

На правах рукописи



МИСЬКИВ НИКОЛАЙ БОГДАНОВИЧ

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ ТЕПЛА В
МНОГОЦЕЛЕВОЙ СИСТЕМЕ КУЭТТА-ТЕЙЛОРА**

Специальность 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск

Научный руководитель: **Назаров Александр Дмитриевич**, доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория термогазодинамики, ведущий научный сотрудник, г. Новосибирск

Официальные оппоненты:

Попов Игорь Александрович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева-КАИ», кафедра Теплотехники и энергетического машиностроения, профессор, г. Казань;

Феоктистов Дмитрий Владимирович, кандидат технических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Исследовательская школа физики высокоэнергетических процессов, г. Томск.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (УрФУ), г. Екатеринбург.

Защита диссертации состоится «27» октября 2023 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.347.04 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, 1 корпус, конференц-зал.

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

Автореферат разослан «___» июля 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н., доцент



Боруш Олеся Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Возрастающая стоимость энергоресурсов, используемых для теплоснабжения, диктует необходимость поиска более дешёвых источников тепла. В последние десятилетия в мировой энергетике наблюдается тенденция к снижению потребления топливных ресурсов – их доля в общемировом производстве энергии за последние 30 лет сократилась с 75% до 68% в пользу использования возобновляемых источников энергии (рост с 0,6% до 8,0%). Причины поиска и развития альтернативных источников энергии связаны с ростом мирового энергопотребления, задачами снижения причинения вреда экологии, с отсутствием традиционных источников или сложностью их реализации на местах. Переход к возобновляемым источникам энергии также необходим для смягчения последствий глобального потепления и обеспечения национальной энергетической безопасности.

Освоение и использование возобновляемых источников энергии имеет большие перспективы для развития новой области альтернативной энергетики – ветровой теплогенерации. Анализ ветровых ресурсов России показывает огромный потенциал для использования энергии ветра. В частности, в Новосибирской области этот показатель в среднем равен 350 МВт·ч/год, а в более северных регионах может достигать более 2000 МВт·ч/год, при средней скорости ветра около 5 м/с.

Ветрогенераторы в настоящее время в основном используются для получения электроэнергии. Анализ энергопотребления на различных объектах, в частности в домашнем хозяйстве, показывает, что энергопотребление в странах с холодным климатом в виде электроэнергии составляет около 25 % от общей потребности в энергии. Однако, основная часть генерируемой энергии потребляется в виде теплоты на отопление и горячее водоснабжение зданий и сооружений. Таким образом, в практическом плане достаточно актуальной является возможность прямого преобразования энергии, полученной от ветра в тепло. Среди всех существующих методов прямого преобразования механической энергии вращения в тепло наиболее эффективным и доступным является использование диссипативных свойств вязкой жидкости, характеризующих ее способность превращать энергию упорядоченного движения в тепло.

В частности, представляет интерес рассмотреть в качестве такого генератора тепла устройство, в котором тепло выделяется в объеме жидкости, находящейся в системе узких кольцевых зазоров между коаксиальными, вращающимися навстречу друг другу цилиндрами (круговое течение Куэтта-Тэйлора). Данная работа посвящена исследованию процесса генерации тепла в таких системах с целью обоснования возможности их практического использования.

Степень разработанности темы исследования.

Идеи использования механической силы для непосредственного генерирования тепла внутри жидкости возникли еще до появления ветряных турбин и связаны с основополагающей работой Дж. Джоуля. Развитие этих идей способствовало возникновению нового направления тепловой генерации – ветротермальной энергетики. Значительный вклад в исследование прямого преобразования энергии ветра в тепло внесли многие зарубежные исследователи: W. Cheng, A. Yamaki, T. Tudorache, L. Melcescu, Y. Vagarov, R. Chakirov, T. Okazaki, M. Popescu, C. Ting, T. Zdankus, S. Garvey, W. Gunkel, I. Sobor, Y. Ryou и другие. Также эти работы развивались и в отечественном сегменте исследователями: Н. Д. Шишкин, Е. А. Манченко, А. Ф. Серов, В. И. Терехов, В. Н. Мамонов, Е. А. Дербасова, Р. В. Муканов, Н. А. Седых, С. С. Рыжков и др. Экспериментальными и численными исследованиями течения и теплообмена в кольцевых каналах занимались многие исследователи: A. Mallock, M. M. Couette, G.I. Taylor, D. Coles, Г. Шлихтинг, C.D. Andereck, S.S. Liu, H.L. Swinney, М.Д. Спектор, Ю.Г. Василенко, S. Tokgoz, P.V. Swann и др. Однако, работ, посвященных исследованию тепловыделения в многоцелевых системах не так много. И ни в одной работе не было сделано акцента на детальном исследовании диссипации энергии в многоцилиндровых системах с оппозитным вращением стенок. В диссертационной работе впервые получена детальная информация о диссипации энергии и структуре течения внутри многоцелевой системы Тейлора-Куэтта со встречно-направленным вращением стенок.

Целью диссертационной работы является решение научно-технической задачи: обосновать и экспериментально подтвердить возможность использования класса оппозитных течений Куэтта - Тэйлора для эффективного прямого преобразования механической энергии вращения низкооборотного привода (ветродвигатель) в тепло.

Задачи для достижения цели диссертационной работы:

1. Разработка, изготовление экспериментальных стендов и оборудования:
 - макет теплогенератора, который представляет собой два коаксиальных встречно вращающихся многоцилиндровых ротора, образующих систему цилиндрических кольцевых каналов, заполненных вязкой рабочей жидкостью;
 - гидродинамический стенд, обеспечивающий контролируемую циркуляцию рабочей жидкости с заданными свойствами через макет теплогенератора. Оборудование стенда должно обеспечивать циркуляцию рабочей жидкости в широком диапазоне вязкости и температуры.
 - системы измерения и сбора данных о первичных физических параметрах.

2. Разработка системы измерения момента сопротивления многоцелевых роторов теплогенератора при оппозитном вращении;

3. С использованием разработанного многоцилиндрового макета провести:

- исследования тепловыделения от вращения роторов ветротеплогенератора, в диапазоне скоростей, соответствующих наиболее вероятной ветровой нагрузке Новосибирской области;

- исследования влияния вязкости рабочей жидкости на эффективность тепловыделения;

- анализ спектра пульсаций, возникающих в кольцевых потоках многоцилиндровой системы, определить частотные диапазоны неоднородностей течений, вносящие наибольший вклад в тепловыделение.

