



**IX Международная конференция
ТЕПЛОМАССОБМЕН
И ГИДРОДИНАМИКА
В ЗАКРУЧЕННЫХ ПОТОКАХ**

10 – 12 октября 2023 года

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ



125



НАЦИОНАЛЬНЫЙ КОМИТЕТ
ПО ТЕПЛОМАССОБМЕНУ
Российской Академии наук

приоритет2030⁺
ЛИДЕРАМИ СТАНОВЯТСЯ

Нижний Новгород, 2023

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»



**ТЕПЛОМАССОБМЕН И ГИДРОДИНАМИКА
В ЗАКРУЧЕННЫХ ПОТОКАХ**

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

IX Международной конференции

10-12 октября 2023, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород

© Нижегородский государственный
технический университет
им. Р. Е. Алексеева, 2023

Нижний Новгород 2023

УДК 532.5

Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках: тезисы докладов IX Международной конференции [Электронный ресурс] – Электрон. дан. – Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2023. – 1 электрон. Диск (CD-ROM): зв., цв., 12 см. – Систем. требования: ПК с процессором 486; ОЗУ 8 Мб.; операц/ система Windows 95; CD-ROM дисковод; мышь. – Загл. с экрана. – 30 экз.

Сборник содержит доклады девятой международной конференции «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках», которая проводилась 10-12 октября 2023 года в Нижнем Новгороде на базе Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. В сборнике представлены доклады по направлениям: закрученные и вихревые течения в технических устройствах и в природе; горение при закрутке рабочей среды; тепломассообмен на макро-, микро- и наномасштабах; прогнозирование аномальных природных явлений; интенсификация теплообмена при закрученных и вихревых движениях.

Рецензенты:

доктор технических наук, старший научный сотрудник ИТ СО РАН

П.Д. Лобанов;

кандидат технических наук, начальник НИИК АО «ОКБМ Африкантов»

М.А. Камнев

Редактор О.В. Пугина

Электронное издание подготовлено ЦДОТ НГТУ им. Р.Е. Алексеева, компьютерная верстка С. Зубкова

ISBN 978-5-502-01732-9

Адрес издающей организации:

НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24.

© Нижегородский государственный
технический университет
им. Р. Е. Алексеева, 2023

История отечественных конференций, связанных с закруткой потока, ведет свое начало с цикла Всесоюзных научно-технических конференций «Вихревой эффект и его применение в технике», проводившихся в Куйбышеве (Самаре) с 1971 по 1993 г. Идея обмена мнениями и контактов специалистов, занимающихся исследованием закрученных потоков, была с энтузиазмом встречена научной общественностью постсоветской России и подхвачена членом-корреспондентом РАН Ю.В. Полежаевым, предложившим организовать первую российскую конференцию «Закрутка потока для повышения эффективности теплообменников» в Москве, в Институте высоких температур РАН с 9 по 11 апреля 2002 года. Всего на конференции было представлено 23 доклада ведущими российскими коллективами. На второй российской конференции «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках», которая проходила 15–17 марта 2005 г. в Московском энергетическом институте (ТУ) и была посвящена его 75-летию, представлено уже около 100 докладов. На третьей и четвертой международных конференциях, проведенных в МЭИ в 2008 и 2011 гг., работало шесть секций и было представлено 120 и 150 докладов, соответственно. С лекциями выступили ведущие мировые ученые: А.Е. Bergles (США), John R. Lloyd (США), В.И. Терехов (Россия), D.B. Spalding (UK), N. Syred (UK), А.А. Халатов (Украина), Е.Д. Федорович (Россия) и др.

5-я и 6-я конференции прошли в Казани (КНИТУ-КАИ) и Новосибирске (ИТ СО РАН) в 2015 и 2017 г. Седьмая конференция «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках» была проведена в РГАТУ им. П. А. Соловьева (г. Рыбинск) в октябре 2019 г. Восьмая конференция проводилась на базе НИУ «МЭИ» (г. Москва) в октябре 2021 г.

Оргкомитет

СОДЕРЖАНИЕ

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ	11
Терехов В.И. Интенсификация теплообмена в застойных зонах отрывных потоков возможности и перспективы	12
Куйбин П.А., Шторк С.И. Проблемы расширения диапазона динамической устойчивости гидротурбин...	14
Тупоносов Ф.В., Артемов В.И., Яньков Г.Г., Дедов А.В. Применение статических смесителей в энергетике	15
Субботин С.В., Шмакова Н.Д., Козлов В.Г., Ерманюк Е.В. Зональные течения и волны Россби в аттракторах инерционных волн	17
Веретенников С.В. Энергоразделение в вихревых трубах: современное состояние исследований и перспективы развития	19
Маркович Д.М., Дулин В.М. О влиянии винтовых вихревых структур на турбулентный перенос, смесеобразование и горение в закрученных струях	20
СЕКЦИОННЫЕ ДОКЛАДЫ	22
СЕКЦИЯ 1. ЗАКРУЧЕННЫЕ И ВИХРЕВЫЕ ТЕЧЕНИЯ В ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ И В ПРИРОДЕ	23
Комендантов А.С., Кузма-Кичта Ю.А., Круг А.Ф., Киселев А.С. Обобщение данных по критическим тепловым нагрузкам в прямолинейном и закрученном потоках при кипении недогретой воды	23
Наумов И.В., Квон А.З., Скрипкин С.Г., Шарифуллин Б.Р., Штерн В.Н. Влияние вращения на изменение граничных условий линии раздела двух несмешивающихся жидкостей	24
Воронина Е.А., Кузенов В.В., Рыжков С.В. Исследование плазменных вихревых структур в условиях сильного внешнего магнитного поля	25
Арефьев К.Ю., Абрамов М.А. Тепломассообмен в закрученных двухфазных течениях при транс- и сверхзвуковых скоростях внутри удлиненных каналов	27
Шваб А.В., Соломаха А.Е. Моделирование турбулентного потока газ-твердые частицы в центробежном классификаторе	28
Акашев А.А., Решетников А.В., Скоков В.Н., Бусов К.А. Влияние закрутки на распыление струй перегретого этанола	30
Базюк С.С., Нужин В.Н., Солдаткин Д.М. Изучение гидродинамики тепловыделяющих сборок витых ТВЭЛов исследовательских реакторов	32

Балабина Т.Ю., Добров А.А., Качалин Г.Н., Кудряшов Е.А., Легчанов М.А., Хробостов А.Е.	
Экспериментальное и расчетное моделирования влияния открытопористой структуры на однородность газового потока	34
Брызгунов П.А, Осипов С.К., Комаров И.И.	
Инженерная методика опережающей верификации rans-моделирования турбулентных течений в каналах.....	36
Веретенников С.В., Шувалов Е.А.	
Визуализация процессов кавитации в противоточном закрученном течении	38
Дмитриев С.М., Демкина Т.Д., Доронков Д.В., Доронкова Д.С., Добров А.А., Курицин Д.Д., Пронин А.Н., Рязанов А.В., Солнцев Д.Н.	
Исследование гидродинамических процессов в теплоносителе входного участка ТВС реактора типа РИТМ атомной станции малой мощности	40
Дмитриев С.М., Демкина Т.Д., Доронков Д.В., Доронкова Д.С., Добров А.А., Курицин Д.Д., Пронин А.Н., Рязанов А.В., Солнцев Д.Н.	
Гидродинамика теплоносителя на выходе из топливной кассеты реактора типа РИТМ.....	41
Заболотский А.В., Хадыев В.Т., Турчин М.Ю.	
Моделирование теплообмена на своде туннельной печи для контроля состояния футеровки	43
Засимова М.А., Рис В.В., Иванов Н.Г.	
Исследование вихревых течений, формируемых импульсной турбулентной струей	44
Тупоносов Ф.В., Фещенко К.П., Шариков С.В., Захаренков А.В., Дедов А.В.	
Экспериментальное исследование потерь давления на модели смесительного устройства.....	46
Иванов Н. А., Сатаев А. А	
Расчетное моделирование процесса фильтрации в аппарате циклонного типа с целью его оптимизации	48
Засимова М.А., Иванов Н.Г., Красикова А.Д., Степашева Е.Д.	
Оценка возможностей управления автоколебательным режимом струйного течения, развивающегося в ограниченном пространстве.....	49
Кабардин И.К., Правдина М.Х., Яворский Н.И. Меледин В.Г., Гордиенко М.Р., Зубанов К.С., Какаулин С.В., Полякова В.И.	
Применение метода ЛДА для экспериментального исследования кризиса течения в вихревой трубе Ранка–Хилша	51
Кадыйров А.И., Вачагина Е.К.	
Визуализация течения полимерного раствора в канале со шнековой вставкой ..	53
Ковалева Н.Н., Давыдов А.А., Вятков В.В.	
Особенности формирования пленочного охлаждения области входной кромки соплового аппарата в условиях входной неравномерности параметров потока .	54
Колесниченко И.В., Мамыкин А.Д., Халилов Р.И.	
Взаимодействие вихревых структур, созданных вращающимися магнитными полями в цилиндрическом канале с транзитным потоком	56

Скрипкин С.Г., Цой М.А., Кравцова А.Ю.	
Развитие кавитационных течений в щелевых зазорах сложной геометрии	58
Куйбин П.А.	
Отличия в описании левовинтовых и правовинтовых вихрей.....	59
Легчанов М.А., Солнцев Д.Н., Пронин А.Н., Рязанов А.В., Курицин Д.Д., Малыгин Д.С., Суглицкая Л.М.	
Характеристики теплообмена в каналах с ленточными завихрителями в условиях образования минеральных отложений	61
Лепешкин А.Р.	
Моделирование аэродинамического нагрева вращающихся рабочих колес турбин авиадвигателей при стендовых циклических испытаниях.....	63
Лепешкин А.Р.	
Исследование теплопроводности металлических материалов вращающихся деталей в поле центробежных ускорений и сил	65
Лепешкин А.Р.	
Исследование теплопроводности металлических материалов при воздействии низкочастотных механических колебаний	66
Мацин Н.В., Рязанов Р.Р., Соборнов А.Е., Дмитриев С.М., Котин А.В.	
Расчетно-экспериментальное исследование пульсационных процессов при смешении неизотермических потоков теплоносителя	68
Митрофанова О.В.	
О возможности фазового перехода второго рода в текучих средах на примере вихревой структуризации закрученных течений.....	70
Михайлов Е.А., Тепляков И.О., Степанова А.П., Хасаева Т.Т., Азнагулов М.И.	
Маркеры движения среды при электровихревом течении в полусфере при наличии внешнего магнитного поля.....	72
Молочников В.М., Калинин Е.И., Мазо А.Б., Пашкова Н.Д., Паерелий А.А.	
Гемодинамические процессы в области соединения шунта и бедренной артерии: эксперимент и численное моделирование	74
Никулин А.С., Мелихов В.И.	
Моделирование истечения двухфазного потока через отверстие погруженного дырчатого листа	76
Носкова К.Р., Гурьянова М.М., Гурьянов А.И.	
Влияние нестационарной структуры течения за компрессором ГТД на газодинамику камеры сгорания	77
Окатьев Р.С., Колесниченко И.В.	
Эволюция распределения проводящей дисперсной примеси в процессе МГД-перемешивания.....	79
Митрофанова О.В., Поздеева И.Г., Старовойтов Н.А.	
Исследование переходных режимов течения в предрезонансной области для открытой гидромеханической системы	81
Попович С.С., Здитовец А.Г., Киселев Н.А., Виноградов Ю.А.	
Исследование эффекта аэродинамического охлаждения при поперечном обтекании цилиндра сжимаемым дозвуковым потоком воздуха	83

Потапов В.Н., Костюнин В.В., Костюнина Т.В., Калиновская К.С.	
О неравномерности интенсивности крутки среды по радиусу	85
Сафронов А.А.	
Исследование закономерностей самопроизвольного изгиба вязкой струи, истекающей из капиллярного отверстия	87
Скрипкин С.Г., Куйбин П.А., Шторк С.И.	
Двойные нестационарные вихри в закрученном потоке	88
Соколов М.А., Разуванов К.Г.	
Исследование гидродинамики и теплообмена затопленной струи жидкого металла в продольном магнитном поле	89
Михайлов Е.А., Степанова А.П., Таранюк А.А., Чудновский А.Ю.	
Нелинейное стационарное электровихревое течение между двумя цилиндрами	91
Тютюма В.Д.	
Равновесие вращающейся воздушной среды в гравитационном поле.....	93
Митрофанова О.В., Федоринов А.В.	
Численное моделирование теплогидравлических процессов в сложных каналах судовых ЯЭУ	95
Леманов В.В., Шаров К.А. Лукашов В.В., Лапиков М.М.	
Вихревые структуры PUFF в ближнем поле струи	97
Шишкин Н.Е.	
Критерий интенсивности закрутки потока	99
Болтенко Э.А.	
Повышение критических тепловых потоков в тепловыделяющих сборках с трубчатыми твэлами.....	101
СЕКЦИЯ 2. ГОРЕНИЕ ПРИ ЗАКРУТКЕ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ	103
Гурьянов А.И, Евдокимов О.А	
Нестационарные режимы горения в противоточном закрученном течении	103
Ашихмин А.Е., Дюпин А.А., Верходанов Д.А., Пискунов М.В., Стрижак П.А.	
Распыление и горение биотоплива, приготовленного при одноэтапной переэтерификации в наномембранном реакторе	104
Веселов К.Е., Евдокимов О.А.	
Численное моделирование задачи горения жидкого топлива в закрученном воздушном потоке	106
Гайдукова О.С., Дорохов В.В., Стрижак П.А., Шлегель Н.Е.	
Тепломассоперенос и диспергирование при нагреве композиционного топлива	108
Евдокимов О.А., Гурьянов А.И.	
Газодинамика и горение в массивах противоточных закрученных струй	110
Гурьянов А.И., Комова О.В.	
Экологические характеристики сверхбедных режимов горения синтетического топлива на основе водорода в условиях аэродинамического противотока.....	112

Потапов В.Н., Костюнин В.В., Костюнина Т.В.	
Некоторые причины нарушений движения двухфазного потока в вихревых газогенераторах и камерных завихрителях	113
Ильинков А.В., Щукин А.В., Такмовцев В.В., Попов И.А.	
Вихревая стабилизация горения в потоке	115
Прохоров В.Б., Киричков В.С., Чернов С.Л., Извеков А.В.	
Анализ возможности перевода энергетических котлов на непроектные топлива	116
Сергеев С.С.	
Модель для расчета рабочего процесса газопоршневого двигателя с предкамерным зажиганием	118
Фоменко М.В., Фоменко Н.Е., Прохоров В.Б.	
Различные подходы к использованию численного моделирования при разработке схем сжигания твердого топлива с применением прямоточных горелок и сопел	119
Шлегель Н.Е., Клименко А., Стрижак П.А.	
Исследование фрагментации капель водомазутного топлива с добавлением специализированных присадок	121
СЕКЦИЯ 3. ТЕПЛОМАССОБМЕН НА МАКРО-, МИКРО- И НАНОМАСШТАБАХ.....	123
Дмитриев А.С., Макаров П.Г., Михайлов В.В., Михайлова И.А., Чан К.Т.	
Закрученные потоки графеновых наножидкостей для оптимизации процессов генерации пара в тепловой солнечной энергетике	123
Борщев Н.О.	
Метод параметрического определения эффективной тепловой проводимости теплового аккумулятора как функции от температуры по результатам теплофизических испытаний.....	124
Коновалов И.А., Баринов А.А., Чесноков А.А., Макаров М.А., Зырянова Т.К.	
Метод локальной оптимизации расчетной сетки для LES моделирования на основе анализа энергетического спектра турбулентных пульсаций скорости.....	126
Кузнецов В.В., Шамирзаев А.С.	
Гидродинамика и теплообмен при микроканальном и микроструйном охлаждении теплонапряженного оборудования.....	127
Киселёв Н.А., Маластовский Н.С., Виноградов Ю.А.	
Исследование теплообмена в сжимаемом пограничном слое с положительным градиентом давления в малоразмерном канале	129
Светушков Н.Н.	
Интегральный подход к решению нестационарных уравнений теплопроводности.....	131
Антонов Д.В., Федоренко Р.М., Высокоморная О.В., Стрижак П.А.	
Идентификация вторичных фрагментов в результате микровзрыва и паффинга двухжидкостных капель	132

Антонов Д.В., Высокоморная О.В., Стрижак П.А.	
Математическое моделирование процессов получения вторичных капель при соударениях капель жидкостей	135
Финошкина Д.В., Мелихов В.И., Мелихов О.И.	
Анализ возможностей перемешивания расплавов с водой при их контакте	138
Харламов Г.В.	
Моделирование молекулярной диффузии в газах и жидкостях методом молекулярной динамики.....	139
Чукалин А.В., Петров А.В., Шеркунов В.В.	
Расчет влияния внешних воздействий на интенсивность турбулентного переноса количества движения в пограничном слое	141
Черника И.М., Болога М.К.	
Особенности теплообмена и кипения в электрическом поле на модифицированных поверхностях.....	143
Исламова А.Г., Кропотова С.С., Шлегель Н.Е., Стрижак П.А.	
Взаимодействие капель жидкости с частицами угля	146
Асрорзода Н.С., Сафаров М.М.	
Исследование теплопроводности твердых электроизоляционных материалов на основе полимеров с помощью мостика Уитстона.....	148
Сафаров П.М., Зоиров Х.А.	
Влияние нанопорошка диметилкетона (заменителя гидразина) на изменение теплопроводности.....	149
Сафарова Ф.А., Собиров Дж.Ф.	
Теплопроводность бензола при различной массовой концентрации четыреххлористого углерода.....	151
Тиллоева Т.Р., Гортышов Ю.Ф., Сафаров М.М.	
Моделирование и расчет теплового процесса в солнечных батареях в условиях Республики Таджикистан.....	153
Федоренко Р.М., Антонов Д.В., Стрижак П.А.	
Энергетический баланс вторичных фрагментов при микро-взрывном распаде неоднородных капель.....	155
СЕКЦИИ 4, 5. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ АНОМАЛЬНЫХ ПРИРОДНЫХ ЯВЛЕНИЙ; ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ЗАКРУЧЕННЫХ И ВИХРЕВЫХ ДВИЖЕНИЯХ.....	157
Исаев С.А., Никущенко Д.В.	
Энергоэффективные структурированные поверхности: от сферических лунок к наклонным канавкам	157
Кузнецов П.Д., Рувинская Е.А., Куркина О.Е., Куркин А.А.	
Исследование силового воздействия внутренних волн на опоры в шельфовой зоне охотского моря: негидростатические модели SUNTANS и IGW	159

Галаев С.А., Рис В.В.	
Турбулентное течение и теплоотдача на начальном участке канала прямоугольного сечения с односторонним внутренним оребрением	160
Горелов Ю.Г.	
Гидродинамика, интенсификация теплообмена и трения в модернизированных вихревых трактах, каналах охлаждения с комбинацией наклонных ребер и овально-траншейных лунок.....	162
Здитовец А.Г., Киселёв Н.А., Виноградов Ю.А., Попович С.С.	
Влияние режимов обтекания пары круговых цилиндров на эффект энергоразделения: экспериментальное исследование	164
Каримов К.Ф., Тарасевич С.Э., Ермаков А.М.	
Влияние входных и выходных условий на структуру потока при радиальном входе в канал со скрученной лентой	166
Панкратов Е.В.	
Исследование образования вторичных вихрей в закрученном потоке с неподвижными поверхностями	167
Пахомов М.А., Терехов В.И.	
Эйлерово и Лагранжево описания турбулентного газокапельного закрученного потока за внезапным расширением трубы	169
Печенегов Ю.Я., Косов В.А., Косов М.А.	
Сравнение теплогидравлической эффективности теплообмена потока в трубе без и при наличии вставленной скрученной ленты.....	171
Серяков А.В., Конькин А.В., Алексеев А.П.	
Повышение коэффициента теплопередачи коротких тепловых труб путем закручивания парового потока	173
Филиппов М.В., Чохар И.А., Терехов В.В., Терехов В.И.	
Экспериментальное исследование аэродинамики и теплообмена в закрученных кольцевых импактных струях с обратным центральным вдувом	175



ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

Терехов В.И.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. ак. Лаврентьева, 1

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА В ЗАСТОЙНЫХ ЗОНАХ
ОТРЫВНЫХ ПОТОКОВ. ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ**

Наиболее распространенным методом интенсификации теплообмена в каналах является установка чередующихся преград различной формы и размеров на теплообменной поверхности. При этом выигрыш в теплообмене имеет и негативные стороны, в частности могут значительно возрасти гидравлические потери. Кроме того, за точкой отрыва потока образуется застойная плохо продуваемая зона или зона рециркуляции течения, где уровень теплоотдачи является низким, что приводит в итоге к снижению интегрального теплопереноса. Причем протяженность области рециркуляции может быть сопоставима или даже превышать размер зоны присоединения потока, где и происходит основная интенсификация теплообмена [1]. Длина зоны рециркуляции зависит от многих факторов и прежде всего от высоты преграды и может изменяться в широких пределах $x_{cr}/H = 2 - 20$, где x_{cr} - координата точки присоединения потока, а H – высота преграды.

