.
- 46. Bayomy, A. Domestic Hot Water Storage Tank Utilizing Phase Change Materials (PCMs): Numerical Approach / A. Bayomy, S. Davies, Z. Saghir // Energies. 2019. V. 12. P. 2170.
- 47. Al-Hinti, I. Experimental investigation on the use of water-phase change material storage in conventional solar water heating systems / I. Al-Hinti, A. Al-Ghandoor, A. Maaly, I. Abu Naqeera, Z. Al-Khateeb, O. Al-Sheikh // Energy Conversion and Management. 2010. V. 51. P. 1735–1740.
- 48. Fazilati, M. Phase change material for enhancing solar water heater, an experimental approach / M. Fazilati, A. Alemrajabi // Energy Conversion and Management. 2013. V. 71. P. 138–145.
- 49. Haillot, D. Optimization of solar DHW system including PCM media / D. Haillot, E. Franquet, S. Gibout, J. Bédécarrats // Applied Energy. 2013. V. 109. P. 470–475.
- 50. Nkwetta, D. Phase change materials in hot water tank for shifting peak power demand / D. Nkwetta, P. Vouillamoz, F. Haghighat, M. El Mankibi, A. Moreau, K. Desai // Solar Energy. 2014. V. 107. P. 628–635.
- 51. Liu, M. Design of sensible and latent heat thermal energy storage systems for concentrated solar power plants: Thermal performance analysis / M. Liu, S. Riahi, R. Jacob, M. Belusko, F. Bruno // Renewable Energy. 2020. V. 151. P. 1286–1297.
- 52. Zanganeh, G. Stabilization of the outflow temperature of a packed-bed thermal energy storage by combining rocks with phase change materials / G. Zanganeh, M. Commerford, A. Haselbacher, A. Pedretti, A. Steinfeld // Applied Thermal Engineering. 2014. V. 70. P. 316–320.
- 53. Dabiri, S. Latent and sensible heat analysis of PCM incorporated in a brick for cold and hot climatic conditions, utilizing computational fluid dynamics / S. Dabiri, M. Mehrpooya, E. Nezhad // Energy. 2018. V. 159. P. 160–171.

- 54. Yu, J. Thermal performance evaluation and optimal design of building roof with outer-layer shape-stabilized PCM / J. Yu, Q. Yang, H. Ye, Y. Luo, J. Huang, X. Xu, W. Gang, J. Wang // Renewable Energy. 2020. V. 145. P. 2538–2549.
- 55. Yan, C. Optimal design and application of a compound cold storage system combining seasonal ice storage and chilled water storage / C. Yan, W. Shi, X. Li, Y. Zhao // Applied Energy. 2016. V. 171. P. 1–11.
- 56. Navidbakhsh, M. Four E analysis and multi-objective optimization of an ice storage system incorporating PCM as the partial cold storage for air-conditioning applications / M. Navidbakhsh, A. Shirazi, S. Sanaye // Applied Thermal Engineering. 2013. V. 58. P. 30–41.
- 57. Raul, A. Transient performance analysis of concentrating solar thermal power plant with finned latent heat thermal energy storage [Teκcτ]/ A. Raul, S. K. Saha, M. Jain// Renewable Energy. 2020. V. 145. P. 1957-1971.
- 58. Теплоноситель Dowtherm A Техническая брошюра [Электронный ресурс]/ http://www.neochemical.ru: сайт компании HEO Кемикал. URL: http://www.neochemical.ru/File/DOWTHERM_A_Product_Brochure_Russian.pdf (дата обращения: 02.09.2024).
- 59. Meroueh, L. Thermal energy storage radiatively coupled to a supercritical rankine cycle for electric grid support [Τεκcτ]/ L. Meroueh, G. Chen //Renewable Energy. -2020. –V. 145. P. 604-621.
- 60. Wilson John, M. R. Performance analysis of custom-designed heat exchanger and latent heat thermal energy storage system for diesel engine exhaust waste recovery system [Teκcτ]/ M. R. Wilson John, L. R. Ganapathy Subramanian //Iranian Journal of Science and Technology Transactions of Mechanical Engineering. V. 43. P. 679-694.
- 61. Sharan, P. Cogeneration using multi-effect distillation and a solar-powered supercritical carbon dioxide Brayton cycle [Teκcτ]/ T. Neises, J. D. McTigue, C. Turchi//Desalination. 2019. V. 459. P. 20-33.