4. Разработка подхода для обобщения результатов и практических рекомендаций для проектирования реальных ветротеплогенераторов.

Методы исследований. Для исследования процессов диссипации энергии использовались современные методы измерения температуры потока, момента сопротивления вращению, методы частотного анализа пульсаций потока. Применяемые методики позволили получить информацию о количестве выделяемого тепла в зависимости от параметров рабочей жидкости и скоростей вращения коаксиальных цилиндров, а также проанализировать гидродинамику течения в каналах исследуемой системы.

Степень достоверности результатов. Достоверность результатов обеспечивалась сопоставлением с опубликованными результатами работ других авторов, использованием современных измерительных систем, предварительной настройкой и калибровкой оборудования, а также воспроизводимостью результатов с учетом рассчитанных погрешностей, сопоставлением результатов, полученных различными методами и анализом неопределенностей измерений.

Научная новизна:

1. Впервые получен комплекс экспериментальных данных по выделению тепла в многоцелевой оппозитной кольцевой системе Куэтта-Тэйлора при вариации оборотов скорости вращения роторов и вязкости жидкости.

2. Предложена новая методика обобщения опытных данных, позволяющая свести произвольную мультицилиндровую систему к эквивалентному классическому одиночному каналу с течением Куэтта-Тэйлора и перенести полученные данные на иные размеры и геометрию теплогенераторов;

3. Впервые получены значения частоты и амплитуды пульсаций момента сопротивления вращению роторов, генерируемых неоднородностями потока жидкости в кольцевых зазорах мультицилиндровой системы Куэтта-Тэйлора при оппозитном вращении цилиндров;

4. Разработана и обоснована методика инженерного расчёта теплогенератора заданной мощности по эквивалентному диссипативному эффекту кольцевой системы с одним зазором.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Обоснование возможности использования класса оппозитных течений Куэтта - Тэйлора для эффективного прямого преобразования механической энергии вращения низкооборотного привода (ветродвигатель) в тепловую энергию.

2. Методика исследования характеристик теплогенератора на основе течений Куэтта-Тейлора по измерению суммарного момента сопротивления вращению роторов теплогенератора.

3. Результаты экспериментального исследования тепловыделения и структуры кольцевого потока в мультицилиндровой системе Куэтта-Тейлора с использованием разработанного измерительного оборудования

4. Методика инженерного расчета тепловых характеристик конструкции мультицилиндровых систем нагрева жидкостей. Методика расчета геометрических параметров теплогенератора исходя из его заданных характеристик: мощности, вязкости рабочей жидкости и размеров кольцевого зазора.

Личный вклад автора.

Постановка задачи осуществлена автором совместно с научным руководителем д.т.н. Назаровым А.Д. и научным консультантом д.т.н. Серовым А.Ф. Консультантом по гидродинамике течений был к.т.н. Мамонов В.Н. Общее руководство работой осуществлял д.т.н. Терехов В.И. Основная часть работы выполнена автором самостоятельно. Им создан экспериментальный стенд, разработано, создано и адаптировано измерительное оборудование к условиям эксперимента, проведены экспериментальные исследования, обработка и анализ полученных экспериментальных данных. Также автор принимал участие в подготовке публикаций.

Теоретическая и практическая значимость.

Работа вносит вклад в развитие методов энергоэффективного получения экологически чистой тепловой энергии. Практическая значимость проведенных исследований заключается в получении экспериментальных результатов, необходимых для проектирования и создания крупномасштабных ветровых генераторов тепла. На основе полученных результатов может быть выполнена опытно-конструкторская работа и налажено производство эффективных ветротеплогенераторов для нужд горячего водоснабжения и отопления небольших населенных пунктов и отдельных зданий, где отсутствует централизованное энергоснабжение.

Апробация работы.

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на ведущих российских и международных конференциях: Энерго- и ресурсоэффективность малоэтажных жилых зданий III Всероссийская научная конференция с международным участием (Новосибирск, Россия, 2017), Всероссийская конференция с элементами научной школы для молодых ученых “XXXV Сибирский теплофизический семинар” (Новосибирск, Россия, 2019), XV Всероссийская школа-конференция молодых учёных с международным участием “Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики” (Новосибирск, Россия, 2018), Седьмая Российская национальная конференция по теплообмену (Москва, Россия, 2018), 22-я Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» (Москва, Россия, 2019), V Всероссийская научная конференция "Теплофизика и физическая гидродинамика" с элементами школы молодых ученых (Ялта, Россия, 2020), “XXXVI Сибирский теплофизический семинар” (Новосибирск, Россия, 2020), “XXXVII Сибирский теплофизический семинар” (Новосибирск, Россия, 2021), VIII международная конференция “Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках” (Москва, Россия, 2021), “XXXVIII Сибирский теплофизический семинар” (Новосибирск, Россия, 2022), Восьмая Российская национальная конференция по теплообмену (Москва, Россия, 2022), Энерго- и ресурсоэффективность малоэтажных жилых зданий V Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием (Новосибирск, Россия, 2022).

Публикации. Результаты диссертационного исследования опубликованы в 17 научных работах, из них, опубликованных согласно перечню, российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук (перечень ВАК) – 3, а также работ в научных изданиях, индексируемых базами Scopus и/или Web of Science – 2, патент РФ на изобретение – 1.

Структура и объем диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка условных обозначений и списка используемой литературы из 118 наименований. Текст диссертации изложен на 118 страницах печатного текста, содержит 42 рисунка, 8 таблиц, 1 приложение.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** описывается актуальность представляемой работы, ее новизна и практическая значимость полученных результатов. Также перечисляются основные цели и задачи, сформулированы основные положения, выносимые на защиту и личный вклад автора.

В первой главе приведен обзор и анализ литературы, посвященной теме диссертационной работы. Одним из доступных и широко распространенных возобновляемых источников энергии является ветер. Ветроэнергетика представляет собой одно из приоритетных направлений современной теплоэнергетики и является одной из критических технологий Российской Федерации. Преобразование механической энергии ветряных турбин непосредственно в тепло могло бы сократить один шаг преобразования ветровой энергии и, следовательно, быть более экономичным и энергоэффективным. Для преобразования энергии ветра в тепло используются ветротермальные генераторы. Эти устройства, в отсутствие централизованного энергоснабжения, могут напрямую поставлять тепло для обогрева помещений, промышленных процессов или работать как интегрированный компонент ветроэнергетических систем.