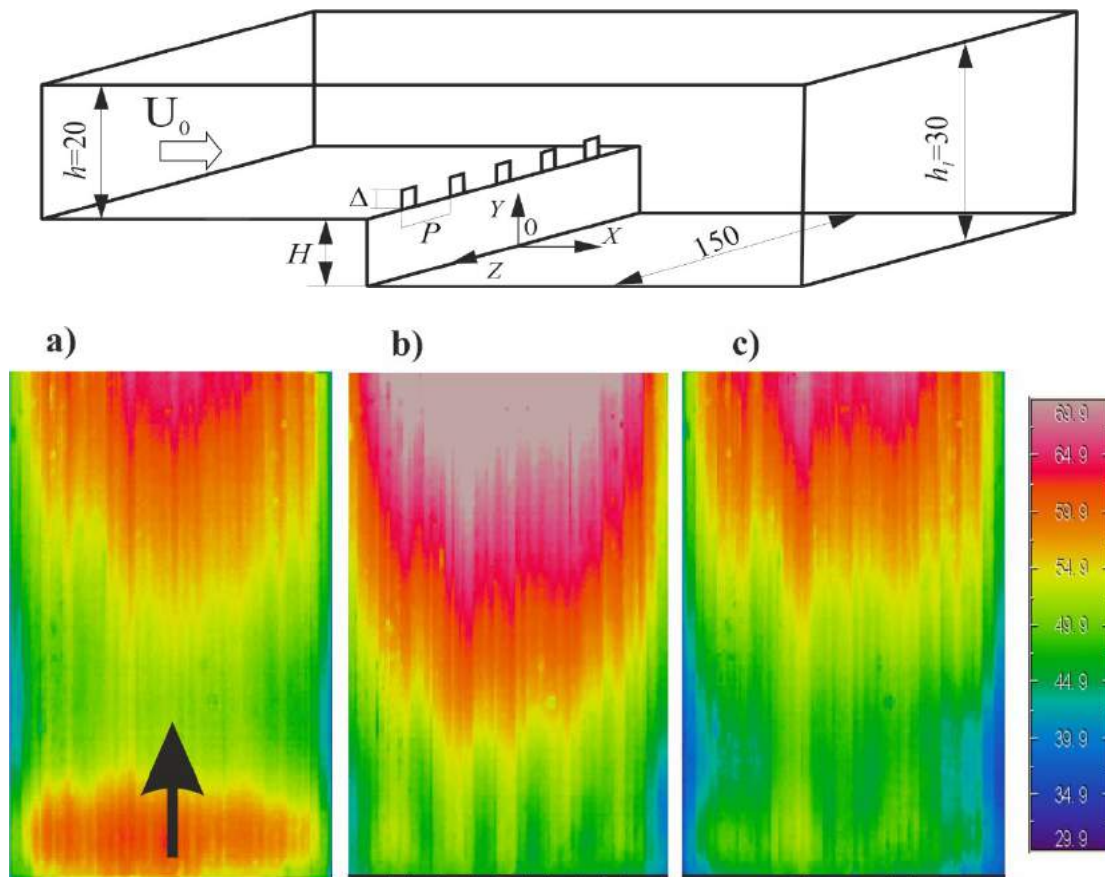


Рис. 1. Схема течения и термограммы за расширением канала: а) гладкий уступ; б) табы прямоугольные высотой 6 мм с шагом $P=25$ мм и в) с шагом $P=50$ мм

Задача о разрушении зоны возвратного течения с помощью различных генераторов продольных вихрей имеет значительное практическое значение, но работы в этой области появились относительно недавно [2-4]. В настоящей работе представлен обзор современного состояния опытного и численного исследований особенностей взаимодействия продольных вихрей с областью возвратного течения. Изучается трехмерная структура течения и поле турбулентности, а также распределение статического давления на поверхности и коэффициента конвективного теплообмена. В качестве вихрегенераторов использовались табы (зубцы) различных размеров и формы (прямоугольные, треугольные, П-образные и т.д.). В ряде экспериментов использовались двумерные преграды в виде сплошных или проницаемых ребер. Они могли располагаться на различных расстояниях от точки отрыва; изменялся также шаг установки табов в поперечном направлении.

Схема задачи демонстрируется на рис. 1. Здесь же показано сравнение температурных полей при наличии табов и их отсутствии. Видно, что для гладкого уступа (a) у его основания формируется зона повышенной температуры (ухудшенного теплообмена). При установке табов эта зона исчезает и теплоотдача, как это показывают опытные исследования, может интенсифицироваться в несколько раз.

В работе рассмотрен широкий круг проблем, связанных с интерференцией вихревых потоков различных масштабов, источниками которых является глобальный отрыв потока и двух- или трехмерные мини-преграды.

Библиографический список

1. В.И. Терехов, Т.В. Богатко, А.Ю. Дьяченко, Я.И. Смутьский, Н.И. Ярыгина. Теплообмен в дозвуковых отрывных потоках / Монографии НГТУ, 2018, Новосибирск, 247 с.
2. H. Park, W.-P. Jeon, H. Choi, J.Y. Yoo, Mixing enhancement behind a backward-facing step using tabs, Phys. Fluids 19 (10) (2007) 105103
3. А.Ю. Дьяченко, В.Л. Жданов, Я.И. Смутьский, В.И. Терехов Экспериментальное исследование теплообмена в отрывной области за обратным уступом при наличии табов// Теплофизика и аэромеханика, 2019, том 26, № 4, 549-560.
4. V.I. Terekhov, A.Yu. Dyachenko, Ya.J. Smulsky, B.Sunden Intensification of Heat Transfer Behind the Backward-Facing Step Using Tabs// Thermal Sci. Engin. Progress, 2022, Vol. 35, 101475

Работа выполнена при поддержке МО РФ (соглашение № 075-15-2021-575).

Куйбин П.А., Шторк С.И.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. Лаврентьева, 1

ПРОБЛЕМЫ РАСШИРЕНИЯ ДИАПАЗОНА ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ГИДРОТУРБИН

Гидроэлектростанции являются не только высокоэффективным источником электроэнергии, но и высокоманевренным элементом регулирования электрических сетей. В отличие от тепловых и, тем более, атомных станций, регулирование мощности на гидроагрегатах происходит в считанные минуты. Вместе с этим, необходимо отметить, что при регулировании гидротурбины вынуждены работать в неоптимальных режимах, для которых характерно снижение КПД и, что более критично, возникают нестационарные явления, выражающиеся в сильных пульсациях давления, вибрациях и т.п.

При эксплуатации турбин Френсиса выделяют четыре диапазона режимов их работы (см., например, [1]). I зона лежит в пределах малых открытий направляющего аппарата, здесь турбина работает спокойно, небольшая мощность агрегата и низкий КПД. II зона характеризуется увеличением уровня вибраций и пульсаций потока, усилением кавитационного шума. не рекомендована для использования. III зона имеет достаточный диапазон, отличается высоким КПД, резким улучшением состояния агрегата, где почти исчезает кавитационный шум, сокращается величина вибраций и пульсаций давления. IV зона характеризуется наибольшими значениями вибраций и пульсаций давления. Работа турбины в этой зоне запрещена. В данной работе рассматриваются вопросы расширения зоны III – зоны устойчивой работы турбины за счет сужения зоны II.

В неоптимальных режимах в следе за турбиной возникает закрученное течение, образуется мощный вихревой жгут. Наиболее сильные пульсации давления, особенно в радиально-осевых машинах, обусловлены именно прецессирующим винтовым вихрем. Вопросам описания систем с прецессирующими вихрями, известным и перспективным способам управления ими и посвящен, главным образом, представляемый доклад.

В качестве модели вихревого жгута в отсасывающей трубе гидротурбины рассматривается бесконечный винтовой вихрь в цилиндрической трубе. Наиболее полная теория винтовых вихрей была предложена в работах [2, 3], где были выведены аналитические формулы для поля скорости, индуцированного винтовой вихревой нитью в цилиндре, и для частоты прецессии винтового вихря. Позже была найдена и формула, описывающая амплитуду пульсаций давления на стенке цилиндра [4].

В экспериментах по изучению прецессирующих вихрей было обнаружено, что при некоторых параметрах вихрь становится неустойчивым, соседние витки спирали сближаются и происходит перезамыкание с отрывом вихревого кольца. Замечено, что при прохождении кольца вблизи стенки возникает всплеск давления. На основе этих экспериментов предложен сценарий возникновения апериодических ударов в гидротурбинах.

Среди наиболее распространенных методов уменьшения негативного воздействия нестационарных явлений на турбину являются впуск воздуха или воды под рабочее колесо, установка крестовин, ребер, изменение геометрии обтекателя [5] и др. К сожалению, они приводят к снижению КПД турбины в диапазоне оптимальных мощностей. В литературе упоминаются варианты управления вихревым жгутом с помощью пульсирующей струи на частоте прецессии вихря, или установкой аэрационного кольца в конусе отсасывающей трубы.

В докладе идет речь и о перспективных методах управления, в первую очередь – активного, с применением механизмов обратной связи. Рассмотрены методы управления обтеканием лопаток и лопастей, применяемые в судоходстве. Предложены способы управления кавитацией.

Библиографический список

1. Брызгалов В.И. Из опыта создания и освоения Красноярской и Саяно-Шушенской гидроэлектростанций. Производственное издание. Красноярск: Сибирский ИД «Суриков», 1999. 562 с.
2. Alekseenko S.V., Kuibin P.A. Shtork S.I. Helical Vortices in Swirl Flow \ J. Fluid Mech, 1999, Vol. 382. P. 195-243.
3. Алексеенко С.В., Куйбин П.А., Окулов В.Л. Введение в теорию концентрированных вихрей. Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2003. 504 с.
4. Kuibin P.A., Okulov V.L., Pylev I.M. Simulation of flow structure in the suction pipe of a hydroturbine by integral characteristics \ Heat Trans. Res. 2006. V. 37(8). P. 675-684.
5. Sentyabov A.V., Minakov A.V., Platonov D.V., Dekterev D.A., Zakharov A.V., Semenov G.A. Numerical investigation of the influence of special structures on suppression of pressure pulsations in the draft tube of a high-head hydraulic turbine \ J. Engineering Physics and Thermophysics. 2019. 92(6). P. 1489-1500.

Тупонос Ф.В., Артемов В.И., Яньков Г.Г., Дедов А.В.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

ПРИМЕНЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ СМЕСИТЕЛЕЙ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Проблеме разработки современных смесителей посвящено значительное число публикаций. Статические смесители активно используются в промышленности для гомогенизации потока, интенсификации химических реакций, диспергирования и эмульгирования, а также для выравнивания температурных неоднородностей на относительно небольших длинах труб. Первый патент, посвященный улучшению смешения газов, был зарегистрирован в 1874 г. в Англии, ряд значимых исследований был выполнен в 40-е и 60-е годы прошлого столетия.

Начиная с 70-х г. работы по данной тематике существенно интенсифицировались. В обзоре 2003 г. [1] отмечено, что авторы обнаружили более 2000 патентов и более 8000 статей, описывающих процессы смешения в статических смесителях, при этом на рынке было доступно более 30 различных коммерческих изделий.

Многообразие предлагаемых решений связано с различием режимных параметров и требований, предъявляемых к результату перемешивания в технологических процессах. В энергетике одним из примеров смешения потоков является топливный тракт ПГУ-ТЭС мощностью 495 МВт ПАО «Нижекамскнефтехим», в который планируется подача «отдувок» нефтехимических производств (метановодородной фракции), которые ранее частично сжигались на факельных установках, с добавлением природного газа. Смешение составляющих топлива происходит в стационарном смесителе, установленном после тройникового соединения, при этом необходимо обеспечить равномерное распределение компонентов топлива по сечению трубопровода перед подачей в горелки. Особенностью смешения являются высокие числа Рейнольдса в трубах Т-образного соединения для подачи составляющих топливной смеси ($Re \sim (4-6)10^6$).

Для выравнивания возникающих неоднородностей температуры и концентраций компонентов смеси, возникающих после узла смешения, используют дополнительные устройства. Наиболее часто применяют различные вставки в трубопроводы, т.н. статические смесители. Задачами оптимизации смесителя в ряде случаев являются не только выравнивание неоднородностей потока, но и минимизация потерь давления на самом смесителе. Статические смесители особенно актуальны в тех случаях, когда нужно достичь хорошего перемешивания многокомпонентных сред в различных устройствах с ограниченными габаритами, например, при коротких длинах топливной магистрали. При этом, разумеется, растут потери давления и возникают проблемы, связанные с загрязнением системы каналов, формирующих статические смесители.

Для определения характеристик смесителя, анализа структуры течения и оптимизации конструкции во многих работах используется компьютерное моделирование с применением популярных коммерческих пакетов и стандартных моделей турбулентности. Анализ публикаций показывает, что большинство расчетных работ нацелено на анализ статических смесителей для относительно небольших чисел Рейнольдса, при этом влияние выбора модели турбулентности, ее параметров и качества расчетной сетки на результаты расчетов не обсуждается. Как правило, авторы ограничиваются указанием расчетного CFD кода и названием модели турбулентности, выбранной для проведения расчетов.

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования процессов дополнительного смешения неоднородного по составу и температуре в сечении трубопровода топливного газа, содержащего метан, водород и азот, с помощью статических смесителей различных конструкций. Турбулентные течения смеси моделировались в стационарной постановке с использованием уравнений сохранения массы, импульса и энергии, осредненных по Рейнольдсу. Для определения турбулентной вязкости использовались двухпараметрические модели с пристеночными функциями. Проанализированы эффективности процесса

смешения различных модификаций стационарных смесителей. Получены поля компонентов скорости, температуры и массовых долей компонентов смеси на выходах из статических смесителей и определены потери давления в конструкциях. Предложена оптимальная конструкция смесителя из 4-х элементов в виде закрученной на 180° пластины с длиной каждого элемента (полупериодом закрутки), равной двум диаметрам трубы. Соседние элементы закручены в противоположных направлениях и примыкают друг к другу под углом 90° . Показано, что во фрагменте топливного трубопровода, состоящего из статического смесителя и прямолинейного участка трубы длиной не более пяти диаметров, удастся достичь требуемой однородности состава и температуры топливной смеси в выходном сечении указанного фрагмента.

Библиографический список

1. Thakur R. K. и др. Static mixers in the process industries - a review // Chem. Eng. Res. Des. 2003. Т. 81. № 7. С. 787–826.

Субботин С.В., Шмакова Н.Д., Козлов В.Г., Ерманюк Е.В.

Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет,
Пермь, 111250, ул. Сибирская, 24

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. ак. Лаврентьева, 15

ЗОНАЛЬНЫЕ ТЕЧЕНИЯ И ВОЛНЫ РОССБИ В АТТРАКТОРАХ ИНЕРЦИОННЫХ ВОЛН

Линейная динамика аттракторов инерционных волн достаточно хорошо изучена для случая сферического слоя вращающейся жидкости [1]. Некоторые особенности нелинейной динамики аттракторов инерционных волн рассмотрены в двумерной постановке для тора бесконечного радиуса с сечением в виде наклонного квадрата [2]. Вопрос о формировании зональных течений в аттракторах инерционных волн ранее рассматривался лишь на качественном уровне [3], причем возможность формирования нетривиальных когерентных азимутальных структур не рассматривалась. Важно отметить, что для описания турбулентности во вращающейся жидкости критически важно именно формирование и отщепление медленных квазигеострофических крупномасштабных мод движения [4]. Численное моделирование таких процессов в областях с тройной периодичностью демонстрирует важность учета экмановских эффектов [5].

В настоящем докладе представлены результаты цикла экспериментальных и численных исследований задачи о нелинейной динамике волновых аттракторов в геометрической постановке, допускающей формирование аттракторов в «меридиональных» сечениях вращающегося объема жидкости и нетривиальных азимутальных структур и зональных течений в «широтных» сечениях, причем

были рассмотрены случаи цилиндрического [6, 8] и сферического [7] слоев вращающейся жидкости при различных видах возмущающего воздействия. Характерной особенностью рассматриваемой задачи является существенная зависимость линейной и нелинейной динамики системы от геометрии области и картины волновых лучей. Наличие ориентированного вдоль оси вращения виртуального цилиндра, касательного к внутреннему твердому ядру в случае сферического слоя [7] либо кольцевой зоны отражения волновых лучей от конического дна в случае цилиндрического слоя [6,8] определяет области формирования азимутальных структур и существенных зональных течений. В докладе обсуждаются: структура зональных течений, наблюдаемые виды неустойчивости (триадный резонанс [6-8], неустойчивость слоя Стюартсона [7]), формирование и экспериментальная идентификация волн Россби [8]. Интересно отметить, что экспериментально зарегистрированные картины волновых полей в режиме триадного резонанса [7] имеют большое сходство с результатами наблюдений крупномасштабных инерционных волн в конвективной оболочке Солнца [9].

Библиографический список

1. M. Rieutord, L. Valdettaro Viscous dissipation by tidally forced inertial modes in a rotating spherical shell \ J. Fluid Mech., 643. 2010. 363-394.
2. G.I. Ogilvie Wave attractors and the asymptotic dissipation rate of tidal disturbances \ Journal of Fluid Mechanics, 2005, 543, С. 19-44.
3. L.R.M. Maas Wave focusing and ensuing mean flow due to symmetry breaking in rotating fluids \ Journal of Fluid Mechanics, 2001, 437, С. 13-28.
4. J.F. Scott Wave turbulence in a rotating channel \ Journal of Fluid Mechanics, 2014, 741, С. 316 – 349.
5. T. Le Reun, B. Favier, A.J. Barker, M. Le Bars Inertial wave turbulence driven by elliptical instability \ Physical Review Letters, 2017, 119 (3), 034502
6. S. Boury, I. Sibgatullin, E. Ermanyuk, N. Shmakova, P. Odier, S. Joubaud, L.R.M. Maas, T. Dauxois Vortex cluster arising from an axisymmetric inertial wave attractor \ Journal of Fluid Mechanics, 2021, 926, A12.
7. S. Subbotin, N. Shmakova, E. Ermanyuk, V. Kozlov Stewartson layer instability and triadic resonances in rotating sphere with oscillating inner core \ Physics of Fluids, 2022, 34, 064103
8. S. Subbotin, N. Shmakova, V. Kozlov, E. Ermanyuk Nonlinear regimes of inertial wave attractors generated by a precessing lid: zonal flows and Rossby waves // Physics of Fluids, 2023, 35, 074110.
9. L. Gizon, R.H. Cameron, Y. Bekki et al. Solar inertial modes: Observations, identification, and diagnostic promise // Astronomy and Astrophysics, 2021, 652, 2021.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ №18-71-10053 в части анализа зональных течений и волн Россби (ПГПУ) и гранта РФФ № 23-41-00090 в части анализа волновой турбулентности и триадного резонанса (ИГиЛ СО РАН)

Веретенников С.В.

ФГБОУ ВО Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева,
Рыбинск, 152934, Пушкина, 53

ЭНЕРГОРАЗДЕЛЕНИЕ В ВИХРЕВЫХ ТРУБАХ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Энергоразделение в закрученном потоке (смерч, торнадо, вихрь) известно человечеству с давних времен, оно поэтически описано в легендах кочевников и практически применено в колодцах Чингисхана. В 1931 г. французский инженер-металлург Ж.Ранк заметил ощутимую разность температуры в поперечном сечении потока, истекающего из вентилятора, и предложил на этом принципе газодинамический охладитель, получивший впоследствии название вихревой трубы или трубы Ранка, на которую он получил первый в мире патент. Им же предложена первая теоретическая модель явления. Дальнейшие опыты проводились немецким ученым Рудольфом Хилшем и были опубликованы после окончания Второй мировой войны. Благодаря его теоретическим изысканиям введен один из оценочных коэффициентов учета качества процесса энергоразделения – температурная эффективность.

Основы современного теоретического описания вихревого эффекта были заложены в послевоенные годы в Советском союзе. Пионерами вихревого эффекта в СССР можно считать известных ученых профессоров В.С. Мартыновского, В.П. Алексеева (Одесский технологический институт холодильной промышленности), В.М. Бродянского (Московский энергетический институт), А.П. Меркулова (Куйбышевский авиационный институт). Несмотря на обширные исследования вихревого эффекта как в России, так и за рубежом, до сих пор нет адекватной физико-математической модели, объясняющей все процессы, протекающие в вихревых трубах. В работе [1] предложена следующая классификация известных моделей, поясняющих эффекты энергоразделения: центробежные гипотезы; гипотезы, использующие «демона» Максвелла; теория радиальных потоков Хилша-Фултона; гипотеза взаимодействия вихрей.

Отмеченные гипотезы имеют положительные моменты в оценке возможного перераспределения энергии, но при этом недостаточно полно соответствуют изложенным оценкам по достоверности и качеству. Анализ публикаций с попытками изложения новых теорий приводит к выводу об ощутимом росте «новых» пояснений сущности эффекта с его построением на уже опубликованных ранее подходах.

Основа энергоразделения, заложенная в гипотезе взаимодействия вихрей, строится на цикловом характере переноса энергии в форме тепла. При этом на реализацию процесса затрачивается кинетическая энергия турбулентности, генерируемая при течении периферийного квазипотенциального и приосевого вынужденного прецессирующих вихрей.

Большое количество публикаций последнего десятилетия с использованием численного моделирования зарубежных и отечественных исследователей

вихревого эффекта позволило существенно продвинуться в анализе процессов, протекающих в вихревой трубе и подтвердило наличие в камере энергоразделения закрученного прецессирующего потока с присутствием вторичных сложных вихревых структур, взаимодействующих между собой и противоположно перемещающихся в осевом направлении существенно турбулизованных потоков [1, 2]. Исследования показывают, что вихревой эффект напрямую зависит от структуры закрученного потока. Экспериментально подтверждается формирование в камере энергоразделения спиралевидного периферийного вихря, который интенсивно взаимодействует с приосевым течением. Генерация спиралевидной структуры происходит на всех режимах работы вихревой трубы. Наличие крупномасштабных вихревых структур и протяженность основной зоны определяют качество процесса энергоразделения. Так как именно в области основного участка происходит интенсивный обмен энергией между приосевым и периферийным вихрем, осуществляются так называемые микроохладительные циклы.