- 62. Wu, S. A unique phase change redox cycle using CuO/Cu 2 O for utility-scale energy storage [Tekct]/ S. Wu, C. Zhou, E. Doroodchi, B. Moghtaderi//Energy Conversion and Management. 2019. V. 188. P. 366-380.
- 63. Li, D. Combined-cycle gas turbine power plant integration with cascaded latent heat thermal storage for fast dynamic responses [Teκcτ]/ D. Li, Y. Hu, D. Li, J. Wang//Energy Conversion and Management. 2019. V. 183. P. 1-13.
- 64. Carlson, F. Model of the impact of use of thermal energy storage on operation of a nuclear power plant Rankine cycle [Τεκcτ]/ F. Carlson, J. H. Davidson, N. Tran, A. Stein// Energy Conversion and Management. 2019. V.181. –P. 36-47.
- 65. Pelay, U. Integration of a thermochemical energy storage system in a Rankine cycle driven by concentrating solar power: Energy and exergy analyses [Τεκcτ]/ U. Pelay, L. Luo, Y. Fan, D. Stitou, C. Castelain//Energy. 2019. V. 167. P. 498-510.
- 66. Karasu, H. Analysis and efficiency assessment of direct conversion of wind energy into heat using electromagnetic induction and thermal energy storage/ H. Karasu, I. Dincer//Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME. 2019. V. 140(7).
- 67. AlZahrani, A. A. Energy and exergy analyses of a parabolic trough solar power plant using carbon dioxide power cycle [Tekct]/A. A. AlZahrani, I. Dincer//Energy Conversion and Management. 2018. V. 158. –P. 476-488.
- 68. Atanasoae, P. Integration of thermal energy storage systems for improved efficiency and flexibility of the combined heat and power plants of medium and small power[Teκcτ]/ P. Atănăsoae, R. Pentiuc, C. Bobric, E. Olariu, V. Martin//Paper presented at the 2017 11th International Conference on Electromechanical and Power Systems, SIELMEN 2017 Proceedings. 2017. P. 212-215.
- 69. Chacartegui, R. Analysis of two heat storage integrations for an organic rankine cycle parabolic trough solar power plant [Tekct]/ R. Chacartegui, L. Vigna,

- J. A. Becerra, V. Verda//Energy Conversion and Management. 2016. V. 125. P. 353-367.
- 70. Li, D. Dynamic modelling and simulation of a combined-cycle power plant integration with thermal energy storage [Tekct]/D. Li, Y. Hu, W. He, J. Wang, //Paper presented at the ICAC 2017 2017 23rd IEEE International Conference on Automation and Computing: Addressing Global Challenges through Automation and Computing. 2017.
- 71. Nathan, G. J. Solar thermal hybrids for combustion power plant: A growing opportunity [Teκct]/G. J. Nathan, M. Jafarian, B. B. Dally, W. L. Saw, P. J. Ashman, E. Hu, A. Steinfeld//Progress in Energy and Combustion Science. 2018. V. 64. P. 4-28.
- 72. Ortiz, C. Power cycles integration in concentrated solar power plants with energy storage based on calcium looping [Tekct]/C. Ortiz, R. Chacartegui, J. M. Valverde, A. Alovisio, J. A. Becerra//Energy Conversion and Management. 2017. V. 149. P. 815-829.
- 73. 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
- 74. 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
- 75. 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.
- 76. 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.
- 77. Severance, C. Python for Everybody: Exploring Data in Python [Текст]/ С.R. Severance. Ann Arbor: University of Michigan, 2013. 245 с.
- 78. Абрамович, Г.Н. Прикладная газовая динамика. Изд. 3-е, перераб. и доп. М. : Наука, 1969. 824 с.
- 79. Горшкалев А.А. Разработка методики проведения ускоренных ресурсных испытаний тепловых аккумуляторов / Горшкалев А.А., Корнеев 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
- 80. Кикоин, И. К. Таблицы физических величин [Текст]: Справочник/И. К. Кикоин, В. Г. Аверин, Б. А. Аронзон, Н. С. Бабаев. М.: Атомиздат, 1976. 1006 с.
- 81. Горшкалев А.А. Методика расчёта рабочего процесса и мощностных характеристик четырехтактного двигателя внутреннего сгорания / Горшкалев А.А., Корнеев 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
- 82. 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

ПРИЛОЖЕНИЕ А

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МАКЕТНЫХ ОБРАЗЦОВ ЕДИНИЧНЫХ МОДУЛЕЙ

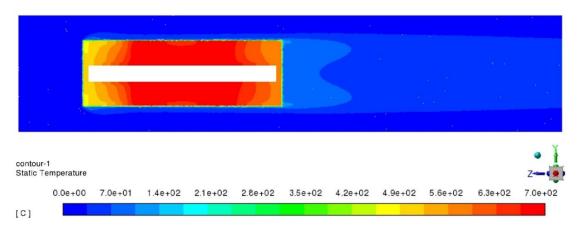


Рисунок А.1 – Поле распределения температуры воздуха и единичных модулей без оребрения при температуре 700°C

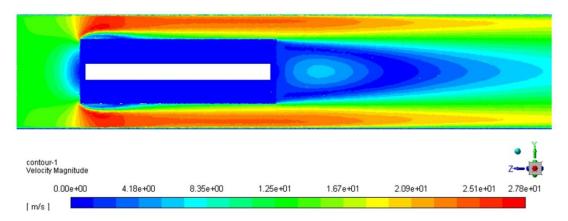


Рисунок А.2 – Поле распределения скорости воздуха при обтекании единичных модулей без оребрения при температуре 700°C