Существует широкий спектр исследовательских работ, посвященных устройствам, преобразующим механическую энергию в тепло. Работы в этой области начались относительно недавно и интенсивно развиваются как в России, так и за рубежом. Все известные технологии преобразования энергии ветра в тепло можно разделить на следующие направления: сжатие газообразных смесей, трение, индукция или сочетание нескольких концепций. Во всех рассматриваемых технологиях энергия ветра преобразуется в энергию вращения ротором ветряной турбины. Затем механическая энергия вращения преобразуется в тепло за счет повышения температуры теплоносителя (газа или жидкости, например сжатого воздуха, воды, масла или различных растворов), который циркулирует в замкнутом контуре. Этот контур либо подключен непосредственно к потребителю, либо тепло передается через теплообменник на вторичный контур, который доставляет тепло соответствующему потребителю.

Среди методов прямого преобразования механической энергии ветра в тепло наиболее эффективным и доступным является использование диссипативных свойств вязкой жидкости, характеризующих ее способность превращать энергию упорядоченного движения в тепло. Однако, протекающие при этом сопряженные нестационарные гидродинамические и тепловые процессы являются исключительно сложными и успешное их применение требуют обширных исследований.

Опубликовано большое количество экспериментальных и теоретических исследований течения потока между концентрическими вращающимися цилиндрами со времен первых исследований Мэллока, Куэтта и Тейлора.

C.D. Andereck и др. показали, что гидродинамика течения в зазорах между встречно и спутно вращающимися коаксиальными цилиндрами хорошо определяется соотношением между числами Рейнольдса внешнего и внутреннего цилиндров. Авторы построили карту режимов течения и установили, что иерархия этих режимов определяется именно соотношением чисел Рейнольдса.

Теплоотдача потока между цилиндрами исследовалась в гораздо меньшей степени и в этой проблеме осталось много не изученных вопросов. Особенно слабо изученным является процесс диссипативного нагрева жидкости в кольцевом промежутке между вращающимися цилиндрами.

Проведенный обзор современного состояния вопроса показывает, что детальные исследования, посвященные прямому преобразованию энергии ветра в тепло, а также результаты по использованию многощелевых систем с оппозитно вращающимися стенками в качестве теплогенератора отсутствуют. Данные выводы позволили определить цель и сформулировать задачи диссертационной работы.

Во второй главе представлено описание конструкции экспериментальной установки, методик измерения параметров течения в зазорах и их обработки, а также проведен анализ неопределенностей измерений.

Для исследования процессов тепловыделения в кольцевых вращающихся каналах была создана оснащённая многоканальной системой регистрации параметров потока оригинальная мультицилиндровая конструкция теплогенератора с оппозитным направлением вращения стенок цилиндров роторов.

Экспериментальная установка, схематично показанная на рисунке 1, представляет собой устройство, в котором два низкооборотных электропривода с регулируемым числом оборотов (имитация двух роторных ветродвигателей) приводят во вращение роторы макета теплогенератора. Число оборотов электроприводов верхнего и нижнего роторов (2, 3) задается лабораторными автотрансформаторами (4) через блоки питания. Для предотвращения тепловых потерь корпус теплогенератора покрыт слоем теплоизоляции (5). Рабочая жидкость теплогенератора имеет возможность циркулировать через теплообменник аккумулятора тепловой энергии (14). Динамометрическая система (7) позволяет измерять момент сопротивления вращению, возникающий при оппозитном вращении с выбранной скоростью верхнего и нижнего роторов теплогенератора. Датчики (8) измеряют температуру рабочей жидкости на входе и выходе теплогенератора при циркуляции ее через теплообменник аккумулятора тепла, а также температуру в кольцевых зазорах. Тахометры (10) измеряют скорость вращения верхнего и нижнего роторов теплогенератора. Расходомер (12) измеряет расход рабочей жидкости при циркуляции ее через теплообменник аккумулятора тепла. Информация с первичных датчиков поступает в

микропроцессорный блок обработки данных (11) для обработки, хранения и передачи на ПК.

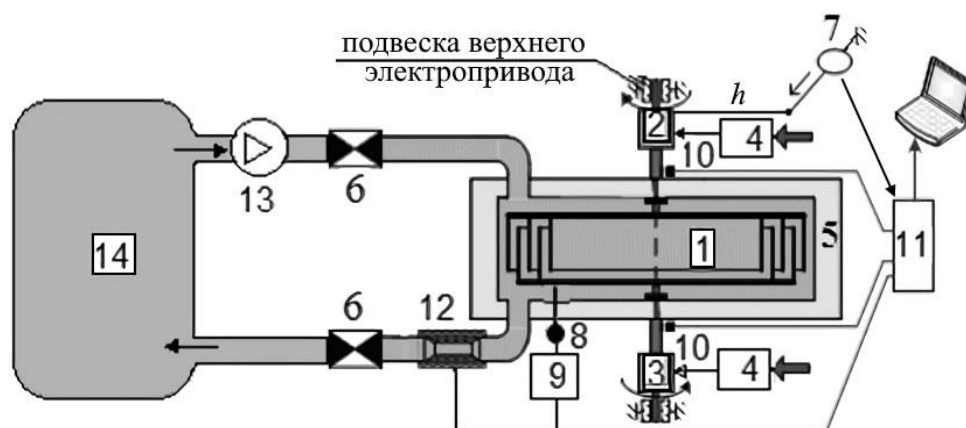


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки с макетом теплогенератора (1 – теплогенератор, 2 – верхний электропривод, 3 – нижний электропривод, 4 – блоки управления скоростью вращения электроприводов, 5 – теплоизоляция, 6 – запорно-регулирующая арматура, 7 – динамометр, 8 – датчик температуры, 9 – электронный блок термометра, 10 – датчики тахометров, 11 – микропроцессорный блок обработки данных, 12 – расходомер, 13 – циркуляционный насос, 14 – теплообменник)

Система заполняется рабочей вязкой жидкостью с заданными свойствами, которая при работе теплогенератора нагревается за счет сдвиговых напряжений в кольцевых каналах. При этом кинетическая энергия привода полностью преобразуется в тепловую энергию. Отбор тепловой энергии от теплогенератора осуществляется за счет циркуляции рабочей жидкости в замкнутом контуре, содержащем теплообменник и аккумулятор тепловой энергии. Установка позволяет исследовать влияние вязкости рабочей жидкости и угловой скорости вращения роторов на величину сопротивления их встречному вращению.