Библиографический список

1. Бирюк, В.В. Веретенников С.В., Гурьянов А.И., Пиралишвили Ш.А. Вихревой эффект. Технические приложения. Том 2 (Часть 1). – М.: ООО «Научтехлитиздат», 2014. –288 с.
2. Veretennikov, S.V. and Piralishvili, Sh.A. and Evdokimov, O.A. and Guryanov, A.I. Heat transfer simulation of unsteady swirling flow in a vortex tube Journal of Physics: Conference Series, 2018, 980 (1), 012007.

Работа выполнена в рамках государственного задания на выполнение фундаментальных научных исследований (шифр научной темы FSSG-2023-0002)

Маркович Д.М., Дулин В.М.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. Лаврентьева, 1

О ВЛИЯНИИ ВИНТОВЫХ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР НА ТУРБУЛЕНТНЫЙ ПЕРЕНОС, СМЕСЕОБРАЗОВАНИЕ И ГОРЕНИЕ В ЗАКРУЧЕННЫХ СТРУЯХ

В данном докладе будут представлены результаты серии экспериментальных исследований структуры потока и особенностей турбулентного переноса в закрученных струях, в том числе - с распадом вихревого ядра и горением. В то время как явление распада вихревого ядра часто используется на практике для стабилизации пламени в камерах сгорания газотурбинных двигателей, его роль в механизме возникновения термоакустических пульсаций и переходе к вибрационным режимам горения остается предметом научных дебатов. В частности,

исследователи расходятся во мнении о влиянии крупномасштабных вихрей, включая спиралевидное вихревое ядро, на устойчивость горения. Развитие современных оптоэлектронных технологий позволяет детально исследовать структуру поля мгновенной скорости сложных турбулентных течений с использованием метода анемометрии по изображениям частиц, а также проанализировать особенности локального тепломассопереноса и химического реагирования на основе данных плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции. В данной работе показано, что распад вихревого ядра в закрученной струе сопровождается формированием вращающейся когерентной структуры, состоящей из винтовых вихрей, вносящих определяющий вклад в интенсивность локального турбулентного тепломассопереноса на начальном участке струи. Также показана различная роль данных вихрей в процессе стабилизации пламени при горении смесей с избытком воздуха и с избытком топлива.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-79-30075



СЕКЦИОННЫЕ ДОКЛАДЫ

СЕКЦИЯ 1. ЗАКРУЧЕННЫЕ И ВИХРЕВЫЕ ТЕЧЕНИЯ В ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ И В ПРИРОДЕ

Комендантов А.С., Кузма-Кичта Ю.А., Круг А.Ф., Киселев А.С.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

ОБОБЩЕНИЕ ДАННЫХ ПО КРИТИЧЕСКИМ ТЕПЛОВЫМ НАГРУЗКАМ В ПРЯМОЛИНЕЙНОМ И ЗАКРУЧЕННОМ ПОТОКАХ ПРИ КИПЕНИИ НЕДОГРЕТОЙ ВОДЫ

Исследование КТП при кипении воды в трубе с закрученной лентой имеет богатую историю. Отражена она в восьми международных конференциях, посвященных теплообмену и гидродинамике в закрученных потоках. В 2023 г. девятая конференция проводится в НГТУ им. Р.Е. Алексеева (Нижний Новгород).

В работе [1] массив данных по критическим тепловым (КТП) при закрутке потока лентой охватывает практически все имеющиеся исследования и обобщен с помощью уравнения, построенного с использованием безразмерных критериев.

В настоящей работе с использованием этого уравнения проведен расчет для мини- и микроканалов с прямолинейным течением. Отклонение расчетных данных от экспериментальных не превышает $\pm 30\%$. Обработано 90 точек. С помощью уравнения [1] создана **скелетная** таблица для круглой трубы диаметров 8 мм по расчету КТП для закрученных потоков, подобных созданным для прямолинейных потоков [2]. Для диапазона давлений 1 – 20 МПа и массовых скоростей 500 – 5000 кг/м²с. Фрагмент полученной таблицы представлен далее для коэффициента закрутки $y=2$, второе значение в таблице соответствует критическому тепловому потоку без закрутки. Более 60% точек попадает в диапазон $\pm 30\%$. Всего 320 точек.

Таблица 1

Массовая скорость, кг/м ² с	Расходное массовое паросодержание x			
	-0.2	-0.15	-0.1	-0.05
$p=1$ МПа				
500	5.87/2.45	5.82/2.43	5.77/2.41	5.72/2.38
5000	19.82/12.54	17.59/11.13	15.46/9.78	13.39/8.47
$p=20$ МПа				
500	4.53/1.9	4.52/1.87	4.51/1.82	4.5/1.8
5000	8.67/5.48	8.41/5.32	8.14/5.15	7.89/4.98

Библиографический список

1. А.С. Комендантов, А.Ф. Круг, Ю.А. Кузма-Кичта, Н.А. Стенина Обобщение данных по критической тепловой нагрузке при кипении недогретой воды в трубе с закрученной лентой. // ТПТ. 2020. Т. 12. №1. С. 9–17.

2. В.П. Бобков, В.Н. Виноградов, Д. Греневельд Скелетная таблица версии 1995 г. Для расчета критического теплового потока в трубах // Теплоэнергетика. 1977

Наумов И.В., Квон А.З., Скрипкин С.Г., Шарифуллин Б.Р., Штерн В.Н.
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. ак. Лаврентьева, 1.

ВЛИЯНИЕ ВРАЩЕНИЯ НА ИЗМЕНЕНИЕ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ ЛИНИИ РАЗДЕЛА ДВУХ НЕСМЕШИВАЮЩИХСЯ ЖИДКОСТЕЙ

Вихревое движение это одно из основных состояний движущейся среды, а вихревое перемешивание - распространённый метод интенсификации массообменных процессов в химических и биореакторах. В ходе поисков формы потока, оптимальной для роста культуры в вихревых биореакторах, обнаружена любопытная и впечатляющая структура, имитирующая сильные вихри, наблюдаемые в атмосфере и океане, которая может быть названа «вихревое домино» [1]. Дальнейшие экспериментальные исследования выявили эффект проскальзывания на границе раздела устойчивого осесимметричного вихревого потока двух несмешивающихся жидкостей. По мере увеличения завихрения проскальзывание изменяет сценарий топологии потока по сравнению с тем, который предсказан численно с использованием условия непрерывности скорости [2, 3].

Полезной моделью двухжидкостного биореактора служит вертикальный цилиндрический контейнер, заполненный двумя несмешивающимися жидкостями, движение которых вызывается вращением одного из торцевых дисков (крышки). Детальное исследование вихревого движения вблизи границы раздела двух жидкостей проводилось в цилиндрическом контейнере, выполненном из прозрачного оргстекла. Контейнер имел радиус $R=72$ мм и высоту $h=2,0R$. Он заполнялся двумя несмешивающимися жидкостями: (а) 80% водным раствором глицерина (тяжелая жидкость, плотность $\rho_g = 1270$ кг/м³ и кинематическая вязкость $\nu_g = 45$ мм²/с) и (б) подсолнечным маслом (легкая жидкость с $\rho_o = 920$ кг/м³ и $\nu_o = 54$ мм²/с). Существенная разница в плотностях жидкостей обеспечивала устойчивую границу раздела. Вихревое движение жидкостей генерировалось нижним диском ($R_d = 71$ мм), который вращался с угловой скоростью Ω_d , в то время как другие стенки контейнера были неподвижны. Вращение диска создавалось шаговым двигателем, а интенсивность течения характеризовалась числом Рейнольдса $Re = \Omega_d R^2 / \nu_o$.

Вращающийся нижний диск обеспечивает устойчивое осесимметричное движение обеих жидких сред. Нижняя жидкость совершает центробежную циркуляцию (СС): она движется от оси к периферии около дна и возвращающихся к оси около границы раздела. При медленном вращении ($Re = 100$), при котором

преобладают силы вязкого трения, верхняя жидкость совершает антицентробежную циркуляцию (АС). По мере того, как вращение усиливается ($Re = 175$), поток верхней жидкости трансформируется в СС вблизи границы раздела двух сред. При увеличении завихрения ($Re = 500$) СС в верхней жидкости распространяется во всем объеме.

В предыдущих исследованиях [1-4] пространственное разрешение (1 мм) было недостаточным для определения скорости вблизи границы раздела. В данной работе используется усовершенствованный метод измерения (камера светового поля), который имеет значительно лучшее разрешение (0,14 мм) [5]. Показано, что азимутальная скорость является непрерывной, в то время как радиальная скорость на границе раздела отрицательна для малого Re и становится нулевой для большого Re . Во время этих метаморфоз топология нижнего потока жидкости остается инвариантной, граница раздела не имеет видимой деформации, а поток устойчивый и осесимметричный.

Выполненное экспериментальное исследование позволило выявить важное явление нелинейной физики, представляющее фундаментальный и практический интерес - изменение условий на границе раздела двух закручивающихся несмешивающихся жидкостей, заполняющих цилиндрический контейнер.

Библиографический список

1. I. V. Naumov, B. R. Sharifullin, M. A. Tsoy, V. N. Shtern. Dual vortex breakdown in a two-fluid confined flow \ Phys. Fluids, 2020. 32, 061706.
2. I. V. Naumov, M. A. Herrada, B. R. Sharifullin, V. N. Shtern. Slip at the interface of a two-fluid swirling flow \ Phys. Fluids, 2018. 30, 074101.
3. L. Carrión, I.V. Naumov, B.R. Sharifullin, M.A. Herrada, V.N. Shtern, Formation of dual vortex breakdown in a two-fluid confined flow \ Phys. Fluids, 2020. 32, 104107.
4. I.V. Naumov, V.G. Glavny, B.R. Sharifullin, V.N. Shtern. Formation of a thin circulation layer in a two-fluid rotating flow \ Phys. Rev. Fluids, 2019. 4, 054702.
5. I.V. Naumov, S.G. Skripkin, A.Z. Kvon, V.N. Shtern Changing interface conditions in a two-fluid rotating flow \ Phys. Fluids, 2023. 35, 031705.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 19-19-00083

Воронина Е.А., Кузенов В.В., Рыжков С.В.

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
Москва, 105005, ул. 2-я Бауманская, д. 5, к. 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМЕННЫХ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР В УСЛОВИЯХ СИЛЬНОГО ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Проблема изучения закономерностей пространственно-временной эволюции разлетающихся плазменных образований, взаимодействующих с фоновой

средой и внешним магнитным полем, возникает при интерпретации результатов астрофизических экспериментов, натуральных лабораторных экспериментов с лазерной плазмой и плазмой электрических разрядов. Плазменные вихревые структуры могут быть сформированы на внешней поверхности мишени магнитно-инерциального термоядерного синтеза (МИТС) [1-7], при импульсной инжекции в атмосферный воздух плотных плазменных потоков, создаваемых электроразрядным генератором плазмы на основе импульсного капиллярного или поверхностного разряда. Процессы взаимодействия плазменного образования с внешним магнитным полем и с фоновой плазмой приводят к возникновению сложной ударно-волновой картины течения плазмы внутри облака и на его границе, передаче значительной части энергии фоновой среде и (или) магнитному полю, а также приведению в движение окружающей среды. При этом создаются условия для возникновения широкого спектра плазменных неустойчивостей и развития плазменной турбулентности.

Приведена постановка задачи и выполнено численное моделирование плазмагазодинамических процессов в факеле капиллярного разряда, которая является развитием классических работ. В разработанной модели плазмодинамические процессы в капиллярном разряде определяются интенсивностью и длительностью процессов образования плазмы в канале капиллярного разряда, а также термодинамическими параметрами окружающей газовой среды. Сформулировано векторное уравнение, описывающее завихренность $\vec{\Omega}$ в потоке газа, на который воздействует внешнее магнитное поле. Это уравнение $\frac{\partial \vec{\Omega}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \vec{\Omega} = \frac{1}{\rho^2} \nabla \rho \times \left(\nabla P - \frac{1}{c} [\mathbf{j} \times \mathbf{H}] \right) + \nu \Delta \vec{\Omega}$, являющееся обобщением уравнения работы [8], позволяет ввести следующее условие возникновения тороидального вихря при наличии внешнего магнитного поля:

$$t_{\text{вих}} \approx \frac{\Omega_{\text{хар}} \rho_{\text{хар}} \varepsilon^2}{\left| \frac{P_{\text{хар}}}{m} \frac{H_{\text{хар}}^2}{8\pi} \right|} < \min \left(t_{\text{конв}} \approx \frac{L_{\text{хар}}}{V_{\text{хар}}}, t_{\text{дифф}} \approx \frac{r_0^2}{\nu} \right),$$

где ε, r_0 – радиус ядра и большой радиус самоиндуцированного тороидального вихря с циркуляцией Γ [9, 10]. Произведено сопоставление результатов расчетов в одиночном факеле капиллярного разряда с известными и имеющимися экспериментальными данными. Отмечено их удовлетворительное соответствие. Проведены расчёты импульсных струй, вытекающих из расположенных рядом каналов сильноточного капиллярного разряда. Представлены пространственное распределение температуры и давления импульсных струй нескольких каналов капиллярного разряда. Проведены расчёты импульсных струй с учётом дополнительного магнитного поля. Наиболее заметное влияние магнитное давление оказывает на нагретую осевую часть импульсной струи ($T > 20$ кК).

Библиографический список

1. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Calculation of plasma dynamic parameters of the magneto-inertial fusion target with combined exposure // *Physics of Plasmas*. 2019. V. 26. P. 092704.
2. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Estimation of the neutron generation in the combined magneto-inertial fusion scheme // *Physica Scripta*. 2021. V. 96. P. 125613.
3. Кузенов В.В., Рыжков С.В. Численное моделирование взаимодействия мишени магнитно-инерциального термоядерного синтеза с плазменным и лазерным драйверами // *ТВТ*. 2021. Т. 59.
4. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Frolko P.A. Numerical simulation of the coaxial magneto-plasma accelerator and non-axisymmetric radio frequency discharge // *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. V. 830. P. 012049.
5. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Thermophysical Parameter Estimation of a Neutron Source Based on the Action of Broadband Radiation on a Cylindrical Target // *Fusion Science and Technology*. 2022. V. 78.
6. Рыжков С.В., Чирков А.Ю. Системы альтернативной термоядерной энергетики. М.: Физматлит, 2017. 200 с.
7. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Numerical Simulation of Pulsed Jets of a High-Current Pulsed Surface Discharge // *Computational Thermal Sciences*. 2021. V. 13. P. 45-56.
8. Сон Э.Е., Терешонок Д.В. Управление сверхзвуковым потоком газа тепловыми вихрями // *ТВТ*. 2010. Т. 48. С. 3–8.
9. Varaksin A.Yu., Ryzhkov S.V. Vortex Flows with Particles and Droplets (A Review) // *Symmetry*. 2022. V. 14 (10). P. 2016.
10. Varaksin A.Yu., Ryzhkov S.V. Turbulence in Two-Phase Flows with Macro-, Micro- and Nanoparticles (A Review) // *Symmetry*. 2022. V. 14. P. 2433.

Арефьев К.Ю., Абрамов М.А.

МФТИ, Физтех

141701, Московская область, г. Долгопрудный

ТЕПЛОМАССОБМЕН В ЗАКРУЧЕННЫХ ДВУХФАЗНЫХ ТЕЧЕНИЯХ ПРИ ТРАНС- И СВЕРХЗВУКОВЫХ СКОРОСТЯХ ВНУТРИ УДЛИНЕННЫХ КАНАЛОВ

Удлиненные каналы с транс- и сверхзвуковыми скоростями течения двухфазного потока достаточно часто применяются в технологических, стендовых и энергетических установках. Важной научно-технической задачей является формирование в выходном сечении канала двухфазного потока с заданным распределением расходонапряженности конденсированной фазы. При этом вопросы теплообмена для таких течений являются определяющими в части их функционального назначения и температурного состояния конструкции каналов.

Высокий уровень теплового нагружения стенок каналов требует решения задачи их защиты, в том числе посредством применения системы завесного охлаждения. С целью повышения эффективности завесного охлаждения может быть использован закрученный периферийный поток газа с низкой температурой. Закрутка периферийного потока дает возможность увеличить протяженность охлаждаемой зоны, однако может негативно влиять на формирование требуемого распределения конденсированной фазы.

В работе представлены результаты расчетно-экспериментального исследования влияния степени закрутки периферийного потока на характеристики завесного охлаждения и параметры расходонапряженности потока конденсированной фазы в выходном сечении канала. Предложены специализированные безразмерные критерии, характеризующие закрутку потока, и установлены закономерности влияния этих критериев на работоспособность канала.

Получено, что закрутка периферийного потока позволяет снизить до 50 % относительный массовый расход вдумаемого газа. При этом определены режимы, при которых наблюдается незначительное сепарирование частиц без их явно выраженной экстракции. Это обеспечивает допустимое распределение расходонапряженности конденсированной фазы в выходном сечении и надлежащее функционирование канала.

Полученные результаты фундаментальных исследований тепло-массообмена могут быть полезны для формирования конфигурации каналов с закруткой периферийного охладителя.

Работа выполнена при поддержке Гранта Президента Российской Федерации № МД-1814.2022.4

Шваб А.В., Соломаха А.Е.

Национальный исследовательский университет «ТГУ»,
Томск, 634050, пр. Ленина, 36

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОТОКА ГАЗ-ТВЕРДЫЕ ЧАСТИЦЫ В ЦЕНТРОБЕЖНОМ КЛАССИФИКАТОРЕ

Широкое использование порошковых сред заданного фракционного состава используется для получения новых высокопрочных и тугоплавких материалов, износостойких покрытий и других современных изделий, что свидетельствует о возрастающей роли порошковой технологии [1]. Наиболее перспективными аппаратами для получения мелкодисперсных порошков заданного размера являются пневматические центробежные классификаторы [2]. Дальнейшее совершенствование этих пневматических аппаратов связано с математическим моделированием аэродинамики закрученного турбулентного потока в этих аппаратах [3-5].

В настоящей работе исследуется аэродинамика закрученного турбулентного потока в традиционных и предложенных модифицированных геометриях рабочей камеры воздушно-центробежного классификатора и фракционное разделение твёрдых частиц порошкового материала по размерам. Турбулентный режим течения моделировался на основе метода RANS с помощью известной модели « $k-\omega$ ». Решение уравнений переноса импульса для закрученного турбулентного потока в сепарационной зоне классификатора производилось численно в переменных «скорость – давление» путём физического расщепления полей скорости и давления по времени на разностной, разнесённой сетке. Нахождение поправки скорости определялось с помощью определения поправки потенциала из уравнения неразрывности. Решение уравнений переноса для кинетической энергии и удельной скорости ее диссипации проводится также установлением по времени на разнесённой сетке. Конвективные и диффузионные слагаемые в уравнениях переноса расписываются конечными разностями методом контрольного объёма на основе экспоненциальной схемы на разнесённой разностной сетке, которая снимает ограничение с сеточного числа Рейнольдса. Система дифференциальных уравнений после их дискретизации решается неявным методом переменных направлений в «дельта» форме.

Только при малой объемной концентрации можно получать высокую остроту разделения твердой примеси по размерам. Поэтому процесс сепарации проводился на основе известного траекторного метода [6], с вероятностным учетом влияния пульсаций газа на диффузию твердых частиц [7], а также на основе предложенного приближенного стохастического подхода, позволяющего получать согласованные результаты с траекторным методом. Достоверность результатов динамики закрученного течения газа подтверждается опытными данными, а результаты приближенного стохастического подхода совпадают с данными расчетов траекторного метода [6] при построении кривой Трампа, которая определяет вероятность попадания частиц исходного продукта разделения в мелкий продукт.

Библиографический список

1. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия. 2004. 750 с.
2. Росляк А. Т., Зятиков П.Н. Воздушно-центробежная классификация. Томск: ТМЛ, Пресс, 2010. 224 с.
3. Кутателадзе С.С., Волчков Э.П., Терехов В.И. Аэродинамика и тепло-массообмен в ограниченных вихревых потоках, Новосибирск, ИТФ, 1987, 272 с.
4. Мизонов В.Е., Ушаков С.Г. Аэродинамическая классификация порошков. М.: Химия, 1989. 160с.
5. Shvab A.V., Turubaev R.R. Simulation of swirling turbulent flow aerodynamics in a centrifugal machine. Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2019. Т. 53. № 2. С. 242-250.
6. Волков К.Н., Емельянов В.Н. Течение газа с частицами. М.: ФИЗМАТ-ЛИТ. 2008. 600 с. ISBN 978-5-9221-1000-6.

7. Мостафа А. А. Монджиа Х. Ц., Макдоннелл В. Г., Самуэлсен Г. С. Распространение запыленных струйных течений. Теоретическое и экспериментальное исследование *Аэрокосмическая техника*. 1990. №3. С. 65-81.

Акашев А.А., Решетников А.В., Скоков В.Н., Бусов К.А.

Институт теплофизики УрО РАН,
Екатеринбург, 620016, Амундсена, 107а

ВЛИЯНИЕ ЗАКРУТКИ НА РАСПЫЛЕНИЕ СТРУЙ ПЕРЕГРЕТОГО ЭТАНОЛА

Изучение струй вскипающих жидкостей является актуальной научной задачей в связи с их широким применением во многих технических устройствах и технологических процессах, в частности, при мелкодисперсном распылении топлива [1]. Эффективными способами распыления являются предварительная закрутка потока жидкости и обеспечение интенсивного парообразования диспергируемой жидкости. В нашей работе мы изучаем совместное влияние обоих этих способов на примере этилового спирта. Известно, что при предельных перегревах этанол обладает достаточным количеством запасенного тепла для полного испарения истекающей жидкости в условиях взрывного вскипания [2].