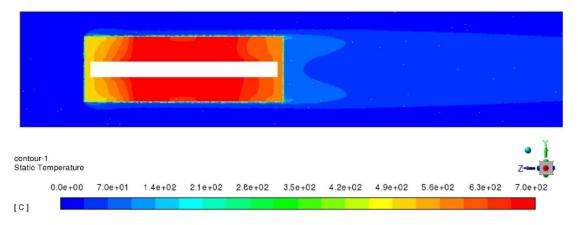


Рисунок А.3 – Поле распределения температуры воздуха и единичных модулей без оребрения при температуре 800°C

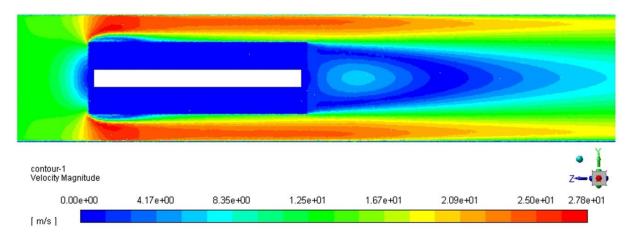


Рисунок А.4 – Поле распределения скорости воздуха при обтекании единичных модулей без оребрения при температуре 800°C

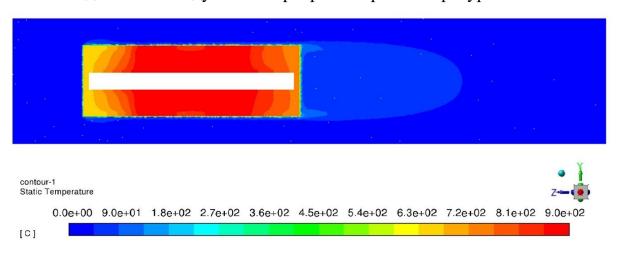


Рисунок А.5 – Поле распределения температуры воздуха и единичных модулей без оребрения при температуре 900°C

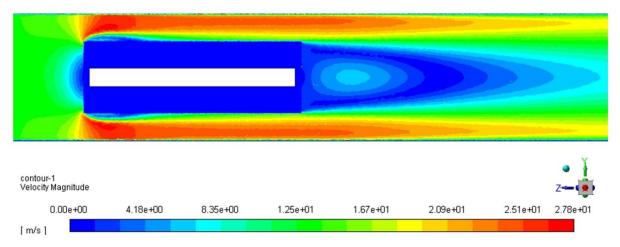


Рисунок А.6 – Поле распределения скорости воздуха при обтекании единичных модулей без оребрения при температуре 900°C

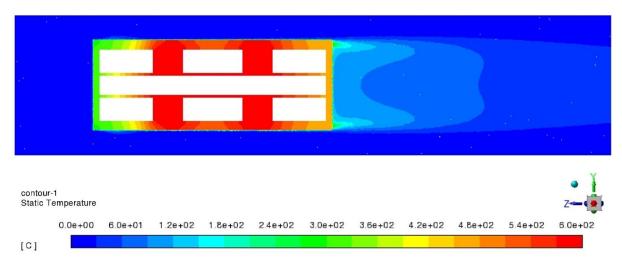


Рисунок А.7 – Поле распределения температуры воздуха и единичных модулей с вариантом оребрения № 1 при температуре 600°C

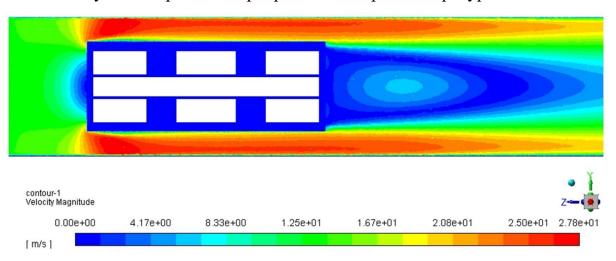


Рисунок А.8 – Поле распределения скорости воздуха при обтекании единичных модулей с вариантом оребрения № 1 при температуре 600°C

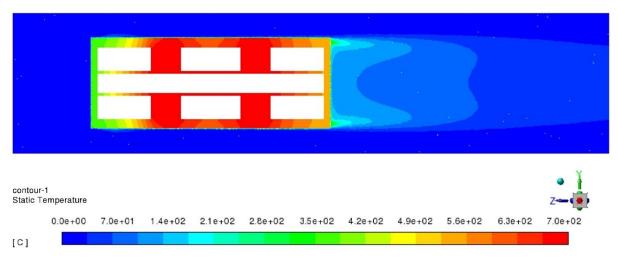


Рисунок А.9 – Поле распределения температуры воздуха и единичных модулей с вариантом оребрения № 1 при температуре 700°C

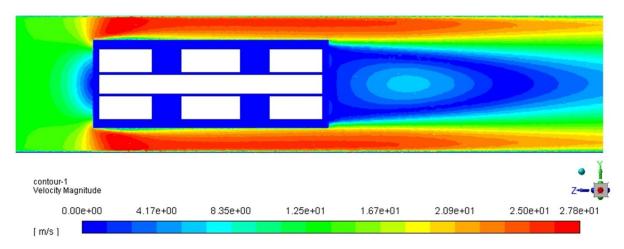


Рисунок А.10 – Поле распределения скорости воздуха при обтекании единичных модулей с вариантом оребрения № 1 при температуре 700°C