На рисунке 2 приведен фрагменты конструкции теплогенератора, фотографии роторов и блока теплогенератора в сборе. Вложенные в зазоры друг друга односторонние роторы образуют систему цилиндрических коаксиальных кольцевых каналов диаметром от 196 до 304 мм. Каждый ротор имеет 7 цилиндрических колец, изготовленных из полос алюминиевого сплава высотой 50 мм и толщиной 1,5 мм. Образующаяся коаксиальная мультицилиндровая система состоит из 13 кольцевых цилиндрических каналов: 7 каналов шириной 2 мм и 6 каналов шириной 3,5 мм. Объем, занятый жидкостью в кольцевых каналах теплогенератора, равен 1,4 л. Конструкция теплогенератора имеет массу 12 кг.

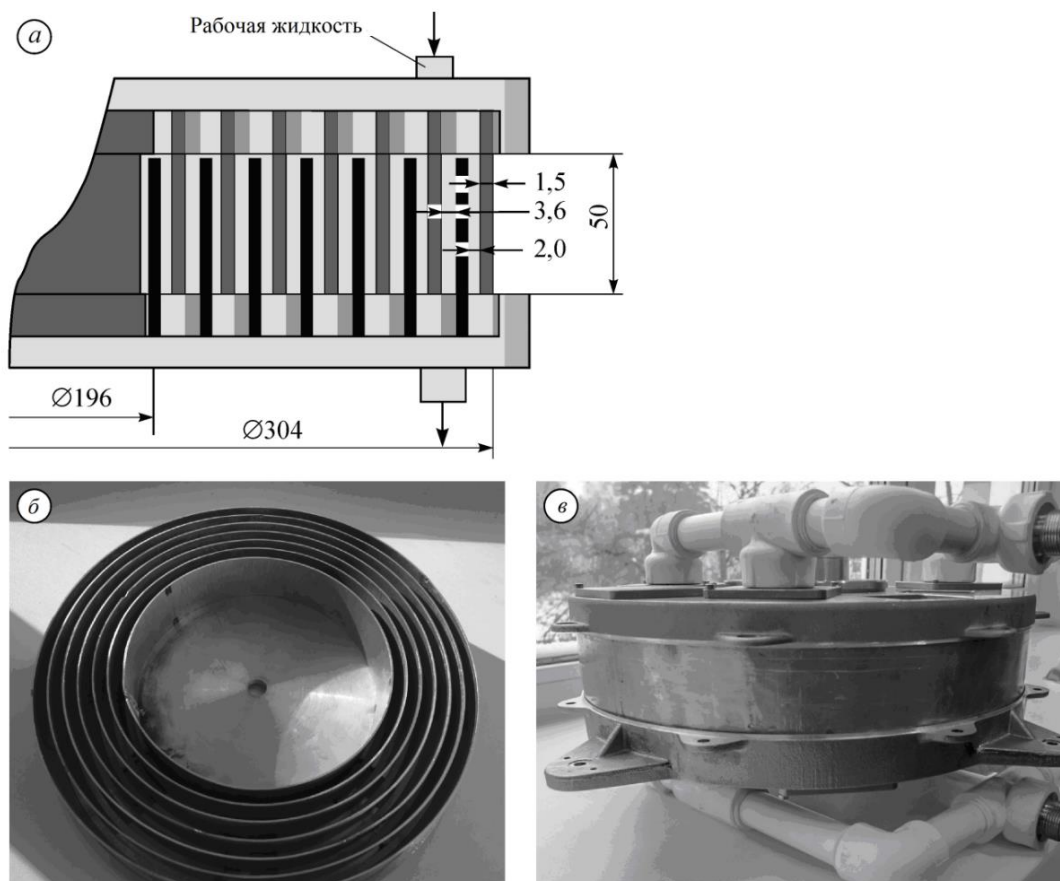


Рисунок 2 – Эскиз конструкции роторов (а), фотографии роторов (б) и теплогенератора в сборе (в)

При проведении исследований выделяемую генератором тепловую мощность можно определить тремя методами:

1 - по регистрации за известный промежуток времени прироста температуры массы заполненного рабочей жидкостью теплоизолированного генератора;

2 - по вкладываемой механической энергии на основании измеренного момента сопротивления вращению и относительной скорости вращения;

3 - по разности энтальпий жидкости на входе и выходе теплогенератора.

Положение о том, что трение жидкости о движущиеся стенки кольцевого канала и относительном смещении параллельных слоев в объеме жидкости в закрытой системе полностью переходит в тепло, позволило предложить методику измерения тепловой мощности по измеренному моменту сопротивления вращению роторов теплогенератора и их скорости вращения:

$$N = M \cdot \Omega, \quad (1)$$

где N [Вт] – механическая мощность, M [Н·м] – измеренный момент сопротивления вращению роторов, Ω [1/с] – относительная угловая скорость вращения роторов.

Состояние потока влияет на коэффициент сопротивления вращению и зависит от скорости вращения и геометрических параметров цилиндров, состояния их поверхности (рельефа), вязкости и плотности рабочей жидкости. В зависимости от скорости вращения цилиндров в кольцевой системе Куэтта-Тейлора возникают локальные структуры (вихри, спирали и их комбинации), которые влияют на диссипативные процессы в потоке. Для исследований особенностей течения в многощелевом устройстве реализован метод регистрации пульсаций и величины момента сопротивления вращению роторов. Данные, полученные созданной измерительной системой, дают информацию о спектре генерируемых пульсаций момента в жидкости одновременно во всех щелевых каналах.

В третьей главе представлены результаты исследования процессов тепловыделения в мультицилиндровой системе Куэтта-Тейлора. Показано влияние угловой скорости вращения роторов и вязкости рабочей жидкости на количество выделяемой в теплогенераторе энергии в широком диапазоне чисел Рейнольдса.

В исследовании использовалось шесть видов рабочей жидкости: дистиллированная вода и пять видов водоглицеринового раствора в диапазоне кинематической вязкости $\nu = (1-72) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Вязкость и плотность раствора определялись его температурой и концентрацией воды и глицерина. Зависимость вязкости и плотности рабочих жидкостей от температуры была определена в специальной серии экспериментов. Диапазон изменения относительной угловой скорости вращения роторов составлял $\Omega = (12,5-56,5) \text{ рад/с}$. Для подробного анализа процессов теплогенерации было проведено две серии экспериментов, основные результаты которых отражены на рисунках 3(а) и 3(б).