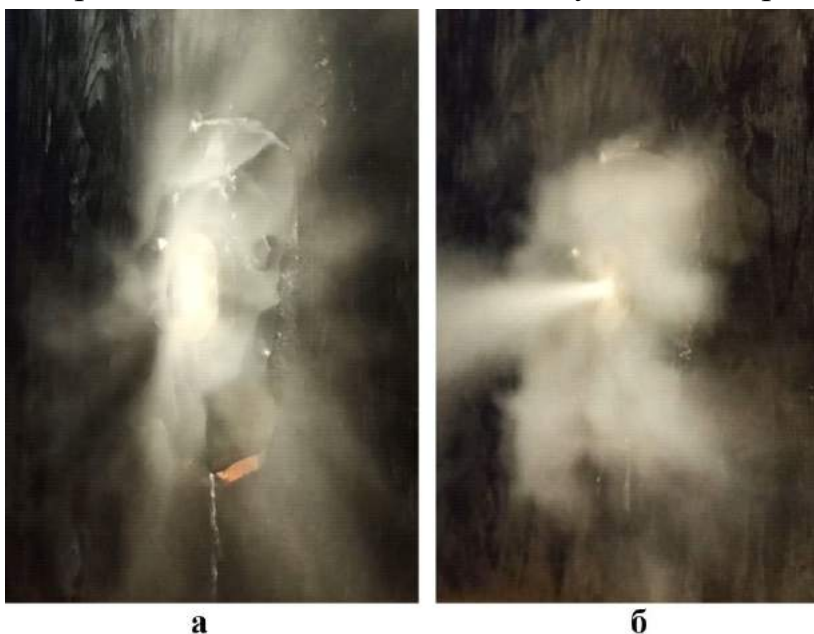


Рис. 1. Полный развал струи без закрутки (а), с закруткой 3000 об/мин (б)

Проведены опыты по истечению вскипающего этанола из камеры высокого давления в атмосферу в интервале температур 120 – 240⁰С, что при температурах до 180⁰С соответствовало вскипанию на одиночных невзаимодействующих центрах, а при температурах выше 190⁰С - интенсивному взрывному вскипанию за выходным срезом канала. В опытах использовался короткий цилиндрический канал диаметром $d=0.5$ мм и длиной $l=0.7$ мм. Прижимной фланец, осуществляющий фиксацию канала к камере, играл роль прилегающей стенки, перпендикулярной к оси струи.

В условиях предельных перегревов и взрывного вскипания в струе этанола наблюдался полный развал струи - распространение струи в радиальном направлении вдоль прилегающей плоскости. Полный развал струи происходит в соответствии с эффектом Коанда (рис. 1, а) [3]. При помощи

электродвигателя с регулируемой частотой оборотов (от 0 до 3000 об/мин) осуществлялась предварительная закрутка струи этанола. Обнаружено влияние закрутки на процесс распыления перегретых струй, а именно, разрушение устойчивой формы струи при оборотах электродвигателя более 900 об/мин. Раз-

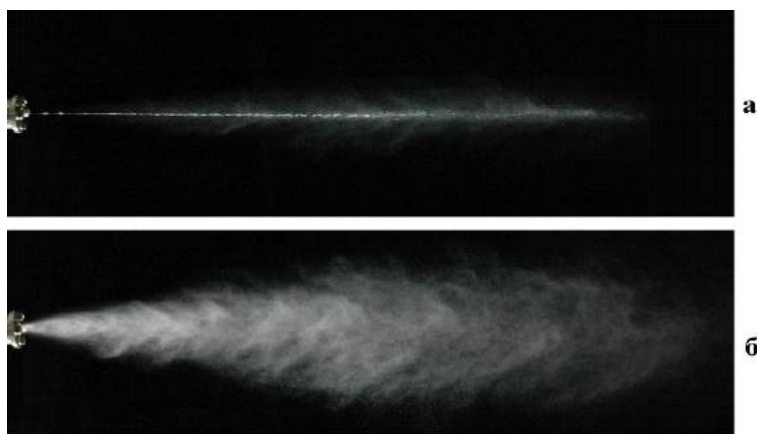


Рис. 2. Истечение струи при $T=150$ °С без закрутки (а), с закруткой 3000 об/мин (б)

рушение полного развала показано на рис. 1, б. Прослежено влияние меняющейся скорости закрутки на температуру перехода к полному развалу струи. Малые скорости закрутки способствуют понижению температуры полного развала. При высоких скоростях вращения струи происходит существенное влияние на форму струи. При оборотах до 3000 об/мин изменяется только форма струи, а размер капель при распыле-

нии значительно не изменяется в условиях взрывного вскипания. Истечение струй при температурах ниже 180 °С сопровождается характерной формой струи – центральное жидкое ядро, окруженное паром (см. рис. 2, а). При наличии закрутки центральное ядро струи разрушается, и струя представляет собой паровой конус, как на рис. 2, б. Разрушение центрального ядра приводит к уменьшению размера капель, а значит к улучшению распыления.

Установлено сильное влияние на разрушение струй вскипающего этанола при малых и высоких перегревах под действием предварительной закрутки более 900 об/мин. При температурах до 180 °С закрутка влияет как на форму струи, так и на дисперсность распыления. При температурах от 190 до 220 °С при закрутке изменяется только форма истекающей струи.

Библиографический список

1. А. Гупта, Д. Лилли, Н. Сайред. Закрученные потоки. Пер. с англ. М.: Мир, 1987. 588с.
2. В.П. Скрипов. Метастабильная жидкость. М.: Наука, 1972. 312 с.
3. Reba I. Applications of the Coanda effect \ Sci.Amer. 1966. V.214. N. 6. P. 84-92.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00426, <https://rscf.ru/project/22-29-00426/>

Базюк С.С., Нужин В.Н., Солдаткин Д.М.

Научно-исследовательский институт Научно-производственное объединение
«ЛУЧ»,
Подольск, 142103, Железнодорожная, 22

ИЗУЧЕНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРОК ВИТЫХ ТВЭЛОВ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РЕАКТОРОВ

Для создания максимальных нейтронно-физических потоков при относительно низкой температуре нормальной эксплуатации применение цилиндрических ТВЭлов в исследовательских реакторах (ИР) нецелесообразно. Конструкция тепловыделяющих сборок с витыми сложнопрофильными ТВЭлами решает данную задачу. Использование завивки обеспечивает дистанционирование ТВЭлов в пучке ТВС и повышает интенсивность теплоотдачи к теплоносителю. Данный эффект успешно реализован в российских и зарубежных ИР - СМ-3, ПИК, ИВГ.1М (Казахстан) [1-4], в разрабатываемых конструкциях ТВЭлов для реакторов PWR - U-Zr топливо Lightbridge (США) [5] и SMR - SMART (Южная Корея) [6]. В настоящее время возрастает интерес к витым сложнопрофильным ТВЭлам для реакторов атомных станций малой мощности (иностр. SMR – Small Modular Reactors). Разработка ТВС с витыми ТВЭлами представляет важную и актуальную научно-техническую задачу.

Разработка конструкций ТВС ИР и РУ АСММ включает обоснование их работоспособности при нормальных условиях эксплуатации и аварийных ситуациях и требует определения проектных теплогидравлических характеристик. Расчетное моделирование распределения потока в пучке ТВЭлов, потерь давлений на трение и локальные сужения/расширения потока содержит помимо влияния режимов течения (числа Re , Fr , De , Sh) и теплообмена (числа Nu , Pr) большое число дополнительных неопределенностей, таких как шероховатость поверхности, число и протяженность контактов между соприкасающимися ТВЭлами, наличие допусков на геометрические параметры при изготовлении. Экспериментальные исследования гидравлических характеристик ТВС с витыми натурными ТВЭлами лишены данных недостатков и являются более представительными.

В докладе представлены результаты исследования гидравлических характеристик ТВС с двухлопастными ТВЭлами в составе технологических каналов (ТК) исследовательского реактора ИВГ. Проанализированы результаты продувок газоохлаждаемых ТК с карбидными ТВЭлами при наземной отработке ядерного ракетного двигателя [7] и гидравлических проливок водоохлаждаемых ТК с уран-циркониевыми ТВЭлами в составе исследовательского реактора ИВГ.1М [8].

Измеренные данные по перепаду давления от расхода теплоносителя обобщены критериальными зависимостями, учитывающими шаг закрутки, режим турбулентного течения. Измеренные первичные экспериментальные данные, а также обобщающие соотношения коэффициента гидравлического сопротивления $\xi(Re, Fr)$ представляют ценный материал для проведения верификации и валидации расчетных моделей CFD кодов в обоснование безопасности РУ ИР и АС ММ.

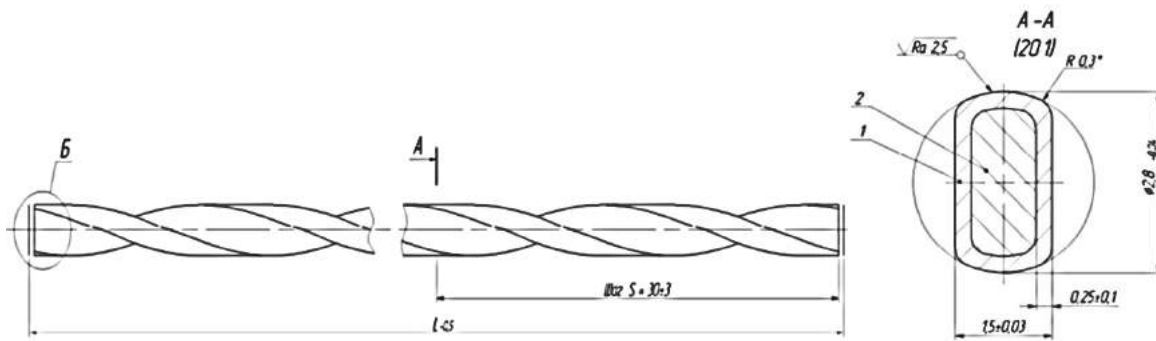


Рис. 1. Конструкция уран-циркониевого твэла реактора ИВГ.1М: 1 - пучок твэлов; 2 – вытеснители; 3 - опорная решетка; 4 – обойма; 5 - центрирующая трубка



Рис. 2. Внешний вид тепловыделяющей сборки ВТК ИВГ.1М

Библиографический список

1. Тепловыделяющие элементы для исследовательских реакторов / В.А. Цыканов. - Дмитровград : ГНЦ РФ НИИАР, 2001. - 248 с.
2. Параметры и технология изготовления твэлов реактора ПИК. Агеенков В.И., Гарусов Е.А. и др. Атомная энергия, т. 92, вып. 6. – 2002
3. <https://www.atomicenergy.ru/news/2022/11/29/130705?ysclid=lighs19712440403130>
4. <https://strana-rosatom.ru/2020/01/20/133-uranovye-niti-npo-luch-sozdalo-inn/?ysclid=liginx37ub881793353>
5. Lightbridge Corporation's advanced metallic fuel for Light Water Reactors. J. Malone, A. Totemeier, N. Shapiro, S. Vaidyanathan. Nuc. Tech. V. 180, Dec. 2012
6. Y.H. Koo, C.T. Lee, M. Baryshnikov, et al. Behavior of unirradiated Zr based uranium metal fuel under reactivity initiated accident conditions. 2008, 238(7), 1592–1600. doi:10.1016/j.nucengdes.2007.11.008
7. И.И. Федик, А.Г. Ланин. Проблемы выбора и использования материалов для ядерно-ракетного двигателя. Успехи физических наук, Т.181, №3, 2011
8. ЯДЕРНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ КАЗАХСТАНА: Сборник докладов, выпуск 15, 2020 / Ассоциация «Ядерное общество Казахстана». — Нур-Султан, 2020, 82 стр.

**Балабина Т.Ю., Добров А.А., Качалин Г.Н., Кудряшов Е.А., Легчанов М.А.,
Хробостов А.Е.**

Российский федеральный ядерный центр Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
Саров, 607190, пр. Мира, 37

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
Нижний Новгород, 603155, ул. Минина, 24

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И РАСЧЕТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОТКРЫТОПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ НА ОДНОРОДНОСТЬ ГАЗОВОГО ПОТОКА

Важным фактором, влияющим на эффективность работы газового лазера замкнутого типа, является оптическое качество потока, которое определяется однородностью газодинамических параметров среды. Для решения задачи лазерной техники необходимо иметь однородный профиль скорости газового потока. Газодинамические тракты лазера замкнутого типа могут иметь распределенную архитектуру и достаточно сложную топологию. Как известно [1], возмущения затухают на расстоянии ~ 100 характерных размеров, что приводит к необходимости увеличения размеров конструкции. В условиях ограничения массы и габаритов устройства возникает необходимость выравнивания потока на как можно меньшем расстоянии от места возмущения (порядка нескольких калибров). В качестве одного из возможных способов выравнивания профиля скорости потока могут быть использованы вставки: конструктивные элементы из открытопористых материалов. Наибольший интерес представляют материалы с высокой пористостью в виду их малого веса и низкого гидравлического сопротивления [2].

Численное моделирование для описания характеристик течения является сложной и дорогостоящей процедурой. Математическая модель в общей постановке достаточно сложна и не имеет точного аналитического решения. Поэтому вводятся различного рода допущения и полуэмпирические зависимости для коэффициентов переноса, используемые в математической модели.

В работе приведены результаты экспериментального и численного исследования газодинамических характеристик дозвукового течения через конструкцию, состоящую из цилиндрической трубы, поворота на угол 90° , диффузора, цилиндрической втулки или газопроницаемой пористой вставки и конфузора для диапазона значений числа Рейнольдса [2×10^4 ; 10^5].

Численные исследования структуры турбулентных потоков в рассматриваемых элементах конструкций проводились с использованием подходов, базирующиеся на использовании осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (Reynolds Averaged Navier-Stokes – RANS), замкнутых с помощью той или иной полуэмпирической модели турбулентности, а также вихреразрешающий, в частности, метод моделирования крупных вихрей (Large Eddy Simulation – LES). Расчеты течений были выполнены как в стационарной, так и нестационарной постановках в рамках комплекса «ЛОГОС» [3] на параллельном суперкомпьютере.

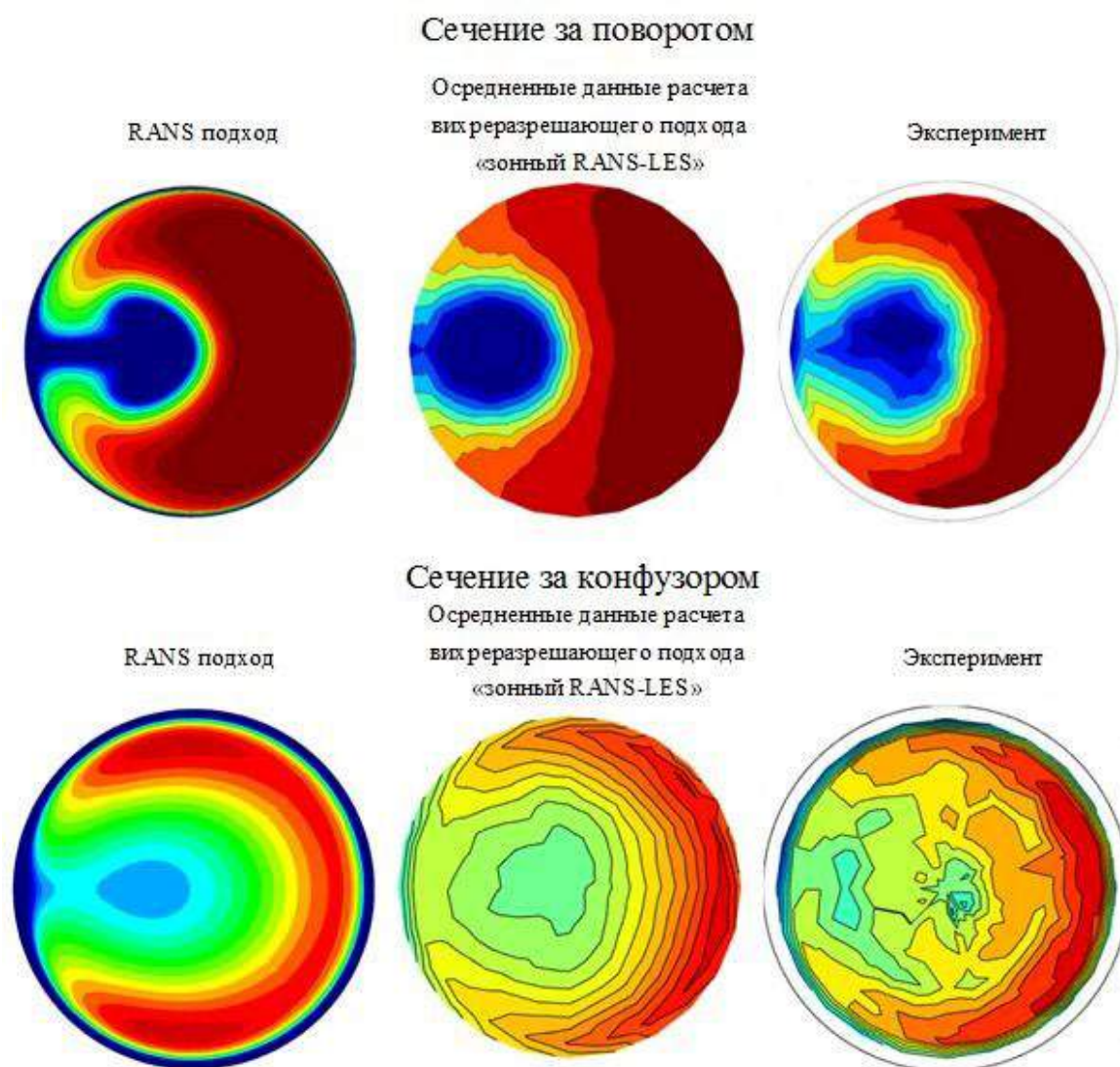


Рис. 1. Сравнительный анализ численных расчетов с экспериментальными данными по относительной скорости в двух сечениях без учета пористой вставки

6

Из анализа полученных результатов делается вывод о том, что осредненные параметры потока в нестационарной постановке с использованием зонного RANS-LES перехода в модели турбулентности [4] качественно и количественно лучше совпадают с экспериментальными данными, чем результаты стационарных расчетов, основанные на использовании RANS подхода. Верификация численной методики проводилась по экспериментальным данным, которые были получены на аэродинамическом стенде ФТ-18 на базе НГТУ им. Р.Е. Алексеева [5]. Количественным критерием влияния конструктивных изменений на однородность потока является уровень завихренности.

Экспериментально показано, что использование пористой вставки дает в результате практически однородный профиль скорости газа на выходе конструкции. Неоднородность величины скорости в выходном сечении составляет 3%, в то время как в отсутствии пористой вставки неоднородность составляет 40%. Полученные результаты указывают на возможность применения пористых структур в качестве элементов выравнивания профиля скорости.

Поле завихренности, формируемое конструкцией, сохраняется на расстоянии 20 калибров. При варьировании начальных турбулентных параметров и граничных условий заметных изменений в уровне завихренности не происходит.

Библиографический список

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Учебное пособие в 10 т. Т. VI. Гидродинамика. – 3-е изд., перераб. – М.: Наука. Гл. ред. физ-мат. лит., 1986. – 736 с.

2. Попов И.А. Гидродинамика и теплообмен в пористых теплообменных элементах и аппаратах. Интенсификация теплообмена: монография / под общ. ред. Ю.Ф. Гортышова. Казань: Центр инновационных технологий, 2007, 240 с.

3. Козелков А.С., Дерюгин Ю.Н., Зеленский Д.К., Полищук С.Н., Лашкин С.В., Жучков Р.Н., Глазунов В.А., Яцевич С.В., Курулин В.В. Многофункциональный пакет программ ЛОГОС: физико-математические модели расчета задач аэро-, гидродинамики и тепломассопереноса. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2013.

4. Волков К.Н., Емельянов В.Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008.

5. Разработка и обоснование экспериментального стенда ФТ-18 для исследования процессов смешения в моделях различной геометрии – Ю.И. Аношкин, А.А. Добров, М.М. Кузьма и [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2019. - № 2 (125). – с. 94-104. – DOI 10.46960/1816-210X2019_2_94

Работа выполнена при поддержке программы развития «Приоритет 2030»

Брызгунов П.А, Осипов С.К., Комаров И.И.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА ОПЕРЕЖАЮЩЕЙ ВЕРИФИКАЦИИ RANS-МОДЕЛИРОВАНИЯ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ В КАНАЛАХ

В настоящее время наиболее широко применимым методом численного моделирования турбулентных течений является метод RANS (Reynolds-averaged Navier–Stokes). Одной из проблем использования данного метода является отсутствие обобщенных рекомендаций по построению сеточных моделей для размеров элементов в основной зоне потока в зависимости от режимных и геометрических характеристик проточной части канала, тогда как для пристеночных ячеек существуют рекомендации по выбору размеров, основанные на физическом смысле уравнений, составляющих модели турбулентности [1, 2] и имеющие хорошую воспроизводимость для практических задач [3].

Для построения рекомендаций по настройкам расчетной сетки в работе [4] предлагается введение безразмерного числа подобия K_0 , определяемого как:

$$Ko = \frac{\Delta}{h_{п.с.}}, \quad (1)$$

где Δ - характерный линейный размер ячейки, при котором достигается сеточная сходимость и согласие с опытными данными не хуже $\pm 10\%$; $h_{п.с.}$ - толщина пограничного слоя, определяемая по эмпирическим соотношениям как функция от числа Рейнольдса и гидравлического диаметра канала [5].