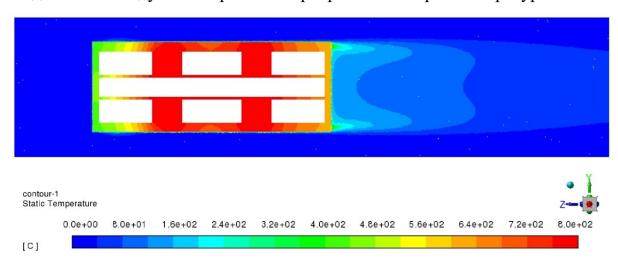


Рисунок А.11 – Поле распределения температуры воздуха и единичных модулей с вариантом оребрения № 1 при температуре 800°C

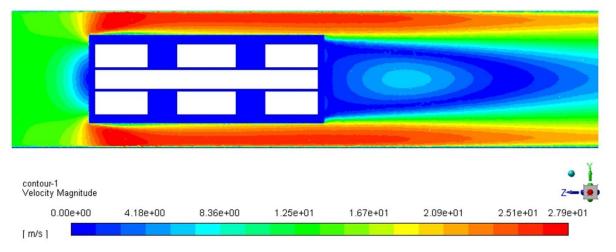


Рисунок А.12 – Поле распределения скорости воздуха при обтекании единичных модулей с вариантом оребрения № 1 при температуре 800°C

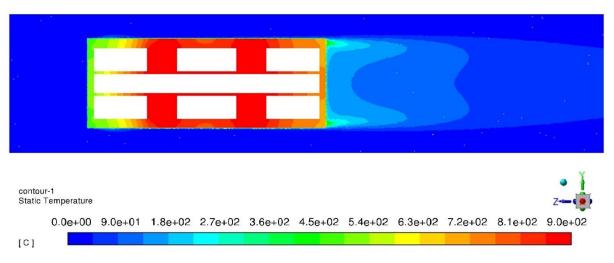


Рисунок А.13 – Поле распределения температуры воздуха и единичных модулей с вариантом оребрения № 1 при температуре 900°C

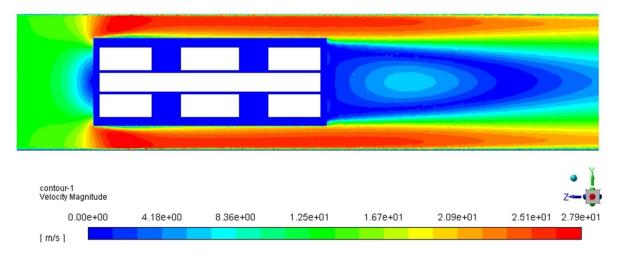


Рисунок А.14 – Поле распределения скорости воздуха при обтекании единичных модулей с вариантом оребрения № 1 при температуре 900°C

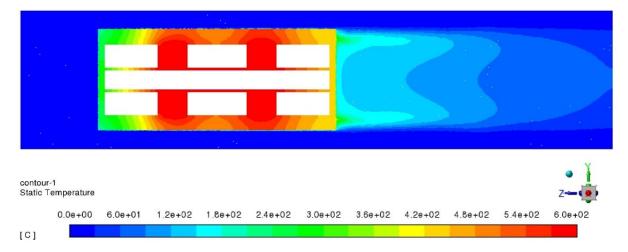


Рисунок А.15 – Поле распределения температуры воздуха и единичных модулей с вариантом оребрения № 2 при температуре 600°C

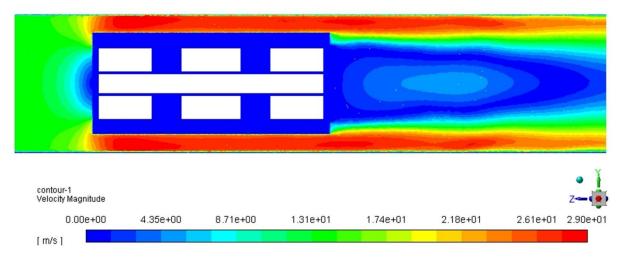


Рисунок А.16 – Поле распределения скорости воздуха при обтекании единичных модулей с вариантом оребрения № 2 при температуре 600°C

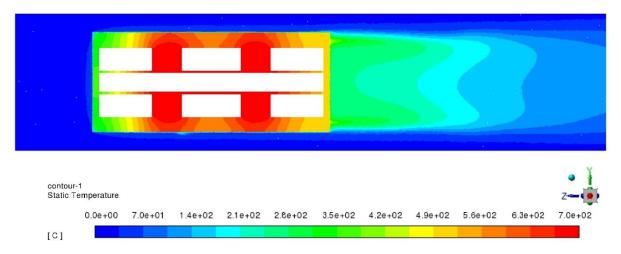


Рисунок А.17 – Поле распределения температуры воздуха и единичных модулей с вариантом оребрения № 2 при температуре 700°C