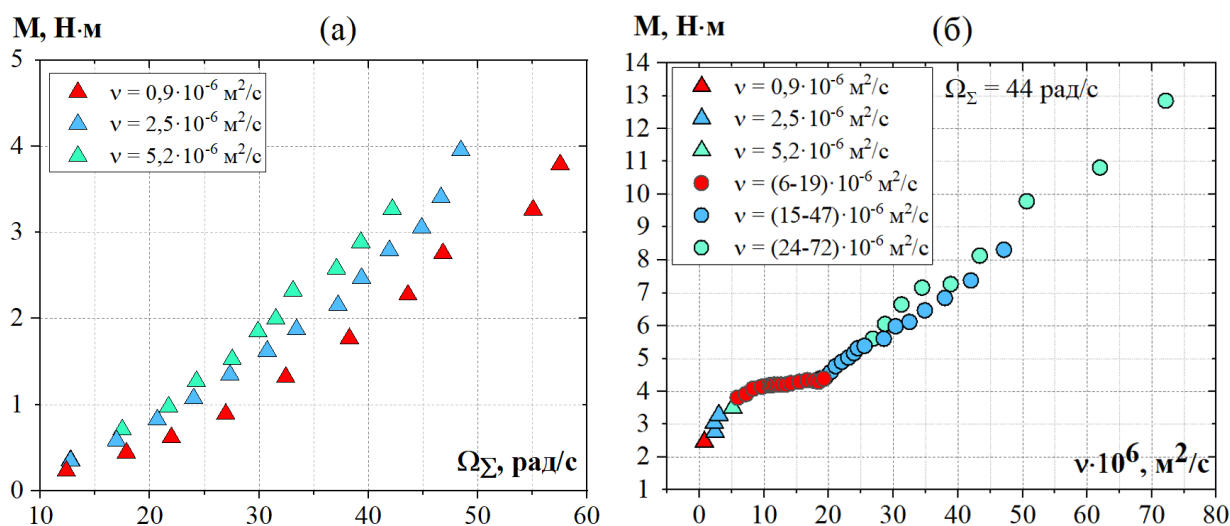


Рисунок 3 – Зависимость момента сопротивления от относительной угловой скорости вращения роторов при постоянной вязкости (а), при постоянной скорости вращения роторов $\Omega = 44 \text{ рад/с}$ (б)

В экспериментах при фиксированной вязкости рабочей жидкости ν (рисунок 3а) наблюдается степенная зависимость величины M от угловой скорости Ω . Причем при одинаковых значениях Ω большему значению вязкости соответствует большее значение M . В экспериментах при фиксированной относительной угловой скорости вращения роторов Ω в процессе каждого эксперимента при возрастании температуры рабочей жидкости происходит соответствующее уменьшение вязкости этой жидкости.

В области малых значений вязкости ($\nu < 20 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$) наблюдается плато со слабой зависимостью момента от вязкости. Затем, по мере увеличения вязкости, величина момента также интенсивно увеличивается. Кроме того, все опытные данные на рисунке 3б, полученные для растворов с сильно отличающимися свойствами, хорошо обобщаются между собой.

Экспериментальные данные, изображенные на рисунке 3 были получены для определенных геометрии и размеров системы кольцевых каналов теплогенератора. Эти данные трудно использовать для анализа работы теплогенераторов иной геометрии и размеров. Поэтому был предложен подход к обобщению полученных данных, который заключался в представлении конструкции многоцилиндрового теплогенератора в виде одиночного эквивалентного кольцевого канала между двумя коаксиальными цилиндрами. В качестве базисных величин такого эквивалентного канала было принято, что:

- радиус внутреннего цилиндра равен среднему значению радиуса мультицилиндровой системы: $R_i = R_{cp} = 0,124 \text{ м}$;
- высота эквивалентного канала равна сумме высот всех каналов теплогенератора: $L = \sum L_k = 13 \cdot 0,05 = 0,65 \text{ м}$;
- объем эквивалентного канала равен сумме объемов кольцевых зазоров теплогенератора: $V = \sum V_k = 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$;
- ширина эквивалентного канала (зазора между двумя цилиндрами) $\delta = V / (2\pi \cdot R_i \cdot L) = 0,0027 \text{ м}$;
- радиус внешнего цилиндра эквивалентного канала $R_o = R_i + \delta$.

Такой подход позволил привести рассматриваемую мультицилиндровую систему теплогенератора к эквивалентному классическому одиночному каналу с течением Куэтта-Тэйлора и перенести полученные данные на иные размеры и геометрию теплогенераторов. В большинстве работ, посвященных исследованию течения Тэйлора-Куэтта в одиночном кольцевом канале, для обобщения экспериментальных данных используется безразмерный коэффициент момента сопротивления, а в качестве безразмерного аргумента используется число Рейнольдса

$$Re = \Omega_{\Sigma} \cdot R_{cp} \cdot \delta / \nu. \quad (2)$$

Воспользуемся описанным выше подходом, базирующимся на замене мультицилиндровой системы одиночным эквивалентным кольцевым каналом

с эффективными размерами. Коэффициент момента сопротивления вращению внутреннего цилиндра для одиночного эквивалентного кольцевого канала, согласно Г. Шлихтингу, можно записать в виде:

$$C_M = M/M_0, \quad (3)$$

где $M_0 = (\pi/2)\rho\Omega^2 R_i^4 L$ – характерный момент сопротивления вращению для эквивалентного кольцевого канала.

Экспериментальные данные, приведенные на рисунке 3, были обработаны в виде зависимости $C_M = f(Re)$. Результаты такой обработки представлены на рисунке 4. Вертикальными линиями на рисунке 4 выделены три области значений чисел Рейнольдса, в которых наблюдаются следующие режимы течения: $Re < 280$ (число Тэйлора $Ta = Re \cdot (\delta/R_i)^{1/2} < 41,3$) – ламинарное течение без вихрей, в этой области $C_M \sim Re^{-1}$; $280 < Re < 2800$ ($41,3 < Ta < 400$) – ламинарное течение с вихрями Тэйлора; $Re > 2800$ ($Ta > 400$) – турбулентное течение, в этой области $C_M \sim Re^{-0,2}$. Пунктирными линиями на рисунке 4 представлены экспериментально-расчетные результаты из работы Г. Шлихтинга для течения Куэтта–Тэйлора в зазоре между двумя коаксиальными цилиндрами, из которых внутренний вращается, а наружный неподвижен. Эти результаты получены для случая, когда $\delta/R_i = 0,028$ (в настоящих экспериментах для одиночного эквивалентного канала это отношение было близко к данным Дж. Тейлора и составляло $\delta/R_i = 0,021$). Для ламинарного режима течения в результате расчета получено $C_M \sim Re^{-1}$, для турбулентного – $C_M \sim Re^{-0,2}$.