Идея предлагаемой методики построения сетки заключается в декомпозиции расчетной зоны на типовые каналы, построении априорных корреляций $Ko(Re)$ на основе сравнения с опытными данными для типовых каналов и обратное получение по корреляциям численных значений настроек сетки.

На рис. 1 представлены графики зависимости $Ko(Re)$, полученные в ходе параметрических расчетов диффузорных каналов, каналов с внезапным расширением и сужением. По результатам расчетов была сформирована корреляционная зависимость, которая может быть использована для априорной оценки размеров ячейки в основной зоне потока для каналов с местными сопротивлениями, однако ввиду высокого разброса требуются дополнительные исследования с целью выявления дополнительных факторов, влияющих на зависимость.

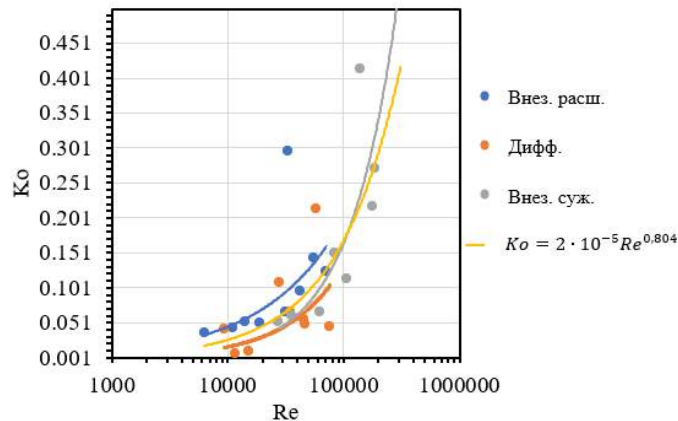


Рис. 1. Корреляции $Ko(Re)$ для течений в каналах, модель k- ω

Библиографический список

1. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications \\\ AIAA Journal, 1994. С. 1598–1605.
2. Launder B.E., Spalding D.B. The numerical computation of turbulent flows \\\ Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1974, С. 269-289.
3. Osipov S. Shcherbatov I. Vegeva A. Bryzgunov P. Makhmutov B. Computer Flow Simulation and Verification for Turbine Blade Channel Formed by the C-90-22 A Profile \\\ Inventions, 2022.
4. Bryzgunov P. Osipov S. Komarov I. Rogalev A., Rogalev N. Research and Development of Critical Correlations for the Optimal Grid Element Size Used for RANS Flow Simulation in Single and Compound Channels \\\ Inventions, 2023.
5. Nagib H.M., Chauhan K.A., Monkewitz P.A. Approach to an asymptotic state for zero pressure gradient turbulent boundary layers // Phil. Trans. R. Soc. A, 2007, С. 755–770.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания № FSWF-2023-0014 (Соглашение № 075-03-2023-383 от 18 января 2023 г.) в сфере научной деятельности на 2023-2025 гг.

Веретенников С.В., Шувалов Е.А.

ФГБОУ ВО Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева,
Рыбинск, 152934, Пушкина, 53

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ КАВИТАЦИИ В ПРОТИВОТОЧНОМ ЗАКРУЧЕННОМ ТЕЧЕНИИ

При использовании несжимаемой жидкости в вихревой трубе возможна реализация самых различных эффектов: разделение жидкости на разные фракции, очистка жидкости, нагрев жидкости в результате диссипации энергии при вихреобразовании. В закрученном потоке в приосевой области возникает локальное понижение статического давления, что приводит к образованию кавитирующих полостей в вихревой камере. Гидродинамические потоки в технических устройствах являются источником звукоизлучения, а при изменении структуры течения за счет появления разнообразных физических процессов изменяются спектр и интенсивность шума. Исследование взаимосвязи между изменением структуры закрученного потока и акустическим излучением может способствовать как и более детальному изучению протекающих процессов в вихревых устройствах, так и совершенствованию их конструкции.

Объектом исследования являлась вихревая труба, где вода применялась в качестве рабочего тела [1]. Закрутка потока осуществляется за счет тангенциального патрубка, который осуществляет плавный подвод несжимаемой жидкости в закручивающее устройство с прямоугольным соплом. В вихревой камере формируется противоточное закрученное течение с выходом приосевого потока через диафрагму, а периферийного через дроссель-крестовину. Для измерения физических параметров на каждом выходном патрубке установлены электромагнитный расходомер, а также датчики давления и температуры.

Выполнена визуализация структуры закрученного потока на трех режимах в вихревой камере и в выходном патрубке за диафрагмой. В качестве параметра характеризующего интенсивность противоточного течения, вступает относительная доля потока μ , определяемая как отношение расхода на выходе из диафрагмы к расходу на входе в вихревую камеру. В ходе испытаний варьировалось давление на входе в вихревую трубу, а также регулировалось соотношение расходов воды μ . Полученные результаты давления и объемной доли воды для различных режимов представлены на рис. 1-3.

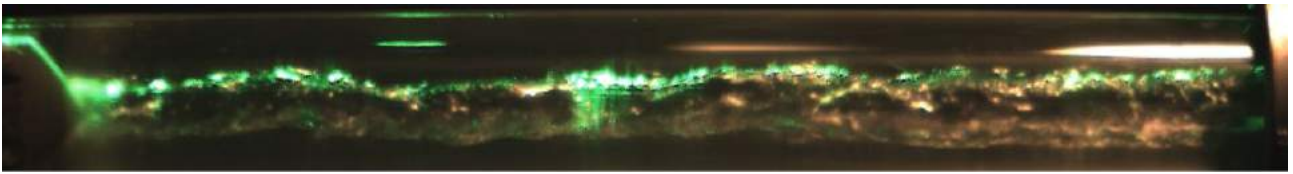


Рис. 1. Структура закрученного потока в вихревой камере на режиме 1

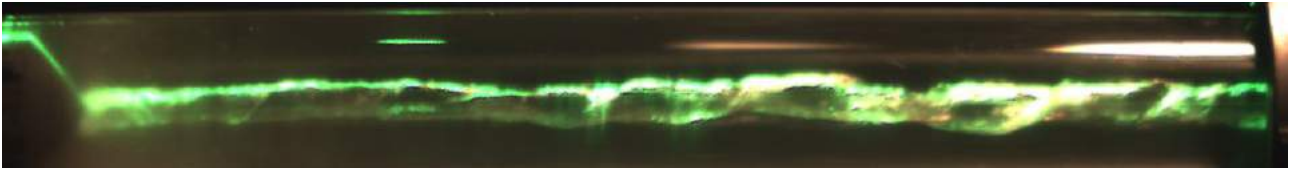


Рис. 2. Структура закрученного потока в вихревой камере на режиме 2

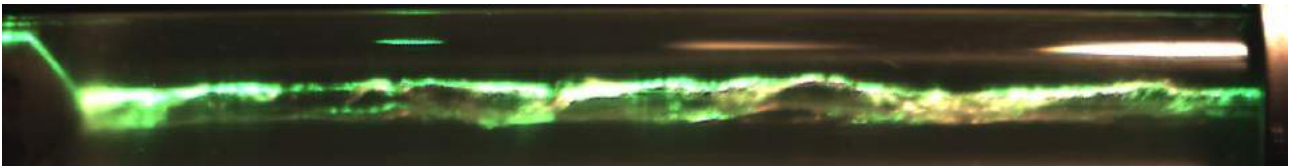


Рис. 3. Структура закрученного потока в вихревой камере на режиме 3

При дросселировании противоположного диафрагме выхода вихревой камеры значительно увеличивается расход приосевого течения. Исследованы два режима соответствующих $\mu=1$ и $\mu=0,96$. Структура приосевого потока при этом заметно изменяется и принимает вид двух спиральных жгутов вращающихся вокруг своей оси. На этих режимах в патрубке за диафрагмой движется приосевой поток, в котором образуются мелкие пузыри. Можно предположить, что в закрученном течении происходит кавитация.

Библиографический список

1. Бирюк, В.В. Веретенников С.В., Гурьянов А.И., Пиралишвили Ш.А. Вихревой эффект. Технические приложения. Том 2 (Часть 1). – М.: ООО «Научтехлитиздат», 2014. –288 с.
2. Veretennikov, S.V. and Piralishvili, Sh.A. and Evdokimov, O.A. and Guryanov, A.I. Heat transfer simulation of unsteady swirling flow in a vortex tube Journal of Physics: Conference Series, 2018, 980 (1), 012007.

Работа выполнена в рамках государственного задания на выполнение фундаментальных научных исследований (шифр научной темы FSSG-2023-0002)

**Дмитриев С.М., Демкина Т.Д., Доронков Д.В., Доронкова Д.С.,
Добров А.А., Курицин Д.Д., Пронин А.Н., Рязанов А.В., Солнцев Д.Н.**
НГТУ им. Р.Е. Алексеева,
Н. Новгород, 603155, Минина, 24

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ ВХОДНОГО УЧАСТКА ТВС РЕАКТОРА ТИПА РИТМ АТОМНОЙ СТАНЦИИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Важной задачей развития Российской Федерации является освоение ресурсов Арктики, значительная концентрация которых обусловила строительство промышленных предприятий в Арктическом регионе. Для развития этого региона необходим энергоисточник, обладающий автономностью, надёжностью и маневренностью. Уникальный научный, конструкторский и производственный опыт, накопленный в атомной отрасли при создании судовых реакторных установок (РУ) [1], является основой развития приоритетного проекта Госкорпорации «Росатом» – атомных станций малой мощности (АСММ) [2].

На данный момент ведутся конструкторские работы по созданию АСММ с новейшей РУ РИТМ-200С [3], разработанной в АО «ОКБМ Африкантов». Проектом РУ предусматривается кассетная активная зона с топливом повышенной ураноёмкости для увеличения энергоэффективности станции. Конструкция ТВС новой кассетной активной зоны базируется на опыте создания и эксплуатации топливных сборок РУ новых атомных ледоколов.

Конструктивные особенности ТВС кассетной активной зоны обусловили необходимость экспериментального определения влияния отдельных конструктивных элементов её входного участка, а именно дроссельной шайбы, на структуру поля аксиальной скорости потока теплоносителя на входе в активную часть твэльного пучка [4]. Особенности конструкции входного участка ТВС могут привести к изменению поля аксиальной скорости потока и, как следствие, к изменению условий работы элементной базы активной зоны, что в свою очередь может повлиять на её теплотехническую надёжность.

В докладе представлены результаты экспериментального изучения особенностей формирования потока теплоносителя во входном участке ТВС кассетной активной зоны реактора типа РИТМ атомной станции малой мощности. Целью работы является исследование влияния разных элементов конструкции входного участка на перераспределение аксиальной скорости потока теплоносителя. Для достижения цели проведена серия экспериментов на масштабной экспериментальной модели, включающей элементы конструкции входного участка от тарировочной шайбы до узла крепления твэлов к диффузору, а также пролет твэльного пучка между поглощающей решеткой и первой дистанционирующей решеткой. Экспериментальные исследования проводились на аэродинамическом стенде в НГТУ им Р.Е. Алексеева, где моделирование течения рабочей среды осуществлялось воздушным теплоносителем, основываясь на теории гидродинамического подобия [5]. Исследования проводились с использованием пневмо-

метрического метода в нескольких характерных сечениях по длине модели. Расположение точек измерения охватывает все поперечное сечение модели. Особенности течения теплоносителя визуализированы картограммами аксиальной скорости потока рабочей среды, а также графиками аксиальной скорости по сечению пучка твэлов. Результаты экспериментального моделирования использованы при оптимизации гидравлического профилирования элементов конструкции входного участка ТВС. Полученная база опытных данных может использоваться для валидации отечественной CFD-программы ЛОГОС, а также для уточнения методик теплогидравлического расчета активных зон в поячежном приближении.

Библиографический список

1. Зверев Д.Л. [и др.] Реакторные установки для атомных ледоколов. Опыт создания и современное состояние \ \ Атомная энергия, 2020. Т. 129. № 1. С. 29–37.
2. Беляев В.М. [и др.] Опыт создания первой в мире плавучей АЭС. Направления дальнейшего развития \ \ Атомная энергия. 2020. Т. 129. № 1. С. 37–43.
3. Петрунин В.В. Реакторные установки для атомных станций малой мощности \ \ Вестник российской академии наук. 2021. Т. 91. № 6. С. 528–540.
4. Митрофанова О.В. Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерно-энергетических установок. Москва: Ленанд, 2020. 352 С.
5. Гухман А.А. Введение в теорию подобия. Москва: Высшая школа, 1973. 296 С.

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема № FSWE-2021-0008).

**Дмитриев С.М., Демкина Т.Д., Доронков Д.В., Доронкова Д.С.,
Добров А.А., Курицин Д.Д., Пронин А.Н., Рязанов А.В., Солнцев Д.Н.**
НГТУ им. Р.Е. Алексеева,
Н. Новгород, 603155, Минина, 24

ГИДРОДИНАМИКА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ НА ВЫХОДЕ ИЗ ТОПЛИВНОЙ КАССЕТЫ РЕАКТОРА ТИПА РИТМ

Важной задачей развития Российской Федерации является освоение ресурсов Арктики, значительная концентрация которых обусловила строительство промышленных предприятий в Арктическом регионе. На данный момент ведутся конструкторские работы по созданию АСММ с новейшей РУ РИТМ-200С [1-2]. Проектом РУ предусматривается кассетная активная зона с топливом по-

вышенной ураноёмкости для увеличения энергоэффективности станции. Топливные кассеты новой активной зоны имеют ряд отличий от топливных сборок РУ атомных ледоколов [3].

Важным отличием, помимо изменения геометрии твэльного пучка, конструкции дистанционирующих решеток (ДР) и формы центрального вытеснителя, является форма и геометрия головки топливной кассеты. Указанные факторы и обусловили необходимость дополнительного экспериментального обоснования конструкции головки топливной кассеты.

В докладе приведены результаты экспериментальных исследований и сравнительного анализа гидродинамики теплоносителя в выходном участке топливной кассеты за головками разной конструкции. Исследуемая конструкция топливной кассеты предназначена для активной зоны реактора типа РИТМ атомной станции малой мощности наземного размещения. Цель работы заключается в исследовании распределения осевой скорости и расхода потока теплоносителя на выходе из твэльного пучка, за головками нескольких типов конструкции, перед трубой отбора теплоносителя и в отверстиях верхней опорной плиты, а также в определении областей пучка твэлов, из которых наиболее вероятно попадание потока теплоносителя в трубу отбора к термометру сопротивления [4].

Для достижения цели на исследовательском стенде с воздушной рабочей средой проведены эксперименты на модели выходного участка топливной кассеты, включающей фрагмент выходной части пучка твэлов с дистанционирующими решетками, макеты головок двух типов конструкции, а также макеты верхней опорной плиты и трубы отбора теплоносителя. При изучении течения теплоносителя в выходной части топливной кассеты использовались пневмометрический метод и метод впрыска контрастной примеси [5-7].

Измерения проводились по всему поперечному сечению модели. Гидродинамическая картина течения теплоносителя представлена картограммами распределения осевой скорости, расхода теплоносителя и контрастной примеси в поперечном сечении модели. Результаты исследований использованы при обосновании инженерных решений при проектировании новых активных зон реакторов РИТМ. Опытные данные, полученные в ходе экспериментов, собраны в базу данных и использованы при валидации импортозамещающей CFD программы ЛОГОС и одномерных теплогидравлических кодов, применяемых при обосновании теплотехнической надежности активных зон.

Библиографический список

1. Д.Л. Зверев [и др.] Реакторные установки для атомных ледоколов. Опыт создания и современное состояние // Атомная энергия, 2020. Т. 129. Вып. 1. С. 29–37.
2. Д.Л. Зверев [и др.] Активные зоны действующих атомных ледоколов // Судостроение, 2020. №1. С. 13–16.
3. В.М. Беляев [и др.] Опыт создания первой в мире плавучей АЭС. Направления дальнейшего развития // Атомная энергия, 2020. Т. 129. Вып. 1. С. 37–43.

4. В.В. Петрунин Реакторные установки для атомных станций малой мощности \\\ Вестник Российской академии наук, 2021. Т. 91. Вып. 6. С. 528–540.

5. А.А. Баринов [и др.] К вопросу о методологии обоснования теплотехнической надежности активных зон водяных энергетических реакторов \\\ Атомная энергия, 2016. Т. 120. Вып. 5. С. 270–275.

6. А.В. Варенцов [и др.] Экспериментальные исследования локальной гидродинамики теплоносителя на масштабной модели кассетной ТВС реактора КЛТ-40С \\\ Теплоэнергетика, 2016. №8. С41–48.

7. Гухман А.А. Введение в теорию подобия. М.: Высшая школа. 1973.

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема № FSWE-2021-0008).

Заболотский А.В., Хадыев В.Т., Турчин М.Ю.

ООО «Группа «Магнезит»,
Сатка, 456910, Солнечная, 34

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА НА СВОДЕ ТУННЕЛЬНОЙ ПЕЧИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ФУТЕРОВКИ

Контроль состояния футеровки высокотемпературного промышленного оборудования является важным мероприятием для обеспечения безопасности персонала и своевременного планирования ремонтов. Для большинства агрегатов непрерывного действия непосредственный осмотр футеровки невозможен, что делает актуальной разработку различных косвенных методов контроля. В случае высокотемпературных агрегатов одним из распространенных способов контроля является оценка остаточной толщины футеровки по температуре поверхности кожуха.

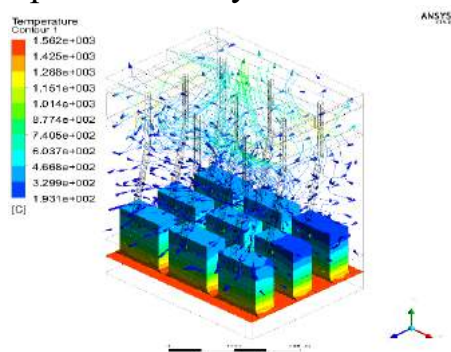


Рис. 1. Геометрическая модель свода туннельной печи с наложенным полем температур и линиями тока воздуха

Сложность применения такого метода заключается в том, что кожух промышленного оборудования несет на себе различные конструктивные элементы, способные выступать в качестве радиаторов локального охлаждения, либо приводить к затруднению свободной конвекции на поверхности. В частности, свод туннельной печи представляет собой сложную металлоконструкцию из балок, предназначенных для крепления огнеупорных сводовых изделий, обладающих также сложной формой (рис. 1).

Геометрическая форма пространства над сводом настолько осложняет решение задачи, что при использовании доступных вычислительных мощностей невозможно решить ее в рамках одного расчета. Решение было получено путем последовательного

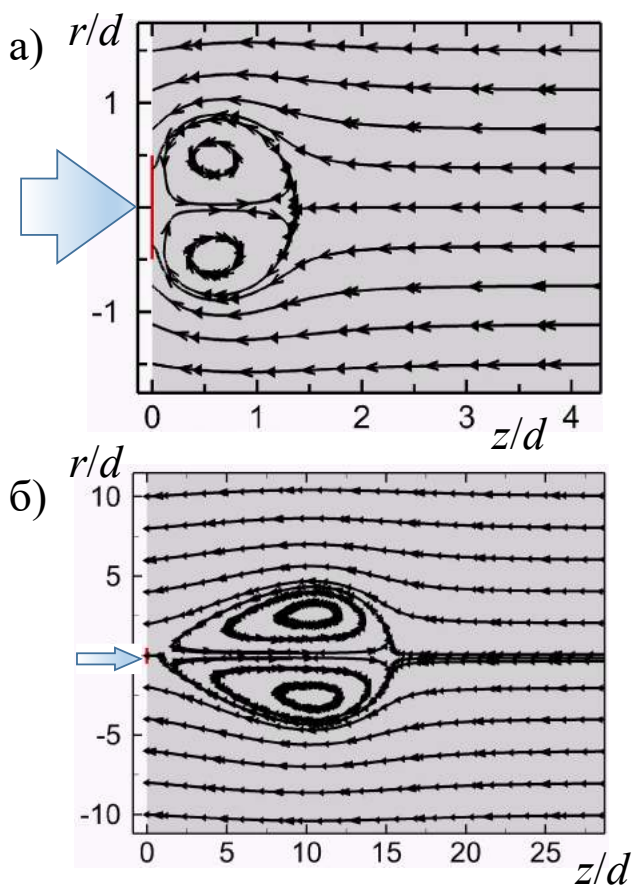
определения поля скоростей движения потока воздуха над сводом без учета теплообмена с последующим введением уравнений для расчета температуры потока и стенки. Результаты показали хорошую сходимость и были валидированы сравнением с известными экспериментальными данными эксплуатации печи.

Засимова М.А., Рис В.В., Иванов Н.Г.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, 195251, Политехническая, 29

ИССЛЕДОВАНИЕ ВИХРЕВЫХ ТЕЧЕНИЙ, ФОРМИРУЕМЫХ ИМПУЛЬСНОЙ ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУЕЙ

В докладе представляются данные численного моделирования нестационарного течения, вызванного импульсной струей. Подача струи в затопленное пространство осуществляется за счет выдува среды из отверстия диаметром d с однородной скоростью V_0 за время T_0 . Согласно [1], при высоких значениях числа Рейнольдса струи ($Re = V_0 d / \nu \geq 10^3$), формируемое вдали от места выдува, течение характеризуется безразмерным параметром $P = (V_0 T_0 / d)^{1/3}$. При $P < 1$ в пространстве формируются вихревые кольца, при $1.6 < P < 8$ формируются вихревые облака и при $P > 9$ – нестационарные струи [1].