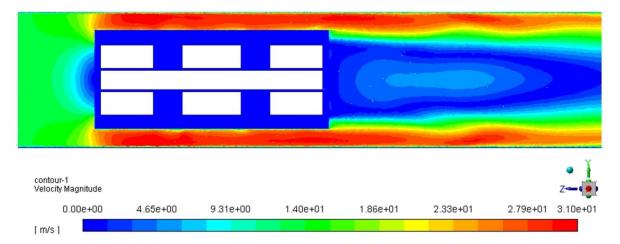


Рисунок А.18 – Поле распределения скорости воздуха при обтекании единичных модулей с вариантом оребрения № 2 при температуре 700°C

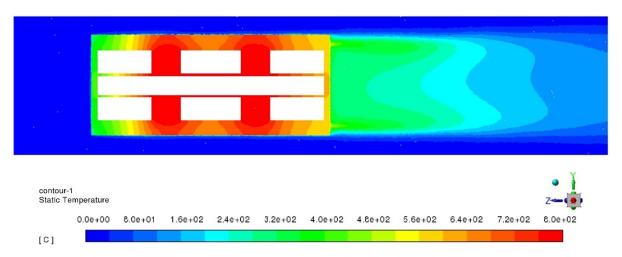


Рисунок А.19 – Поле распределения температуры воздуха и единичных модулей с вариантом оребрения № 2 при температуре 800°C

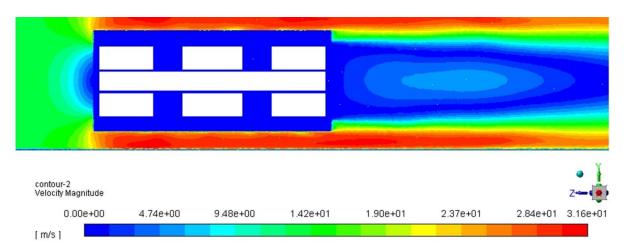


Рисунок А.20 – Поле распределения скорости воздуха при обтекании единичных модулей с вариантом оребрения № 2 при температуре 800°C

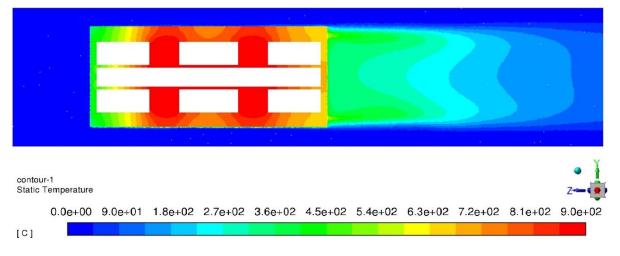


Рисунок А.21 – Поле распределения температуры воздуха и единичных модулей с вариантом оребрения № 2 при температуре 900°C

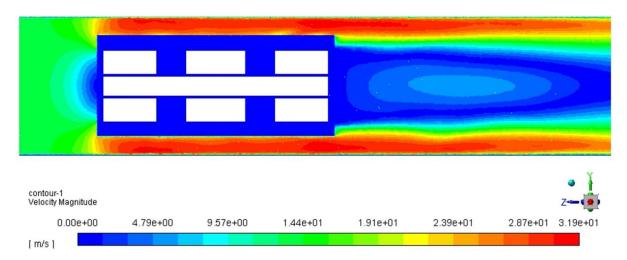


Рисунок А.22 – Поле распределения скорости воздуха при обтекании единичных модулей с вариантом оребрения № 2 при температуре 900°C

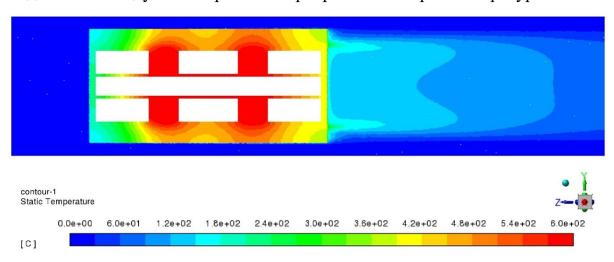


Рисунок А.23 – Поле распределения температуры воздуха и единичных модулей с вариантом оребрения № 3 при температуре 600°C

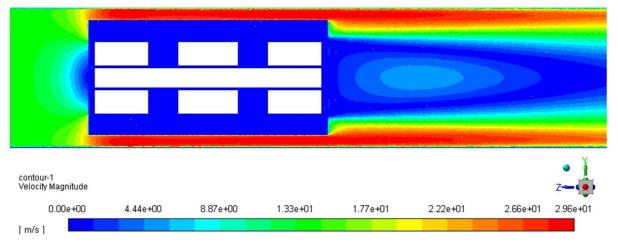


Рисунок А.24 – Поле распределения скорости воздуха при обтекании единичных модулей с вариантом оребрения № 3 при температуре 600°C