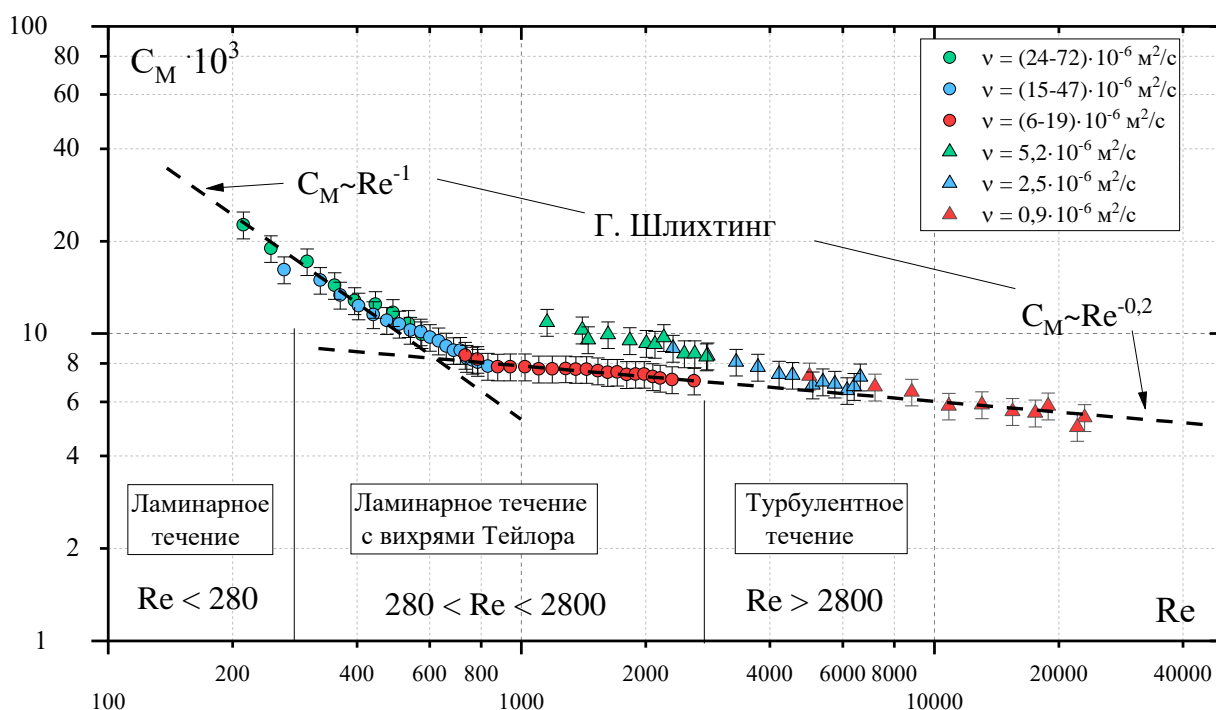


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента момента сопротивления вращению для одиночного эквивалентного кольцевого зазора от числа Рейнольдса

Несмотря на значительное отличие исследуемой мультицилиндровой системы Куэтта–Тэйлора от классического кольцевого канала между двумя вращающимися цилиндрами на рисунке 4 можно наблюдать хорошее согласование между теорией и представленными экспериментальными данными настоящего исследования. Этот важный вывод дает основание для практического использования модели эквивалентного одиночного канала между вращающимися цилиндрами для описания сопротивления в сложных многоцилиндровых устройствах. Подобный подход можно использовать, в том числе, и при проведении оптимизационных инженерных расчетов диссипативных теплогенераторов.

В четвертой главе описываются особенности течения в мультикольцевой системе теплогенератора. Предложена методика исследования структуры течения в многоцилиндровой системе с помощью анализа амплитудно-частотных спектров пульсаций мгновенного значения момента сопротивления. Показано, что отклонение мгновенного значения момента сопротивления вращению роторов теплогенератора от среднего значения наблюдается в основном в области низкочастотных энергосодержащих образований в кольцевом течении жидкости. Параметры этих образований определяются особенностями конструкции кольцевых зазоров многоцилиндровой системы Куэтта-Тэйлора и вязкостью рабочей жидкости теплогенератора.

Одной из задач исследования являлось изучение структуры течения вязкой жидкости в зазорах, основанное на анализе экспериментально зарегистрированных пульсаций мгновенного значения момента сопротивления и амплитудных спектров пульсаций этого момента в диапазоне частот от 0 до 600 Гц. Полученные результаты сопоставлялись с известными результатами исследований для течения в одиночной щели.

Анализ временных осциллограмм момента сопротивления, полученных при проведении экспериментов, показывает, что кроме пульсаций малой амплитуды, существуют стохастические пульсации момента сопротивления с амплитудой до $\pm 20\%$ от величины усреднённого значения этого момента, а вероятность возникновения подобных пульсаций носит случайный характер затухающих низкочастотных негармонических колебаний. Наличие таких пульсаций момента связано с формированием в зазорах различных гидродинамических образований, комбинации вихрей и спиралей, которые для классического одиночного канала были подробно описаны в работе C.D. Andereck, S.S. Liu и H.L. Swinney.

На рисунке 5 приведены полученные амплитудно-частотные спектры пульсаций момента силы сопротивления для четырёх значений вязкости рабочей жидкости, охватывающих исследованный диапазон вязкостей.