**Рис. 1. Линии тока
в относительной системе координат:
а) $P = 0.8$ и б) $P = 3.6$**

В условиях, соответствующих трем режимам истечения импульсной струи, когда значения P взяты из диапазона $0.5 \dots 10$, выполнено численное моделирование статистически нестационарных турбулентных течений на основе URANS подхода в сочетании с k- ϵ RNG моделью турбулентности. Изменение параметра P осуществлялось за счет изменения времени подачи импульсной струи. Число Re задано постоянным и равным 3000. Задача решалась в осесимметричной и трехмерной постановках. Расчеты проведены в пакете ANSYS Fluent.

Развитие течения, возникающего под действием импульсной струи, можно разделить на три этапа. На первом этапе ($t \leq T_0$) происходит истечение импульсной струи. В конце истечения

($t \approx T_0$), если $P < 8$, формируются кольцевые вихри. На рис. 1 приведены картины течения, полученные для вариантов с $P = 0.8$ (рис. 1, а) и $P = 3.6$ (рис. 1, б). Вихри показаны в относительных системах координат, которые перемещаются со средними продольными скоростями $V_{z,av}(t)$, определенными в области, где $|V_z| > 0.01 V_c(t)$, здесь $V_c(t)$ – максимальная скорость. Отчетливо наблюдаются отличия в структуре течения. При $P = 0.8$ характерный продольный и поперечный размер кольцевого вихря сопоставим с диаметром отверстия (на рис. 1 диаметры отверстий показаны красной линией). При $P = 3.6$ размер вихревой структуры заметно превышает размер отверстия. Отметим, что при $P = 3.6$ продольный размер вихревого облака превышает поперечный размер, для вихревого кольца ($P = 0.8$) наблюдается обратное соотношение между размерами.

Для случая $P = 3.6$ на рис. 2 сплошной линией показано изменение во времени положения центра вихревого облака.

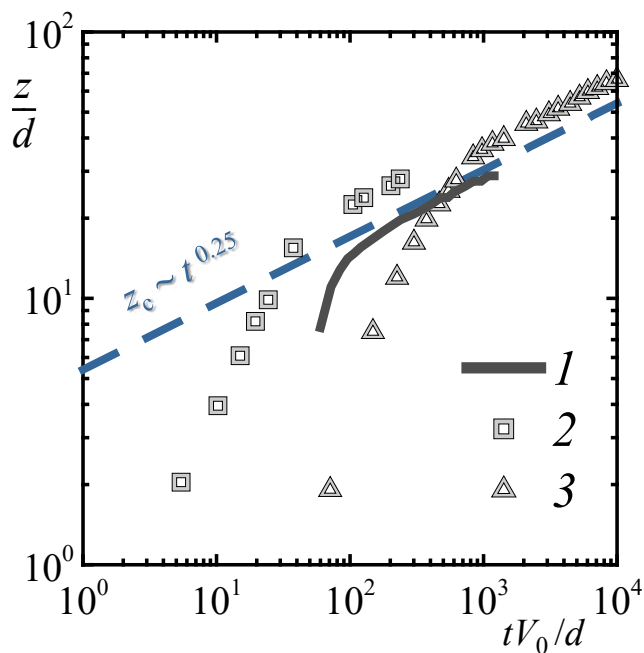


Рис. 2. Изменение положения центра вихревого облака во времени
1 – расчет, 2 и 3 – данные [1]

Полагается, что центр облака $z_c(t)$ находится в точке на оси z , где продольная скорость максимальна, $V_z = V_c(t)$. Начальная точка линии 1 соответствует времени окончания первого этапа. На втором этапе вихревое облако движется с замедлением и зависимость $z_c(t)$ приближается к зависимости $z_c \sim t^{0.25}$, изображенной штриховой линией. На третьем этапе облако движется по закону $z_c \sim t^{0.25}$. Течение приобретает свойство автомодельности во времени. Экспериментальные данные [1] на рис. 2, полученные для условий 2 – $Re = 3000$ и $P = 4$, 3 – $Re = 12000$ и $P = 5.8$, показывают аналогичный расчетному сценарий движения вихревого облака на втором и третьем этапах.

Библиографический список

1. R. Sangras, O.C. Kwon, G.M. Faeth. Self-preserving properties of unsteady round non-buoyant turbulent starting jets and puffs in still fluids \ ASME. J. Heat Transfer, 2002. С. 460–469.

Тупоносов Ф.В., Фещенко К.П., Шариков С.В., Захаренков А.В., Дедов А.В.
Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРЬ ДАВЛЕНИЯ НА МОДЕЛИ СМЕСИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

Одним из наиболее распространенных методов интенсификации тепло-съемы сегодня является турбулизация и закрутка потока [1-2]. Широкое распро-странение интенсификация теплообмена получила за счет очевидных преиму-ществ, таких как существенное снижение весогабаритных характеристик устройств с интенсификаторами, относительной простоты повышения произво-дительности теплообменных аппаратов, а также расширения области примене-ния модифицированных теплообменных устройств в различных областях про-мышленности. Известно большое число работ, посвященных установке шнеков, скрученных лент, спиралей в каналы [3-4]. Вместе с тем, работы по поиску эф-фективных методов интенсификации применительно к конкретным областям промышленности в зависимости от конкретных задач продолжаются.

В данной работе выполнено исследование гидродинамической эффектив-ности использования интенсификатора оригинальной конструкции. Конструк-ция интенсификатора представлена на рис. 1. Интенсификатор выполнен из пла-стины (материал: нержавеющая сталь) толщиной 1 мм, шириной 16 мм и длиной 119 мм, равномерно скручивается на 180° либо по, либо против часовой стрелки вокруг оси вдоль направления движения потока теплоносителя.

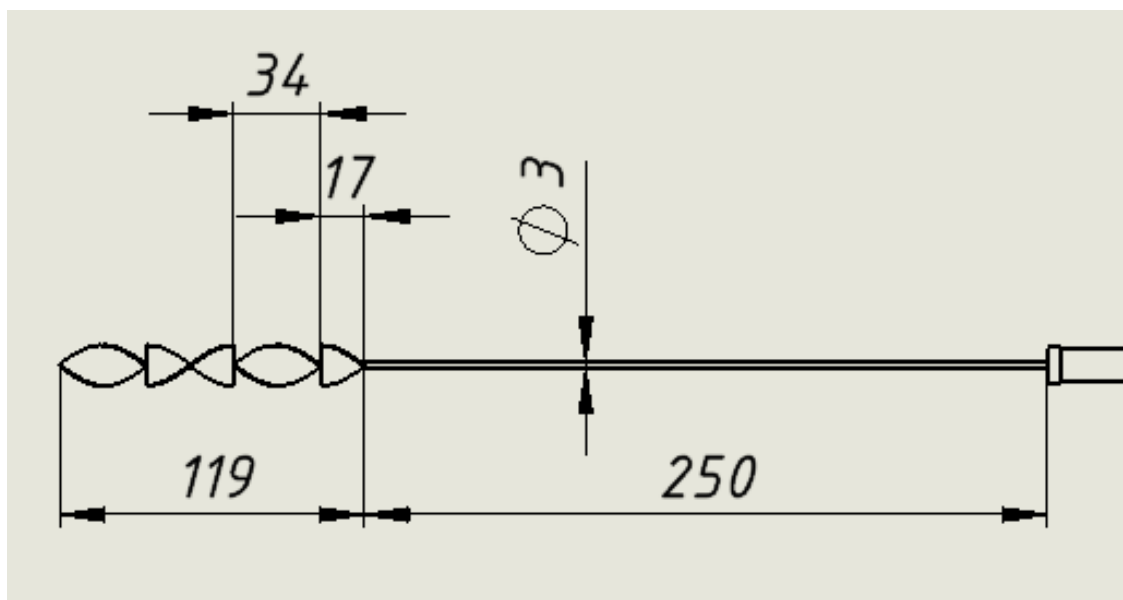


Рис. 1. Принципиальная схема (а) и фотография интенсификатора

Проведена серия экспериментов по измерению потерь давления на интенсификаторе.

На рис. 2 показаны результаты экспериментов в виде зависимости потерь давления от массового расхода теплоносителя при различных температурах.

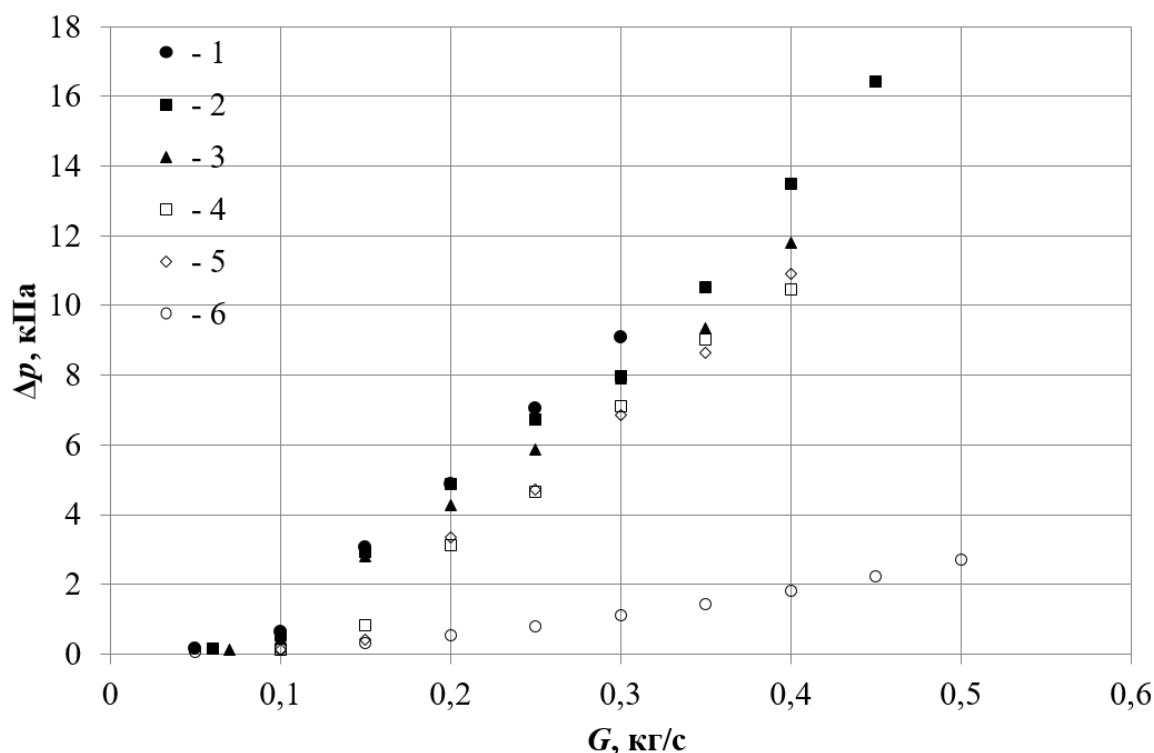


Рис. 2. Зависимость потерь давления от массового расхода теплоносителя:
 1 – $T = 19^\circ\text{C}$; 2 – $T = 50^\circ\text{C}$; 3 – $T = 102^\circ\text{C}$; 4 – $T = 100^\circ\text{C}$; 5 – $T = 150^\circ\text{C}$; 6 – $T = 23^\circ\text{C}$
 (гладкая труба)

Выполнена обработка экспериментальных данных, получены значения коэффициента гидравлического сопротивления в диапазоне чисел $Re = (5 \div 100) \cdot 10^3$. Получено расчетное уравнение, удовлетворительно описывающее экспериментальные данные.

Библиографический список

1. Bergles A.E. et al. Bibliography on augmentation of convective heat and mass transfer, Report HTL-31. Ames, 1983.
2. Webb R.L., Principles of Enhanced Heat Transfer, N.Y.: John Wiley & Sons, Inc., 1994, 556 с.
3. Дзюбенко Б.В., Кузьма-Кичта Ю.А., Леонтьев А.И., Федик И.И., Холпанов А.П., Интенсификация тепло- и массообмена на макро- микро- и наномасштабах, М: ФГУП “ЦНИИАТОМИНФОРМ”, 2008, 532 с.
4. Попов И.А., Махонов Х.М., Гуреев В.М. Физические основы и промышленное применение интенсификации теплообмена: Интенсификация теплообмена монография, под общ. ред. Ю.Ф Гортышева Казань: Центр инновационных технологий, 2009, 564 с.

Иванов Н.А., Сатаев А. А.

Нижегородский государственный технический Университет
им. Р.Е. Алексеева,
г. Нижний Новгород, 603155, ул. Минина, 24

РАСЧЕТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФИЛЬТРАЦИИ В АППАРАТЕ ЦИКЛОННОГО ТИПА С ЦЕЛЬЮ ЕГО ОПТИМИЗАЦИИ

Вода является ценным ресурсом во многих технологических процессах. Качество воды, используемой в них, напрямую влияет на эффективность и безопасность энергетических установок. Поэтому водоподготовка является необходимым этапом для обеспечения безопасной и надежной работы энергетических установок, а также для повышения их эффективности и долговечности.

В работе [1] было выяснено, что есть зависимость эффективности очистки от радиуса R , высота цилиндрической части H . В данной работе вместо R

и H были исследованы другие параметры:

- 1) угол конуса α ;
- 2) высоты вертикальной проставки (H);
- 3) Высота внутренней части выходного патрубка (L);
- 4) угол входного патрубка β .

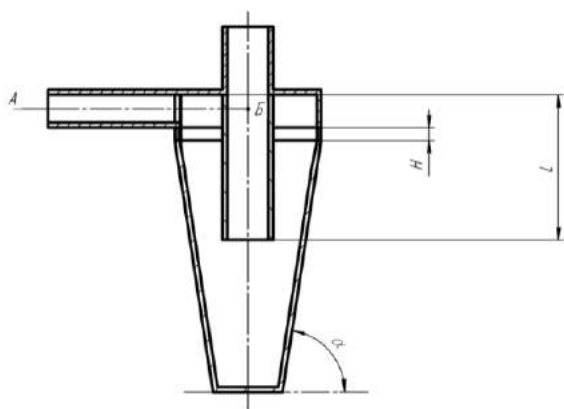


Рис. 1. Схематическое изображение гидроциклона и его параметров

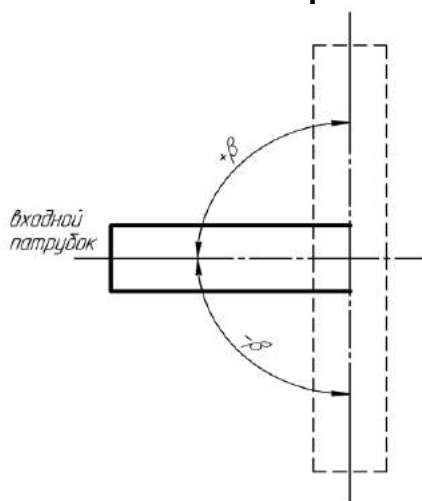


Рис. 2. Изображение угла наклона β входного патрубка

Проектирование и моделирование гидроциклона осуществлялось поэтапно с помощью пакета вычислительной гидродинамики Solidworks Flow Simulation. На каждом этапе посредством проверки эффективности очистки при заданных параметрах выбирался лучший геометрический параметр [2].

Далее, на основе лучшего параметра осуществлялась дальнейшая работа. После подбора геометрических параметров посредством компьютерного моделирования была снята характеристика очистки от диаметра частиц. В результате исследования были получены данные параметры:

- угол конуса $\alpha = 77,5^\circ$;
- высота вертикальной проставки $H = 5$ мм;
- высоты внутренней части выходного патрубка $L = 0(60)$ мм;

- выбор угла входного патрубка $\beta=0^\circ$.

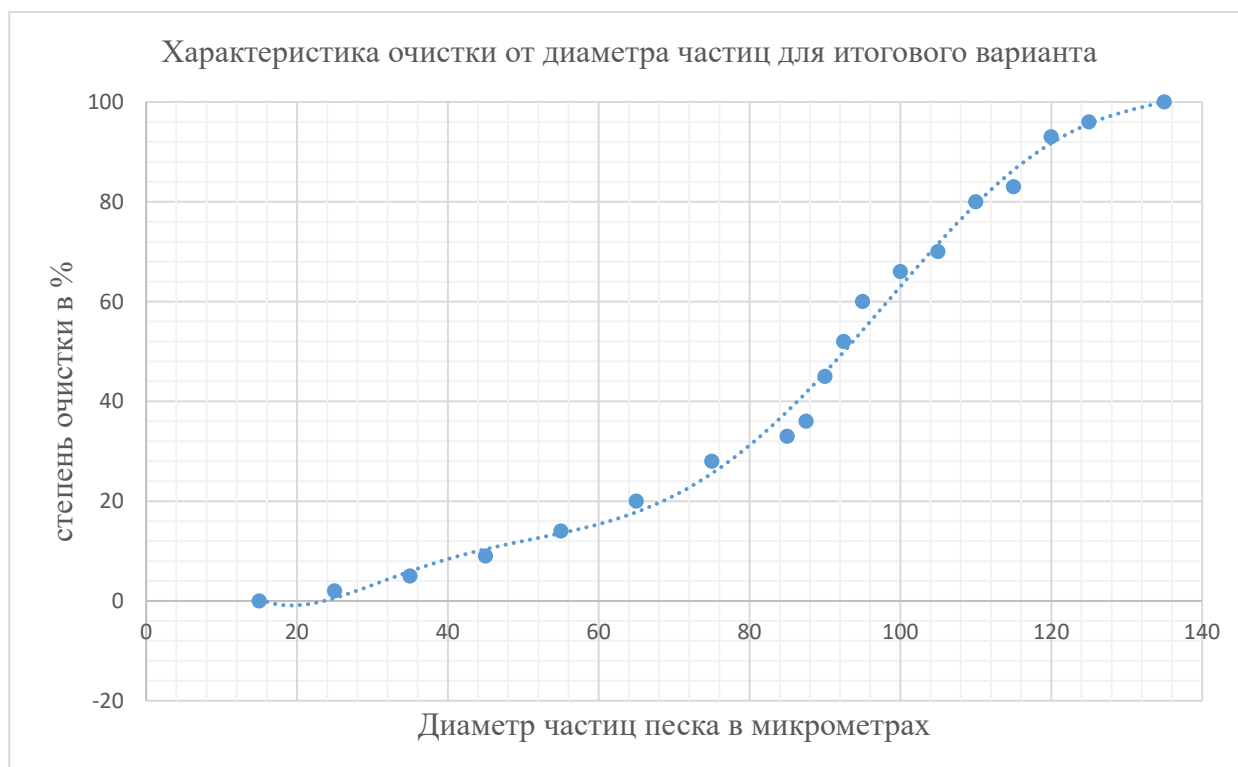


Рис. 3. Характеристика очистки от диаметра частиц для итогового варианта

Библиографический список

1. Теоретическое обоснование влияния геометрических параметров цилиндро-конического гидроциклона на степень очистки отработанных смазочных масел от нерастворимых примесей / А. Н. Зазуля, А. А. Глущенко, Д. Е. Молочников [и др.] // Наука в центральной России. – 2019. – № 2(38). – С. 116-123.
2. ГОСТ 10718-81 Гидроциклоны технические условия

Засимова М.А., Иванов Н.Г., Красикова А.Д., Степашева Е.Д.
 Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
 Санкт-Петербург, 195251, Политехническая, 29

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ УПРАВЛЕНИЯ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫМ РЕЖИМОМ СТРУЙНОГО ТЕЧЕНИЯ, РАЗВИВАЮЩЕГОСЯ В ОГРАНИЧЕННОМ ПРОСТРАНСТВЕ

В докладе представляются данные численного исследования, направленного на изучение возможностей управления динамикой турбулентных струй вентилиационного типа, развивающихся в ограниченном пространстве. Мотивация работы определяется результатами выполненных в последние годы прикладных

исследований, направленных на оценку различных аспектов работы систем вентиляции и жизнеобеспечения. В них было выявлено, что в натуральных условиях при подаче в помещение приточных струй в течении могут присутствовать глобальные автоколебания, существенно влияющие на локальные и интегральные характеристики течения и тепломассообмена.

Рассмотрены две модельные постановки, для которых в опубликованных ранее экспериментах фиксировались статистически установившиеся низкочастотные автоколебания. Первая постановка воспроизводит условия эксперимента Mataoui et al. [1], в котором исследовалось истечение воздушной струи из плоской щели в полость, одна из границ которой открыта. Значения числа Рейнольдса, построенного по входной скорости и высоте сопла, составили от 4×10^3 до 1.2×10^4 . Вторая постановка соответствует экспериментальной работе Lawson et al. [2], где рассматривалась подача круглой турбулентной струи в прямоугольную полость с отношением толщины к ширине 0.16. Число Рейнольдса, построенное по диаметру подводящей трубы и средней скорости, составило 5.4×10^4 . Для обеих задач доступны хорошо документированные экспериментальные данные.

Обе задачи решались на основе модели несжимаемой жидкости с постоянными физическими свойствами. Моделирование турбулентного движения осуществлялось на основе двух подходов: URANS (с привлечением $k-\epsilon$ RNG или $k-\omega$ SST модели турбулентности) и LES (с подсеточной моделью Смагоринского). Расчеты выполнены в пакете ANSYS Fluent, обеспечивающем второй порядок точности при дискретизации по пространству и времени, с привлечением вычислительных ресурсов СКЦ «Политехнический» (scs.spbstu.ru).