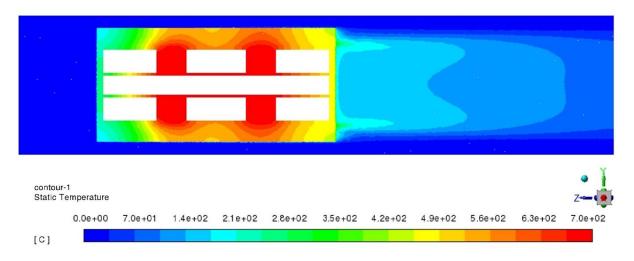


Рисунок А.25 – Поле распределения температуры воздуха и единичных модулей с вариантом оребрения № 3 при температуре 700°C

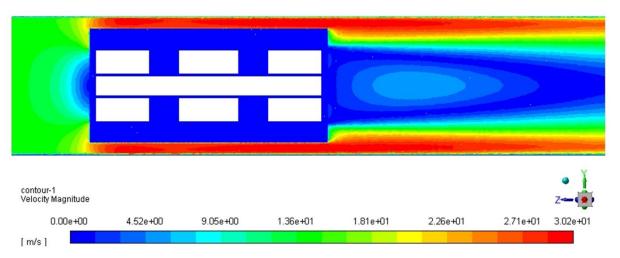


Рисунок А.26 – Поле распределения скорости воздуха при обтекании единичных модулей с вариантом оребрения № 3 при температуре 700°C

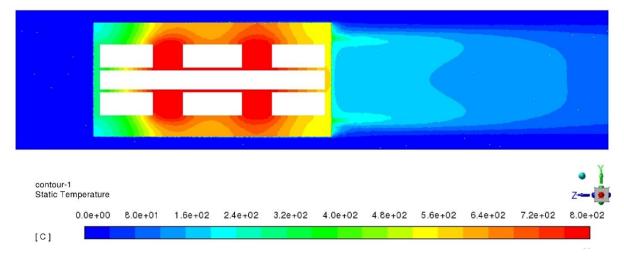


Рисунок А.27 – Поле распределения температуры воздуха и единичных модулей с вариантом оребрения № 3 при температуре 800°C

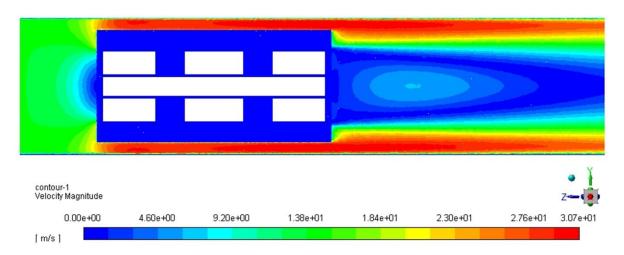


Рисунок А.28 – Поле распределения скорости воздуха при обтекании единичных модулей с вариантом оребрения № 3 при температуре 800°C

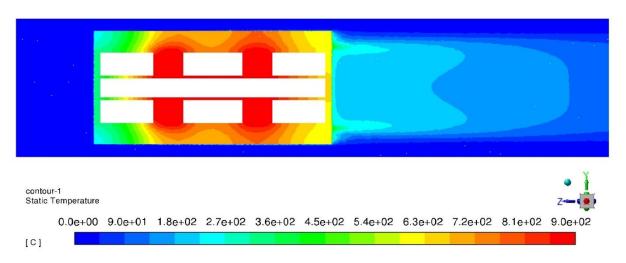


Рисунок А.29 – Поле распределения температуры воздуха и единичных модулей с вариантом оребрения № 3 при температуре 900°C

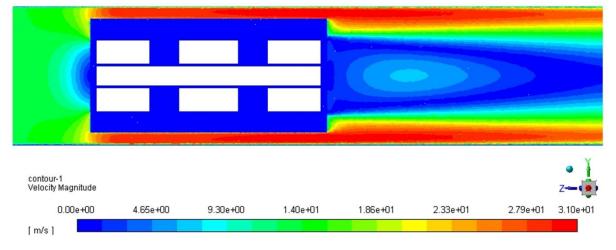


Рисунок А.30 – Поле распределения скорости воздуха при обтекании единичных модулей с вариантом оребрения № 3 при температуре 900°C

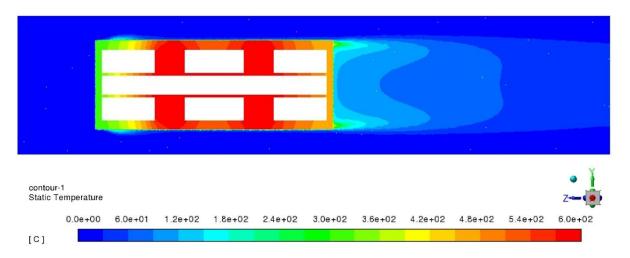


Рисунок А.31 – Поле распределения температуры воздуха и единичных модулей с вариантом оребрения № 4 при температуре 600°C

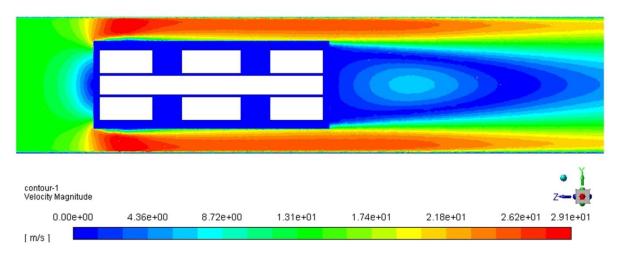


Рисунок А.32 – Поле распределения скорости воздуха при обтекании единичных модулей с вариантом оребрения № 4 при температуре 600°C