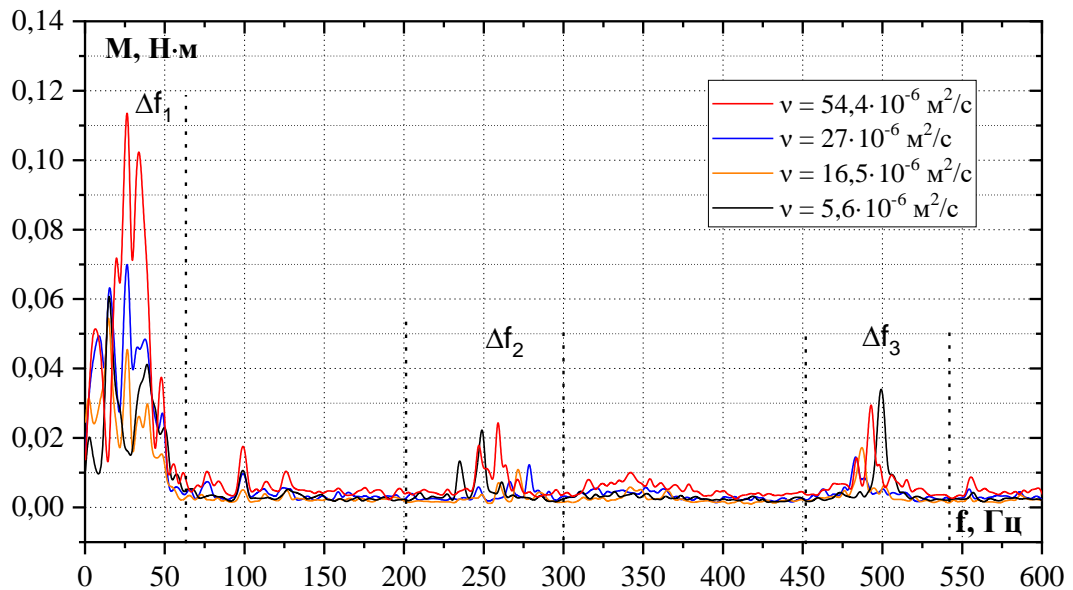


Рисунок 5 – Спектры пульсаций момента сопротивления вращению роторов теплогенератора при относительной скорости вращения $\Omega = 44$ рад/с для четырех значений вязкости рабочей жидкости

Из рисунка 5 следует, что во всем рассмотренном диапазоне вязкостей рабочей жидкости спектры по распределению энергии по частотам практически подобны, но наблюдается зависимость амплитуды гармоник от вязкости: с ростом вязкости амплитуды увеличиваются. В этих спектрах, отражающих распределение энергии пульсаций по частотам, можно выделить три частотных поддиапазона: низкочастотный (0,2 – 60) Гц и два высокочастотных (230 – 300) Гц и (460 – 540) Гц. Можно отметить, что в низкочастотной области наблюдается группы пульсаций с постоянной частотой, с зависимостью амплитуды пульсаций от вязкости. В спектрах для всех значений вязкости наблюдаются характерные резонансные процессы с частотами $f_j = (15, 19, 27, 35, 39, 49)$ Гц. Эти частоты определяются радиусом цилиндров и зазором щелей, в которых существуют данные пульсации. При этом основная часть энергии пульсирующих структур (до 90%) выделяется в области низкочастотного диапазона (14 – 40) Гц.

Показано, что отклонение мгновенного значения момента сопротивления вращению роторов теплогенератора от среднего значения в основном зависит от низкочастотных энергосодержащих образований. Параметры этих образований определяются особенностями конструкции кольцевых зазоров многоцилиндровой системы Куэтта-Тэйлора и вязкостью рабочей жидкости теплогенератора.

Высокочастотная область (от 200 до 600 Гц) связана с вихревыми структурами, частота которых определяется шириной кольцевых зазоров δ . Так как в испытанной конструкции теплогенератора присутствовали две группы кольцевых зазоров (шириной 3,6 мм и 2,0 мм), то в высокочастотной области спектров пульсаций момента сопротивления вращению наблюдались

две подобласти, соответствующие этим значениям ширины кольцевых зазоров: (230 – 300) Гц и (460 – 540) Гц.

В пятой главе предложен алгоритм расчета геометрических конструктивных параметров многоцилиндровой кольцевой системы теплогенератора, в том числе и габаритных размеров этой системы для выбранных заранее значений мощности теплогенератора и вязкости его рабочей жидкости.

Для составления рекомендаций к расчету теплогенераторов с течением Куэтта-Тейлора произвольной мощности экспериментальные данные полученные в главе 3 были представлены в виде единой безразмерной зависимости как функции от числа Рейнольдса:

$$N_B = f(Re). \quad (4)$$

Эта зависимость является основой для проведения расчетов конструкционных параметров теплогенераторов заданной мощности при заранее заданных скоростях вращения роторов теплогенератора, вязкости рабочей жидкости и некоторых геометрических параметрах. Здесь безразмерный комплекс интерпретируется как безразмерная мощность:

$$N_B = N / m \cdot \nu \cdot \Omega^2, \quad (5)$$

где N , Вт – мощность теплогенератора; m , кг – масса рабочей жидкости в кольцевых зазорах теплогенератора; ν , $\text{м}^2/\text{с}$ – кинематическая вязкость рабочей жидкости; Ω , рад/с – относительная угловая скорость вращения роторов теплогенератора.

На рисунке 6 полученные экспериментальные данные представлены в виде обобщенной безразмерной зависимости.

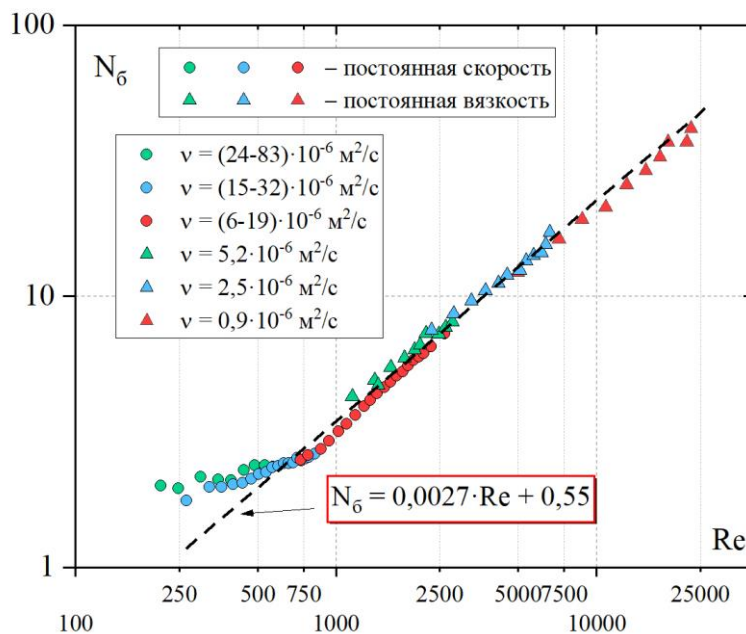


Рисунок 6 –
Зависимость
обобщенной
безразмерной
мощности от числа
Рейнольдса

Как видно из графика, данные, полученные в экспериментах, существенно отличающихся по условиям их проведения (переменная частота вращения роторов теплогенератора, разная вязкость и температура рабочей жидкости) хорошо обобщаются единой зависимостью. Эта зависимость в практически важном диапазоне чисел Рейнольдса вполне удовлетворительно аппроксимируется линейной функцией:

$$N_B = 0,0027 \cdot Re + 0,55. \quad (6)$$

Безразмерная зависимость (6) дает возможность определить геометрические конструктивные параметры многоцилиндровой кольцевой системы теплогенератора, в том числе и габаритные размеры этой системы. Для проектирования реального теплогенератора в рамках диссертации предложен алгоритм численного расчета. Действительно, для заданной мощности генератора, выбрав рабочую жидкость с известными свойствами и относительную скорость вращения цилиндров, из соотношений (2) – (6), а также используя базисные величины эквивалентного канала для принятой толщины зазора, рассчитываются требуемые параметры теплогенератора. В качестве примера в таблице 1 приведены результаты расчета нескольких вариантов геометрических параметров теплогенератора мощностью 10 кВт, 20 кВт и 50 кВт для которых максимальная частота вращения каждого ротора составляет 5 Гц.