Для первой задачи в соответствии с экспериментальной картой режимов течения [1] были получены расчетные данные для стационарного и нестационарного режимов, дающие численную иллюстрацию смены режимов течения. Проведен анализ влияния на автоколебания варьирования размеров и положения выходных отверстий, а также замены плоского приточного сопла на несколько смежных приточных отверстий той же высоты (рис. 1, а).

Для задачи об истечении круглой струи [2] воспроизведен регистрировавшийся ранее в экспериментах квазипериодический режим распространения струи. Показана перестройка структуры течения и поля давления при подаче со стороны узкой боковой стенки управляющей струи, оказывающей существенное влияние на автоколебания (рис. 1, б); получена карта режимов в зависимости от соотношения импульсов основной и управляющей струй. На основе полученных данных выполнены оценки возможностей управления струйным потоком за счет впрыска массы сравнительно низкорасходной регулирующей струи в область перед выходным отверстием подающего основную струю затопленного сопла перпендикулярно его оси.

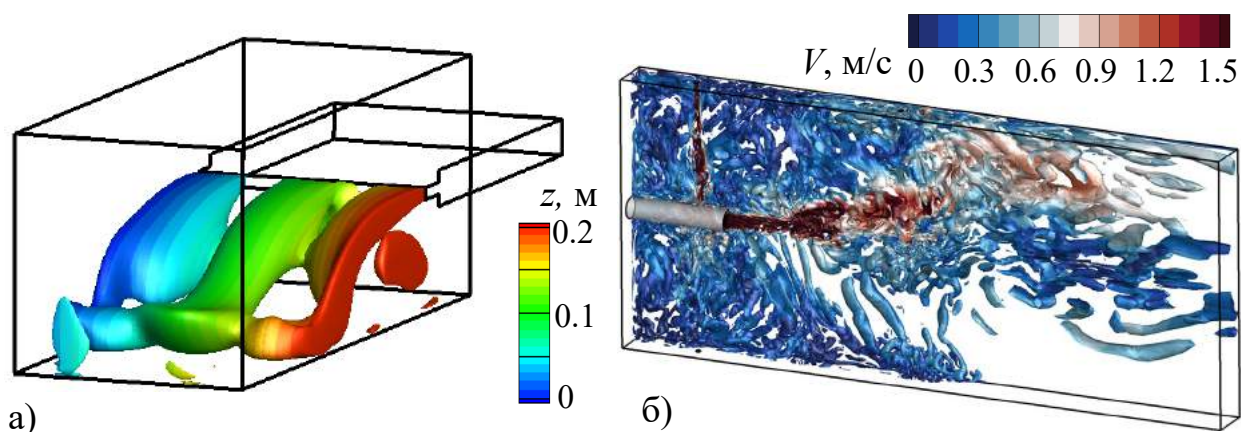


Рис. 1. а) Истечение струи из плоской щели: окрашенная в значения поперечной координаты изоповерхность модуля скорости $V_{\text{выход}}/4$ при разделении плоского сопла на три приточных отверстия;
б) истечение круглой струи: окрашенные в модуль скорости изоповерхности Q-критерия ($Q = 100 \text{ с}^{-2}$) при односторонней подаче боковой управляющей струи

Библиографический список

1. Mataoui A., Schiestel R., Salem A. Flow regimes of interaction of a turbulent plane jet into a rectangular cavity: experimental approach and numerical modelling // Flow, Turbulence and Combustion, 2001. С. 267-304.
2. Lawson N.J., Arruda M.P., Davidson M.R. Control of a submerged jet in a thin rectangular cavity // Journal of Fluids and Structures, 2005. С. 1025–1042.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 22-29-00224

Кабардин И.К., Правдина М.Х., Яворский Н.И. Меледин В.Г., Гордиенко М.Р., Зубанов К.С., Какаулин С.В., Полякова В.И.
 ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
 Новосибирск, 630090, пр. ак. Лаврентьева, 1

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЛДА ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ КРИЗИСА ТЕЧЕНИЯ В ВИХРЕВОЙ ТРУБЕ РАНКА–ХИЛША

Исследовано развитие кризиса течения в вихревой трубе Ранка–Хилша с квадратным сечением рабочего канала. Ранее для течения воздуха в этой трубе было экспериментально установлено выполнение гидравлического условия кризиса [1]. Кризис связывался с тем, что продольная скорость потока на границе пристеночного вихря и циркуляционной зоны достигала значения скорости распространения центробежных волн вдоль этой границы. В предлагаемой работе представлены и проанализированы новые подробные данные измерений кинематических характеристик кризисного течения. В том числе, пульсаций скорости.

Выявлены признаки наличия гидравлического прыжка вблизи входа закрученного потока в рабочий канал вихревой трубы.

Для измерения кинематических характеристик потока методом лазерной доплеровской анемометрии адаптирован [1] современный бесконтактный измеритель ЛАД-07, который разработан и произведен ОАО «ИОИТ» и ИТ СО РАН, г. Новосибирск. Измерялись две компоненты средней скорости в плоскости $X=0$: продольная и поперечная, модуль которой в указанной плоскости совпадает с окружной скоростью V в полярных координатах. В каждой точке измерения регистрировалось среднее квадратичное отклонение измеренной компоненты скорости от среднего значения.

Температурная диагностика основывалась на внесении в поток в нескольких сечениях прочного специально изготовленного маловозмущающего датчика температуры с малым поперечным сечением.

В предложенном исследовании подтверждается вывод о развитии кризисной неустойчивости поступательного закрученного потока в трубе Ранка–Хилша. Показано, что при достижении поступательной скоростью критического значения, равного скорости распространения центробежных волн на границе пристеночного вихря и циркуляционной зоны, на некотором участке трубы может развиваться каскад гидравлических прыжков.

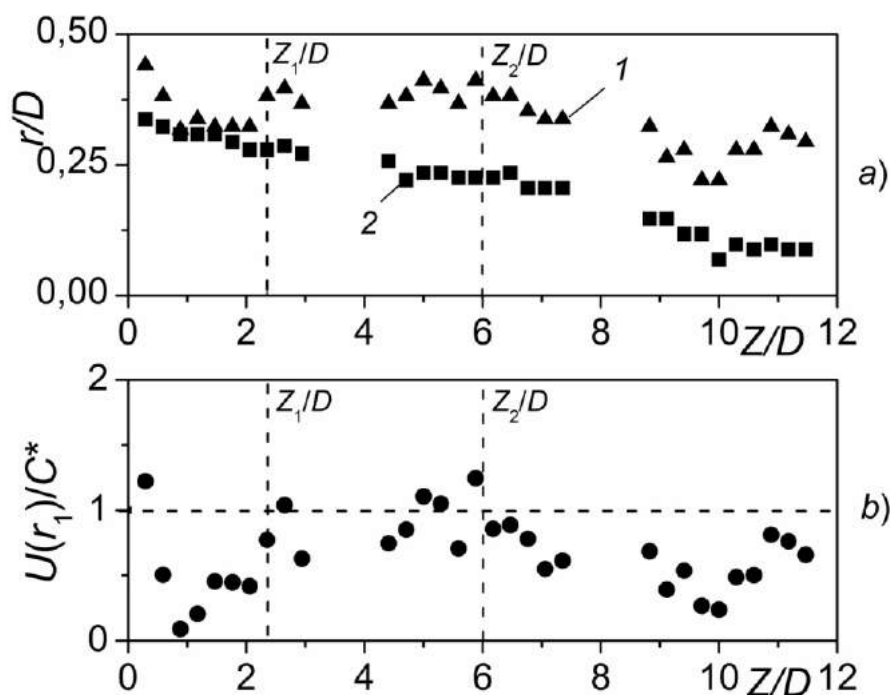


Рис. 1. Радиус вихря r_1/D (точки 1) и радиус противотока r_0/D (точки 2) (a); отношение продольной скорости на радиусе вихря к критическому значению скорости $U(r_1)/C^*$ (b).

Библиографический список

1. Правдина М.Х., Кабардин И.К., Полякова В.И., Куликов Д.В., Меледин В.Г., Павлов В.А., Гордиенко М.Р., Яворский Н.И. Гидравлическая неустойчивость потока в трубе Ранка // ПМТФ. 2020. Т. 61, № 3. С. 82–89.

2. Кабардин И.К., Полякова В.И., Правдина М.Х., и др. Анализ режимов в трубах Ранка с круглым и квадратным сечениями рабочего канала // ПМТФ. 2020. Т. 61, № 1(359). С.43–52.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 22-29-01262

Кадыров А.И., Вачагина Е.К.

Институт энергетики и перспективных технологий ФИЦ КазНЦ РАН,
Казань, 420111, Лобачевского, 2/31

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ТЕЧЕНИЯ ПОЛИМЕРНОГО РАСТВОРА В КАНАЛЕ СО ШНЕКОВОЙ ВСТАВКОЙ

В общем случае поле скоростей движущейся жидкости в канале со шнековой вставкой зависит от трех независимых переменных [1]. Для численных расчетов гидродинамических полей удобнее использовать математические модели, в которых основная система уравнений записана в винтовой системе координат [2]. Данный подход позволяет получать распределения гидродинамических полей, зависящих не от трех, а от двух переменных. Это существенно снижает и затраты памяти, и время работы, необходимые для получения результатов. Отметим, что краткий обзор исследований российских и зарубежных ученых в области тепломассообмена в закрученных потоках изложен в работе [3].

Использование оптического (например, PIV или SiV) метода 2D визуализации структуры течения подразумевает построение профиля скорости в некоторой плоскости светового ножа. Применительно к течениям в каналах со шнековыми вставками наиболее удобным способом является визуализация течения в плоскости, рассекающей по оси симметрии вдоль оси z . Для наглядности на рис. 1 и 2 представлены скриншот и графическое представление расположения плоскостей светового ножа.

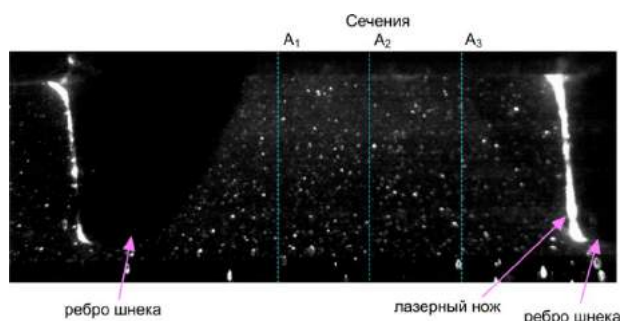


Рис. 1. Скриншот визуализации течения в канале со шнековой вставкой

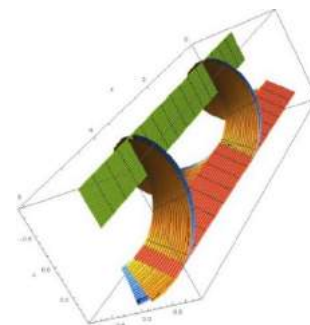


Рис. 2. Графическое представление расположения плоскостей светового ножа

В настоящей работе с помощью метода SiV [4] исследовано установившееся течение полимерного раствора в одной из таких плоскостей, расположенной

между двумя соседними ребрами (рис. 1). Выявлены особенности течения данной жидкости по сравнению с обычной ньютоновской, проявляющиеся в деформации профиля скорости. Дополнительно с помощью несложных преобразований выполнено восстановление профиля скорости в поперечном сечении канала (плоскости r, φ). Предложенные нами формулы перехода из одной плоскости в другую облегчают сравнение с литературными данными.

Библиографический список

1. О.В. Митрофанова. Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах с завихрителями (Аналитический обзор). \ \ ТВТ, 2003. С. 587–633.
2. Е. К. Вачагина, А. И. Кадыйров, И. А. Конахина, Э. М. Хуснутдинов. Особенности гидродинамических полей в каналах с трехзаходной шнековой вставкой. \ \ Известия РАН. Механика жидкости и газа, 2019. С. 1–10
3. А.И. Леонтьев, Ю.А. Кузма-Кичта, С.В. Веретенников, О.А. Евдокимов. Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках. \ \ ТВТ, 2021. С. 74–789.
4. V. Molochnikov, N. Mikheev, A. Paereliy, N. Dushin, O. Dushina. SIV measurements of flow structure in the near wake of a circular cylinder at $Re = 3900$. \ \ Fluid Dyn. Res, 2019. P. 055505.

Ковалева Н.Н., Давыдов А.А., Вятков В.В.

Рыбинский государственный авиационный технологический университет
имени П. А. Соловьева,
г. Рыбинск, 152934, ул. Пушкина, 153

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПЛЕНОЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ОБЛАСТИ ВХОДНОЙ КРОМКИ СОПЛОВОГО АППАРАТА В УСЛОВИЯХ ВХОДНОЙ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА

Лопатки высокотемпературных турбин имеют развитую систему пленочного охлаждения лопаток. Лопатка соплового аппарата первой ступени работает в условиях входной неравномерности потока (неравномерность потока за камерой сгорания), которая оказывает влияние на формирование пелены охладителя в окрестности входной кромки. При этом в области торцевых поверхностей начального участка корытца и спинки на распространение струй охладителя дополнительно влияют вторичные течения.

Исследования особенностей пленочного охлаждения различных участков профиля турбинных лопаток, доступные в открытой печати, проводились в условиях равномерного поля параметров на входе, когда эффективность охлаждения равномерна по высоте лопатки. При наличии неравномерного поля параметров перед сопловым аппаратом изменяются условия истечения из отверстий

в окрестности входной кромки на корытце и спинке и, соответственно, условия формирования охлаждения.

С целью изучения особенностей формирования пленочного охлаждения начальных участков корытца и спинки было проведено исследование соплового аппарата с параметрами, характерными для первой ступени турбины высокого давления ГТД (рис.1).

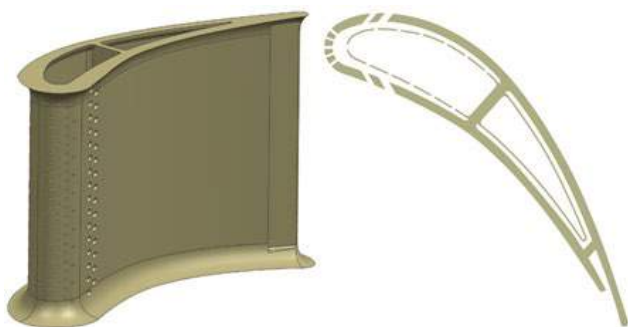


Рис. 1. Геометрическая модель сопловой лопатки с шахматным расположением перфораций

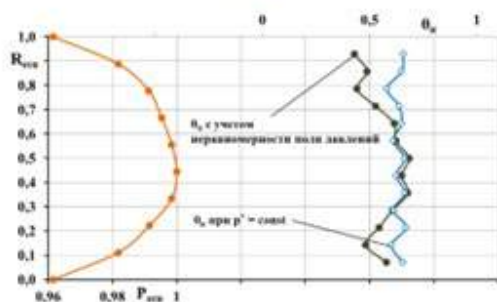
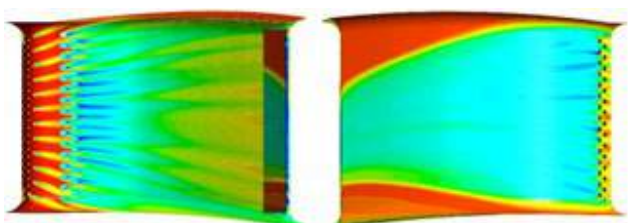


Рис. 2. Изменение распределения пленочного охлаждения на корытце и спинке сопловой лопатки при наличии входной неравномерности потока

Решалась сопряженная задача моделирования течения в сопловом аппарате при различном характере эпюр полного давления и температуры на входе.

По результатам исследования сделаны следующие выводы:

1. Характер распределения эффективности пленочного охлаждения за отверстиями начального участка профиля сопловой лопатки зависит от эпюры полного давления. Температурная неравномерность приводит только к количественным изменениям эффективности охлаждения.

2. При симметричной эпюре давлений на входе в сопловой аппарат происходит смещение оси струи охладителя на начальном участке корытца к торцевым поверхностям (рис. 2), а на спинке - от торцевых поверхностей. В средней части профиля положение струи охладителя не меняется. Изменение траектории струй охладителя соответствует направлению вторичного потока на спинке и корытце. При этом пленочная эффективность охлаждения меняется в соответствии с характером эпюры полного давления.

3. В областях существенного градиента полного давления на входе происходит перераспределение эффективности пленочного охлаждения за отверстиями.

4. Нарушается интерференция пленочного охлаждения при шахматном расположении рядов отверстий. Возникают области перегрева лопатки.

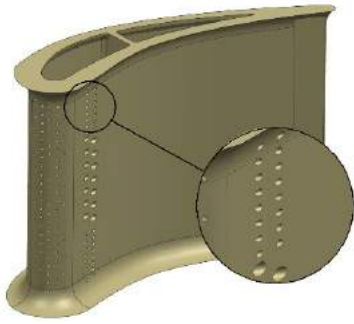


Рис. 3. Геометрическая модель сопловой лопатки с коридорным расположением перфораций

5. При наличии исходной неравномерности потока на выходе из камеры сгорания проектирование системы охлаждения соплового аппарата первой ступени необходимо производить с учетом рассмотренных эффектов.

6. Для исследованной конструкции сопловой лопатки устранить области перегрева возможно при переходе в областях смещения осей струй охладителя от шахматного расположения рядов отверстий к коридорному (рис. 3)

7. Результаты исследований показывают, что отмеченные эффекты необходимо учитывать в методологии проектирования лопаток высокотемпературных турбин ГТД.

Колесниченко И.В., Мамыкин А.Д., Халилов Р.И.

Институт механики сплошных сред УрО РАН,
Пермь, 614018, Академика Королева, 1

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР, СОЗДАННЫХ ВРАЩАЮЩИМИСЯ МАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ С ТРАНЗИТНЫМ ПОТОКОМ

Существует большое количество методик измерения скорости для жидких металлов, применяемых в металлургической и атомной промышленности. Каждая из них имеет преимущества и недостатки [1]. Большое распространение получили кондукционные датчики и расходомеры [2]. Их преимуществом является простота реализации и широкие возможности измерения локальных характеристик пульсаций скорости, а главным недостатком является необходимость калибровки. В случае интенсивных течений среды с высокой электропроводностью эффект сноса наложенного магнитного поля приводит к появлению нелинейной зависимости возникающей разности потенциалов от скорости и расхода, что требует усложнения процедуры калибровки и интерпретации результатов измерений [3]. Поэтому, не менее распространенными являются индукционные способы измерения расхода [4,5]. Нами разрабатывается способ измерения скорости потока жидкого металла в цилиндрическом канале, который не требует калибровки [6]. Он основывается на корреляционной методике, аналогично применяемой в [7], но в нашем случае пульсации скорости фиксируются с помощью регистрации электромагнитного отклика локальных измерителей скорости. Вопрос заключается в том, как эффективно создать эти пульсации скорости и где наиболее рационально расположить измерители скорости. Актуальность исследования обусловлена проблемой совершенствования способов бесконтактного измерения расхода

жидкометаллического теплоносителя на атомных станциях на быстрых нейтронах на основе корреляционных методов [8].

В работе исследуется метод генерации пульсаций скорости, который заключается в использовании электромагнитных сил, созданных в локальной области канала с помощью индукторов вращающегося магнитного поля. Регистрация таких пульсаций осуществляется также с помощью электромагнитной системы, которая реализует метод корреляций. Главным преимуществом методики является возможность управлять интенсивностью и даже формой пульсаций скорости. Описываются результаты исследования эволюции поля скорости, имеющего вихревые структуры на фоне транзитного потока. Показано влияние интенсивности вихревых структур на возможность их регистрации с помощью корреляционной методики. Показаны результаты взаимодействия структур в разных областях канала вдоль по потоку. Полученные характеристики необходимы для выбора параметров методики измерения расхода теплоносителя, которая разработана на основе результатов данного исследования.

Библиографический список

1. Khalilov R., Kolesnichenko I., Mamykin A., Pavlinov A. A combined liquid sodium flow measurement system // *Magnetohydrodynamics*, 2016. V. 52. P. 53-60.
2. Shercliff J. A. *Theory of electromagnetic flow measurement*. Cambridge University Press, 1962. P. 146.
3. Adamovskii L., Golovanov V., Inkin Y., Kozubov E. Calibration of nonlinear magnetic flowmeters in the sodium circuits of fast power reactors // *Atomnaya Energiya*. 1987. V. 62. No. 2. P. 120–122.
4. Циркунов В.А., Жейгур Б.Д., Сермонс Г.Я., Калнинь Р.К. *Бесконтактный контроль потока жидких металлов*. Рига, «Зинатне», 1973, 252 с.
5. Pavlinov A., Khalilov R., Mamykin A., Kolesnichenko I. Electromagnetic flowmeter for wide-temperature range intensive liquid metal flows // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2019. – V. 581. – p. 012011.
6. Колесниченко И.В., Халилов Р.И., Мамыкин А.Д. Корреляционный способ определения расхода жидкого металла и безэлектродный электромагнитный расходомер жидкого металла «ПИР» (Пермский индукционный расходомер) для его осуществления Патент РФ № 2791036. Приоритет от 24.06.2022.
7. Belyaev I., Razuvanov N., Sviridov V., Zagorsky V. Temperature correlation velocimetry technique in liquid metals // *Flow Measurement and Instrumentation*. 2017. V. 55. P. 37–43.
8. Архипов, В. М. *Техника работы с натрием на АЭС*. М. Энергоатомиздат, 1986, 136 с.