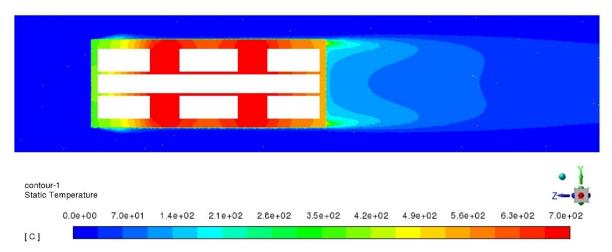


Рисунок А.33 – Поле распределения температуры воздуха и единичных модулей с вариантом оребрения № 4 при температуре 700°C

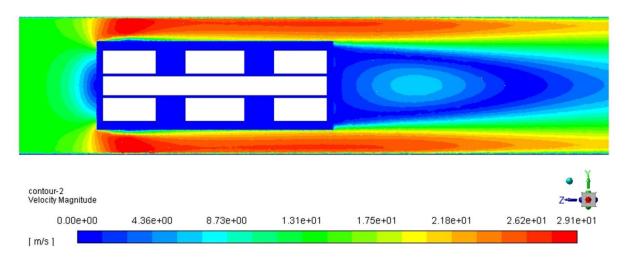


Рисунок А.34 — Поле распределения скорости воздуха при обтекании единичных модулей с вариантом оребрения № 4 при температуре 700°C

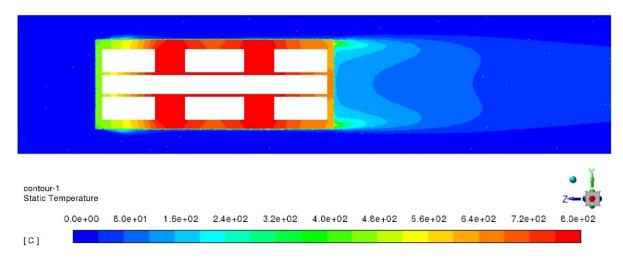


Рисунок А.35 – Поле распределения температуры воздуха и единичных модулей с вариантом оребрения № 4 при температуре 800°C

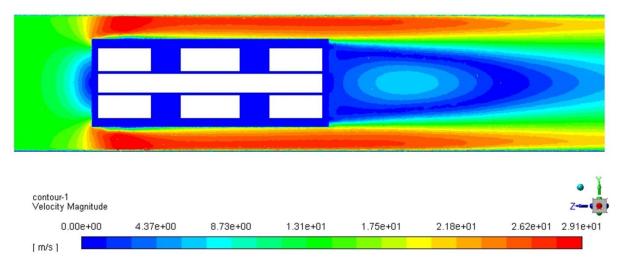


Рисунок А.36 – Поле распределения скорости воздуха при обтекании единичных модулей с вариантом оребрения № 4 при температуре 800°C

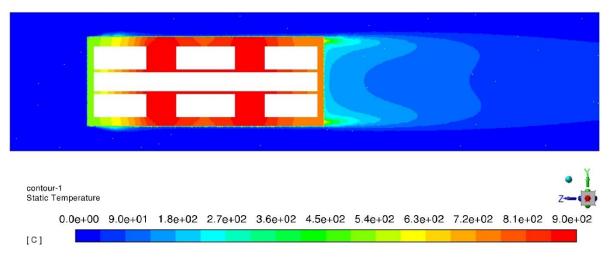


Рисунок А.37 – Поле распределения температуры воздуха и единичных модулей с вариантом оребрения № 4 при температуре 900°C

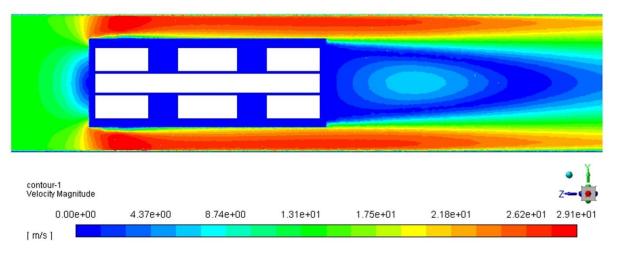


Рисунок А.38 – Поле распределения скорости воздуха при обтекании единичных модулей с вариантом оребрения № 4 при температуре 900°C

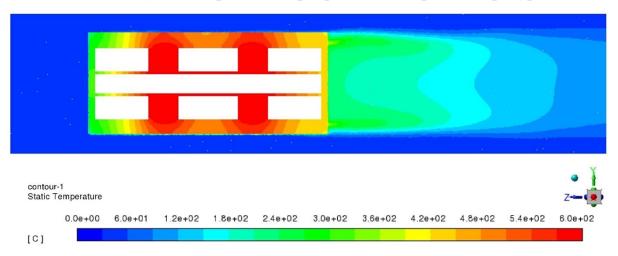


Рисунок А.39 – Поле распределения температуры воздуха и единичных модулей с вариантом оребрения № 5 при температуре 600°C