Таблица 1 – Результаты расчета геометрических параметров теплогенератора

Номер варианта	Re	N, кВт	N_B	m, кг	V, л	$L_э$, м	n, шт.	D_{min} , м	D_{max} , м
1	7536	10	33,6	15,1	13,7	3,64	18	0,327	0,473
2	5024	10	22,8	11,1	9,8	1,96	13	0,335	0,465
3	5233	10	23,7	7,1	6,2	0,78	8	0,453	0,547
4	9420	20	41,7	24,3	22,1	4,70	16	0,437	0,562
5	7536	20	33,6	15,1	13,4	1,77	9	0,556	0,644
6	7327	20	32,7	10,3	8,9	0,81	8	0,651	0,749
7	9420	50	41,7	60,8	55,3	11,74	23	0,406	0,594
8	7536	50	33,6	37,7	33,4	4,43	11	0,545	0,655
9	7327	50	32,7	25,9	22,3	2,03	7	0,659	0,741

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы:

1. Впервые предложена конструкция коаксиальной многоцилиндровой системы кольцевых каналов с оппозитным вращением стенок и экспериментально обосновано её применение в качестве генератора тепловой энергии прямого преобразования.

2. Предложена и экспериментально обоснована методология измерения тепловой мощности теплогенератора косвенным методом на основе регистрации момента сопротивления вращения цилиндров.

3. Впервые получены экспериментальные данные об интенсивности тепловыделения в коаксиальной многоцилиндровой системе с оппозитным вращением стенок.

4. С помощью разработанной методологии исследования показано, что для жидкостей с вязкостью в диапазоне $(1 - 83) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ частотные спектры момента сопротивления подобны. Основная часть тепловой энергии пульсаций (до 90%) выделяется в низкочастотных областях спектра.

5. Предложен подход, который позволяет представить мультицилиндровую конструкцию теплогенератора в виде одиночного эквивалентного кольцевого канала между двумя вращающимися цилиндрами, из которых внутренний вращается, а внешний неподвижен. Данный подход позволяет обобщить полученные экспериментальные данные в виде зависимости коэффициента момента сопротивления вращению внутреннего цилиндра для одиночного эквивалентного кольцевого зазора от числа Рейнольдса. Полученные в такой обработке экспериментальные данные показали хорошее совпадение с расчетными и экспериментальными данными для классического случая течения Куэтта–Тэйлора в одиночном кольцевом зазоре.

6. На основе полученных данных предложен инженерный метод расчета конструктивных параметров многоцилиндровой кольцевой системы теплогенератора, в том числе и габаритных размеров этой системы для выбранных заранее значений мощности теплогенератора и вязкости его рабочей жидкости.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, входящих в перечень российских рецензируемых научных журналов (перечень ВАК):

1. **Миськив, Н.Б.** Генерация тепла в мультицилиндровой системе Куэтта-Тейлора / В.Н. Мамонов, Н.Б. Миськив, А.Д. Назаров, А.Ф. Серов, В.И. Терехов // Теплофизика и Аэромеханика – 2019. – Т. 26 (5). – С. 729 –739.

2. **Миськив, Н.Б.** Автоматизированная система обеспечения исследования структуры течения в многокольцевом потоке Куэтта-Тейлора / Н.Б. Миськив, А.Д. Назаров, А.Ф. Серов, В.Н. Мамонов // Автотметрия – 2020. – Т. 56 (3). – С. 101 – 109.

3. **Миськив, Н.Б.** Расчет конструктивных параметров мультицилиндрового теплового генератора на основе течения

Куэтта-Тейлора / Н.Б. Миськив, А.Д. Назаров, А.Ф. Серов, В.Н. Мамонов // Доклады АН ВШ РФ – 2022. – Т. 57 (4). – С. 29 – 38.

Статьи в материалах конференций, входящих в международные базы Scopus и/или Web of Science

4. **Miskiv, N.B.** Flow regimes in a multi-gap circular Couette-Taylor system with opposite rotating cylinders / A.F. Serov, V.N. Mamonov, A.D. Nazarov, N.B. Miskiv // J. Phys.: Conf. Ser. – 2021. – Vol. 2119. – P. 01210.

5. **Miskiv, N.B.** Improving the efficiency of carousel wind turbine using aerodynamic shield / A. F. Serov, V. N. Mamonov, A. D. Nazarov, N. B. Miskiv // J. Phys. Conf. Ser. – 2021. – Vol. 2119. – P. 012093.

Патент на изобретение

6. Серов А. Ф., Назаров А. Д., **Миськив Н. Б.**, Мамонов В. Н., Терехов В. В. Многоцелевой оппозитный ветротеплогенератор на эффекте Куэтта–Тэйлора с распределителем вращательного момента от вала удаленного ветроколеса // Патент России № 2774137.2022. Бюл. № 17.

Другие публикации по теме диссертации

7. Экспериментальное исследование конверсии механической энергии в тепло в мультицилиндровой системе Куэтта–Тэйлора с независимо вращающимися / А. Ф. Серов, А. Д. Назаров, В. Н. Мамонов, В. И. Терехов, **Н. Б. Миськив** // Труды Седьмой Российской национальной конференции по теплообмену: в 3 томах (22–26 октября 2018, Москва, Россия). – М.: Издательский дом МЭИ, 2018. – Т. 3. – С. 281.

8. Пульсации силы сопротивления кольцевого потока в системе Куэтта–Тейлора при встречном вращении цилиндров / **Н. Б. Миськив**, А. Ф. Серов, А. Д. Назаров, В. Н. Мамонов // Тезисы докладов XV Всероссийской школы–конференции: Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики (20–23 ноября 2018, Новосибирск, Россия). – Новосибирск: ИТ СО РАН, 2018. – С. 91.

Подписано к печати 05.07.2023 г. Заказ № 3, Формат 60×84/16.

Объем 1,22 усл. печатн. лист, Тираж 100 экз.

Отпечатано в Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

630090, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1