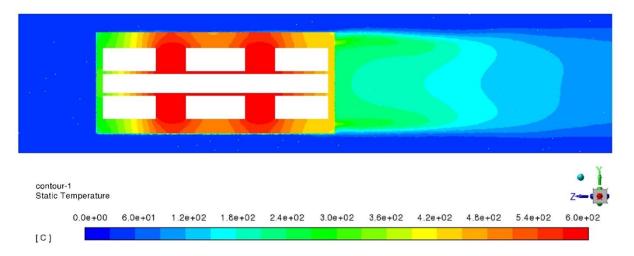


Рисунок А.40 — Поле распределения скорости воздуха при обтекании единичных модулей с вариантом оребрения № 5 при температуре 600°C

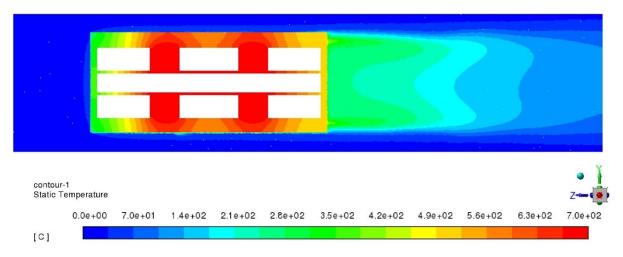


Рисунок А.41 — Поле распределения температуры воздуха и единичных модулей с вариантом оребрения № 5 при температуре 700°C

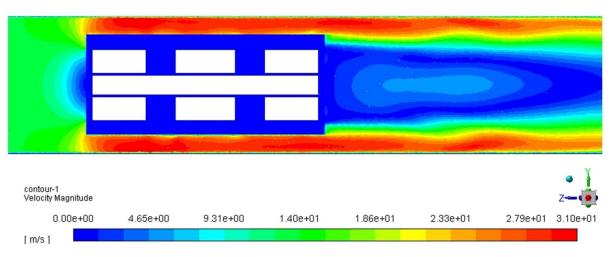


Рисунок А.42 – Поле распределения скорости воздуха при обтекании единичных модулей с вариантом оребрения № 5 при температуре 700°C

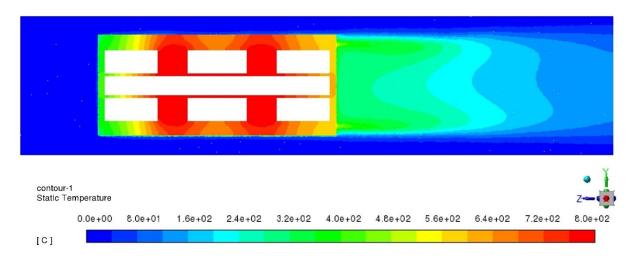


Рисунок А.43 – Поле распределения температуры воздуха и единичных модулей с вариантом оребрения № 5 при температуре 800°C

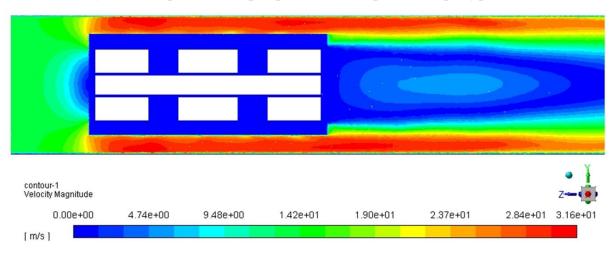


Рисунок А.44 — Поле распределения скорости воздуха при обтекании единичных модулей с вариантом оребрения № 5 при температуре 800°C

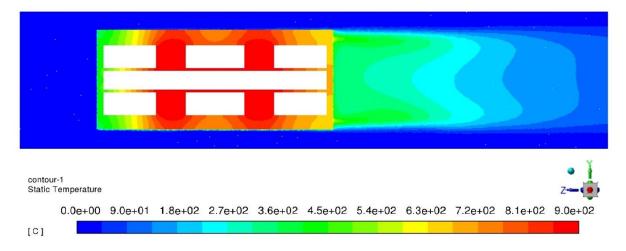


Рисунок А.45 – Поле распределения температуры воздуха и единичных модулей с вариантом оребрения № 5 при температуре 900°C

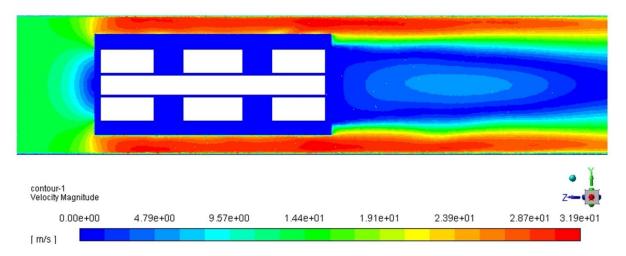


Рисунок А.46 – Поле распределения скорости воздуха при обтекании единичных модулей с вариантом оребрения № 5 при температуре 900°C