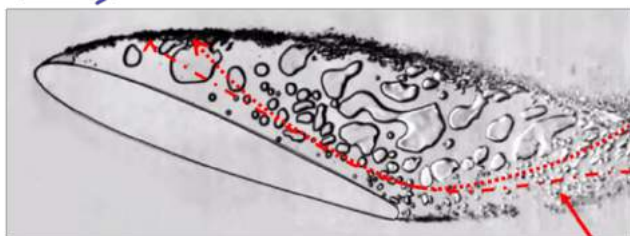
Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Пермского края в рамках научного проекта «Разработка систем измерения расхода жидкого металла в каналах металлургических и ядерных энергетических установок».

РАЗВИТИЕ КАВИТАЦИОННЫХ ТЕЧЕНИЙ В ЩЕЛЕВЫХ ЗАЗОРАХ СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИИ

Кавитация - важнейшее явление, встречающееся в механике жидкости, при работе насосов, движителей, гидротурбин [1,2]. Высоконапорные гидроэлектростанции имеют до тысячи различных уплотнений и щелевых зазоров, высота которых не превышает 5 мм [3]. Даже при обычных применяемых перепадах давления фактического расхода в щелевых зазорах зачастую возникает кавитация. Она вызывает нежелательные и разрушительные воздействия как внутри самого зазора [4,5], так и выходя за его пределы, влияет на весь механизм в целом [6], поэтому изучение закономерностей движения щелевой кавитации и ее влияния на гидродинамику течения является важной для настоящего времени задачей.

Экспериментальные исследования кавитационных течений проводились в щелевом канале, внутри которого располагалось крыло. Канал имеет высоту 1,2 мм, длину 276 мм, ширину 120 мм. Аспектное соотношение сторон составляет 0,01. Хорда помещенного в щелевой канал крыла равна 70 мм, размах 1,2 мм. Перепад давления варьировался в диапазоне от 100 до 150 кПа. В работе использовался метод высокоскоростной визуализации.

направление потока
→



направление движения паро-газовых полостей внутри каверны

Рис. 1. Визуализация движения паро-газовой полости во внутреннюю область суперкаверны

По результатам исследования выявлено образование двух различных режимов существования каверны в щелевом зазоре за крылом: нестационарного и квазистационарного. Показано, что кавитационные облака, отрывающиеся от нестационарной каверны, состоят из конгломерата паро-газовых полостей. Отрыв каверны от передней кромки крыла происходит вместе с распадом ее на несколько отдельных частей, вследствие влияния трения стенок рабочего канала.

Визуализированы волны давления, вызванные схлопыванием парогазовых каверн ниже по потоку. На основе экспериментальных измерений проведена оценка скорости их распространения по перемещению области схлопывания/роста небольших кавитационных пузырей. Скорость распространения волн давления составила 350-370 м/с.

Для определения частотных характеристик схода кавитационных полостей были получены наиболее энергетические моды кавитационного обтекания крыла с помощью алгоритма разложения по динамическим модам. Показано, что каждой из этих мод соответствует определенный период развития нестационарной каверны.

Получены экспериментальные данные по обратному движению парогазовой смеси во внутреннюю область квазистационарной каверны (Рис. 1).

Библиографический список

1. S. Skripkin, Z. Zuo, M. Tsoy, P. Kuibin, S. Liu. Oscillation of Cavitating Vortices in Draft Tubes of a Simplified Model Turbine and a Model Pump–Turbine \\\ Energies, 2022. Т. 15. № 8. С. 2965.
2. M.V. Timoshevskiy, S.A. Churkin, A.Y. Kravtsova, K.S. Pervunin, D.M. Markovich, K. Hanjali'c. Cavitating flow around as caled-down model of guide vane so fa high-pressure turbine \\\ International Journal of Multiphase Flow, 2016. Т. 78. С. 75-87.
3. X.W. Luo. PhD Dissertation (Kitakyushu: Kyushu Institute of Technology) (2004).
4. М.А. Цой, С.Г. Скрипкин, И.В. Наумов, А.Ю. Кравцова. Высокоскоростная визуализация кавитационных полостей, возникающих за крылом НАСА0012 с малым аспектным соотношением \\\ Теплофизика и аэромеханика, 2022. Т. 29
5. S.G. Skripkin, M.A. Tsoy, A.Y. Kravtsova Experimental Study of Cavitating Flow around a NACA 0012 Hydrofoil in a Slit Channel \\\ Scientific Reports, 2022. Т. 12. С. 11182.
6. С.Р. Jawahar, P.A. Michael. A review on turbines for micro hydro power plant \\\ Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017. Т. 72. С. 882– 887.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 19-79-10217

Куйбин П.А.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. ак. Лаврентьева 1

ОТЛИЧИЯ В ОПИСАНИИ ЛЕВОВИНТОВЫХ И ПРАВОВИНТОВЫХ ВИХРЕЙ

Вихревые течения широко распространены и в природе и в технических приложениях. Простейшим объектом вихревой природы является колоннообразный вихрь с прямолинейной осью. При некоторых условиях такой вихрь становится неустойчивым, развивается винтовая мода возмущений и вихрь приобретает винтовую форму. Винтовой вихрь может образовываться также в результате спирального распада вихря или в результате несимметричных условий на входных и/или выходных границах устройства. Как правило, винтовые вихри нестационарны – они движутся под воздействием самоиндукции и в результате взаимодействия с твердыми поверхностями. Этим, в частности, обусловлено явление прецессии вихревого ядра (ПВЯ). Теория винтовых вихрей наиболее полно представлена в работах [1, 2]. Винтовые вихри могут быть двух типов – левовинтовые (характерные примеры – след за вращающимся телом, структура, образующаяся

при спиральном распаде вихря) и правовинтовые (может возникать при неустойчивости закрученной струи). В упомянутых работах [1, 2] теоретические выкладки проведены для правовинтовых вихрей и сказано, что для перехода к левовинтовым вихрям достаточно изменить на отрицательное значение шага винта. При этом выведенные формулы для поля скорости представлены через ряды от модифицированных функций Бесселя, которые не могут иметь отрицательный аргумент. Устранению данного пробела и посвящена настоящая работа.

Запишем поле скорости, индуцированное бесконечно тонкой винтовой вихревой нитью, через интеграл Био-Савара

$$\mathbf{u}(\mathbf{r}) = -\frac{\Gamma}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{(\mathbf{r}-\mathbf{r}')}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|^3} \times \frac{d\mathbf{r}'}{d\alpha} d\alpha. \quad (1)$$

Здесь Γ – интенсивность вихря, \mathbf{u} – вектор скорости, \mathbf{r} – радиус-вектор точки в пространстве, \mathbf{r}' задает винтовую линию, намотанную на цилиндр радиуса \mathbf{a} с шагом $2\pi l$: $\mathbf{r}' = \{\mathbf{a} \cos(\alpha), \mathbf{a} \sin(\alpha), l\alpha\}$. В цилиндрических координатах $\{\mathbf{r}, \theta, \mathbf{z}\}$ для поля скорости получаем

$$\mathbf{u} = \frac{\Gamma}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{A(\alpha)}{[r^2 - 2ar \cos(\theta - \alpha) + a^2 + (z - l\alpha)]^{3/2}} d\alpha, \quad (2)$$

$$A(\alpha) = \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{a}(z - l\alpha) \cos(\theta - \alpha) - \mathbf{a}l \sin(\theta - \alpha) \\ l(\mathbf{r} - \mathbf{a} \cos(\theta - \alpha)) - \mathbf{a}(z - l\alpha) \sin(\theta - \alpha) \\ \mathbf{a}(\mathbf{a} - \mathbf{r} \cos(\theta - \alpha)) \end{array} \right\}$$

Запись (2) соответствует правовинтовому вихрю. Для перехода к левовинтовой структуре заменим в формулах знак перед параметром l . Анализ показывает, что между полями скорости $\mathbf{u}^{(R)}$ и $\mathbf{u}^{(L)}$ имеются следующие связи:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_r^{(L)}(\mathbf{r}, \theta, \mathbf{z}) &= -\mathbf{u}_r^{(R)}(\mathbf{r}, \theta, -\mathbf{z}) \\ \mathbf{u}_\theta^{(L)}(\mathbf{r}, \theta, \mathbf{z}) &= -\mathbf{u}_\theta^{(R)}(\mathbf{r}, \theta, -\mathbf{z}) \\ \mathbf{u}_z^{(L)}(\mathbf{r}, \theta, \mathbf{z}) &= \mathbf{u}_z^{(R)}(\mathbf{r}, \theta, -\mathbf{z}) \end{aligned} \quad (3)$$

Другой вопрос связан с определением частоты прецессии левовинтовых вихрей. Дело в том, что явление ПВЯ характерно именно для вихрей левовинтовой формы. Найдем бинормальную компоненту самоиндуцированной скорости. Для левовинтового вихря она выражается через окружную и осевую компоненты соотношением

$$\mathbf{u}_b^{(s)} = -\frac{\mathbf{a}u_z^{(s)} + l\mathbf{u}_\theta^{(s)}}{\sqrt{\mathbf{a}^2 + l^2}}. \quad (4)$$

Запишем также формулу винтовой симметрии

$$\mathbf{u}_z = \mathbf{u}_0 + \frac{r}{l} \mathbf{u}_\theta, \quad (5)$$

где \mathbf{u}_0 – значение осевой скорости при $\mathbf{r} = \mathbf{0}$. Соотношение (5) справедливо и для компонент самоиндуцированной скорости. В результате можно выразить бинормальную компоненту через окружную

$$\mathbf{u}_b^{(s)} = -\frac{\mathbf{a}}{\sqrt{\mathbf{a}^2 + l^2}} \mathbf{u}_0 - \frac{\sqrt{\mathbf{a}^2 + l^2}}{l} \mathbf{u}_\theta^{(s)}. \quad (6)$$

Наконец, отметим, что частота прецессии связана не только с вращательной компонентой скорости, но и с движением следа вихря в фиксированной горизонтальной плоскости, обусловленным движением вихря в осевом направлении. Для левовинтового вихря находим:

$$f^{(s)} = \frac{1}{2\pi a} \left(\mathbf{u}_\theta^{(s)} + \frac{a}{l} \mathbf{u}_z^{(s)} \right) = \frac{-1}{2\pi a} \frac{\sqrt{a^2 + l^2}}{l} \mathbf{u}_b^{(s)}. \quad (7)$$

Несмотря на отличия, формула, связывающая частоту прецессии с бинормальной скоростью самоиндуцированного движения, оказалась такой же, как и для правовинтового вихря.

Библиографический список

1. Alekseenko S.V., Kuibin P.A., Okulov V.L., Shtork S.I. Helical Vortices in Swirl Flow \ J. Fluid Mech, 1999, Vol. 382. P. 195-243.
2. Алексеенко С.В., Куйбин П.А., Окулов В.Л. Введение в теорию концентрированных вихрей. Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2003. 504 с.

**Легчанов М.А., Солнцев Д.Н., Пронин А.Н., Рязанов А.В., Курицин Д.Д.,
Малыгин Д.С., Суглицкая Л.М.**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
г. Нижний Новгород, 603155, ул. Минина, 24

ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛООБМЕНА В КАНАЛАХ С ЛЕНТОЧНЫМИ ЗАВИХРИТЕЛЯМИ В УСЛОВИЯХ ОБРАЗОВАНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

Для повышения эффективности работы энергетического оборудования используют различные методы интенсификации теплообмена. Это позволяет обеспечить повышение тепловой мощности без увеличения массогабаритных характеристик [1-2]. В Российской Федерации эксплуатируется большое количество объектов энергетики, которые используют в качестве теплоносителя воду из открытых водоемов – рек, прудов-охладителей и т.д. При эксплуатации этих объектов на теплообменных поверхностях образуются минеральные отложения, что приводит к снижению тепловой мощности, выводу из строя оборудования и внеплановым ремонтам. В настоящее время остается открытым вопрос эффективности использования ленточных интенсификаторов в условиях образования отложений.

Для изучения теплообмена в оборудовании в условиях образования минеральных отложений в НИЛ ТГ ЯЭУ НГТУ им. Р.Е. Алексеева разработан и создан экспериментальный стенд, который представляет собой замкнутый циркуляционный контур. Исследовательский участок включает в себя цилиндрические обогреваемые каналы, в один из которых установлен ленточный завихритель [3].

В результате проведенных исследований было определено, что установка ленточного завихрителя приводит к росту перепада давления на экспериментальном участке на 10,5%, при этом средние значения расходов по моделям отличаются на величину не более 3%. В начале эксплуатации применение ленточного завихрителя позволило повысить коэффициент теплоотдачи в экспериментальной модели на 9,7%. По мере проведения эксперимента происходило увеличение разницы между значениями коэффициента теплоотдачи, и по истечению 225 часов значение составляло 19,8%. (рис. 1).

При визуальном осмотре экспериментальных моделей после завершения эксплуатации было установлено, что количество отложений в трубе с ленточным завихрителем меньше, чем в модели без завихрителя (рис. 2). На экспериментальной модели без завихрителя происходит образование локальных наростов минеральных отложений, которые при дальнейшей работе соединяются между собой и образуют единый слой минеральных отложений.

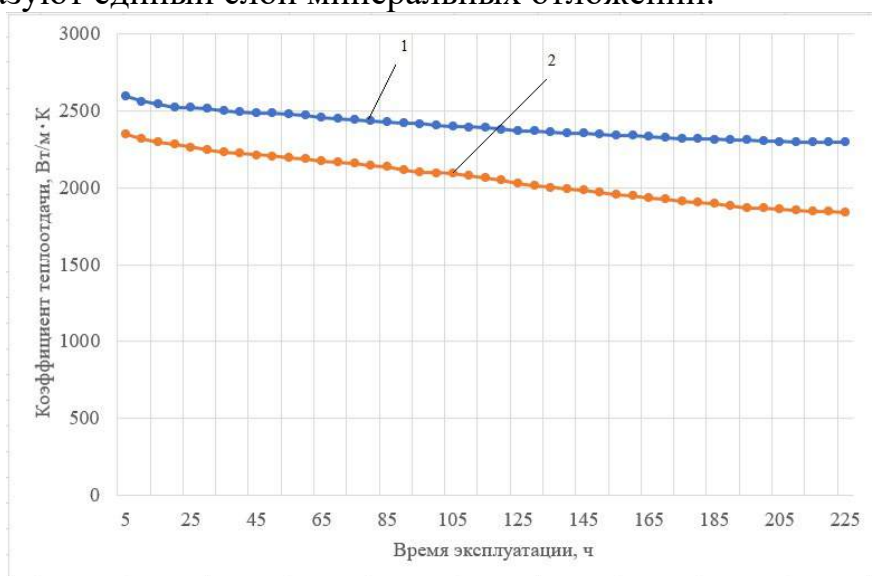


Рис. 1. Зависимость коэффициента теплоотдачи в экспериментальной модели от времени эксплуатации:

- 1 – экспериментальный участок с ленточным завихрителем,
- 2 – экспериментальный участок без ленточного завихрителя



Рис. 2. Загрязнения в трубном пространстве экспериментальных моделей:
 а – без ленточного завихрителя;
 б – с ленточным завихрителем

Библиографический список

1. Будов В.М. Дмитриев С.М. Форсированные теплообменники ЯЭУ. - Вып. 40 - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 176 с.
2. Промышленное применение интенсификации теплообмена – загрязненное состояние проблемы (обзор) / Попов И.А., Гортышов Ю.Ф., Олимпиаев В.В. // Теплоэнергетика. - 2012. - №1. - С. 3-14.
3. Экспериментальные исследования характеристик теплообмена в энергетическом оборудовании с интенсификаторами в условиях образования минеральных отложений / А. В. Рязанов, М. А. Григорьев, Д. Д. Курицин [и др.]. // Научно-технический вестник Поволжья. — 2022. — № 12. — С. 256-25

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема №FSWE-2021-0008).

Лепешкин А.Р.

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

Москва, 125993, Волоколамское шоссе, д. 4

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,

Москва, 111250, Красноказарменная, 14

МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО НАГРЕВА ВРАЩАЮЩИХСЯ РАБОЧИХ КОЛЕС ТУРБИН АВИАДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ СТЕНДОВЫХ ЦИКЛИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ

Моделирование циклического термонапряженного состояния при испытаниях на реальном авиадвигателе связано с большими материальными затратами. В связи с этим, стендовые циклические испытания дисков авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) на разгонном стенде более целесообразны при условии, что тепловое и термонапряженное состояние дисков при стендовых испытаниях будет соответствовать эксплуатационным условиям [1, 2]. Согласование этих условий обуславливает необходимость решения следующих задач: моделирование параметров аэродинамического нагрева [1], распределений температур в дисках, термических и механических напряжений, возникающих в деталях рабочего колеса ГТД, согласование временных программ по частоте вращения рабочего колеса и моделирования аэродинамических режимов нагрева при моделировании заданного распределения температуры по радиусу диска.

С учетом вращения рабочих колес авиационных ГТД в испытательных камерах разгонных стендов, в которых давление воздушной среды может составлять меньше атмосферного, появляются значительные аэродинамические потери при трении лопаток о воздух. Аэродинамические потери увеличивают мощность электропривода, необходимую для раскрутки рабочего колеса, а при трении лопаток о воздух повышается температура воздушной среды в камере стенда. При

повышении температуры воздуха в камере стенда до температуры обода диска плотность воздуха и, следовательно, мощность трения о воздух уменьшаются и в результате снижается мощность электропривода для раскрутки рабочего колеса ГТД. Диск рабочего колеса нагревается за счет теплопередачи от нагретого воздуха.

Разработанная методика моделирования аэродинамического нагрева вращающихся дисков рабочих колес ГТД при стендовых циклических испытаниях использовалась в данной работе. Для уменьшения сроков проведения испытаний два одинаковых рабочих колеса турбины ГТД были собраны на одном валу в один ротор внутри разгонной камеры. Измерения температур осуществлялись от термопар ХА, установленных на поверхностях дисков рабочих колес ГТД. Сигналы от термопар передавались через ртутное токосъемное устройство на измерительные системы. Экспериментальные и расчетные исследования аэродинамического нагрева показали, что время выдержки на максимальной частоте вращения и общее время цикла влияют на получение заданного распределения температуры диска. В результате отладки с применением математического моделирования аэродинамического нагрева были получены экспериментальные и расчетные данные распределений температур диска, термомеханические параметры испытательного цикла и стабильная повторяемость теплового состояния в разгонной камере стенда от цикла к циклу в условиях изотермического нагружения. При этом происходило циклическое изменение температуры воздуха в лопаточной области рабочего колеса. Проведен анализ влияния длины лопаток и других параметров на величину мощности трения рабочего колеса о воздух и время его разгона до максимальной частоты вращения. В результате этого анализа показано, что наибольшее влияние длины лопаток на время разгона рабочего колеса в условиях аэродинамического нагрева наблюдается при соотношении мощности трения к приведенной мощности электропривода более 30 %.

Анализ сравнения расчетных и температурных полей дисков показал удовлетворительное совпадение результатов. Результаты расчетных и экспериментальных исследований были использованы при циклических испытаниях дисков рабочих колес турбин авиационных ГТД на разгонных стендах с использованием аэродинамического нагрева.

Библиографический список

1. А.Р. Лепешкин Применение аэродинамического нагрева для моделирования теплового состояния вращающихся дисков турбин // Тезисы докладов IV Международной конференции “Тепломассобмен и гидродинамика в закрученных потоках“. 17-19 октября 2011 г. – М.: Издательский дом МЭИ, 2011. С. 145.
2. А.Б. Кувалдин, А.Р. Лепешкин. Скоростные режимы индукционного нагрева и термонапряжения в изделиях. Монография. - М.: Изд-во Инфра-М. серия: Научная мысль. 2019. 282 с.

Лепешкин А.Р.

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

Москва, 125993, Волоколамское шоссе, д. 4

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,

Москва, 111250, Красноказарменная, 14

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ВРАЩАЮЩИХСЯ ДЕТАЛЕЙ В ПОЛЕ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ УСКОРЕНИЙ И СИЛ

Исследование теплопроводности металлических материалов вращающихся деталей в поле действия центробежных ускорений и сил имеет важное значение для авиационной техники [1-3]. В оценке теплового состояния вращающихся деталей (лопаток) турбин используются характеристики теплопроводности, которые были получены в стационарных условиях земного тяготения на ненагруженных металлических образцах. В реальных условиях рабочие лопатки и диски турбин нагружены растягивающими центробежными силами и работают при ускорениях до нескольких десятков тысяч g и изменение теплопроводности металлических материалов в этих условиях можно ожидать значимым. Влияние сжимающих сил на теплопроводность металлических сплавов ранее исследовалось, например, в [4]. Исследования влияния растягивающих сил на теплопроводность металлических материалов ранее не проводились. В [5, 6] приводятся сведения об электронно-инерционном эффекте, которое опытным путем было установлено. В указанных опытах подтверждается, что ускорения оказывают влияние на перемещение свободных электронов в металле, в частности, при торможении. Необходимо отметить, что любые виды ускорений: линейные, центробежные и виброускорения влияют на теплопроводность металлических материалов [1-3], т.е. на перенос тепла свободными электронами в металле. Ранее проводились исследования влияния центробежных ускорений на температуропроводность металлических теплоизолированных проволок в радиальном направлении [1]. В данной работе предложена методика определения теплопроводности металлов в радиальном и окружном направлениях в поле действия центробежных ускорений и сил на разгонной установке с испытательной вакуумной камерой. В отверстии полотна диска (из нержавеющей стали) был установлен мини-электронагреватель и термопары на одинаковом расстоянии от отверстия. Из анализа результатов экспериментальных исследований следует, что скорости нагрева материала диска на частотах вращения 3000 и 6000 об/мин возрастают в 2 и 3 раза соответственно по сравнению со стационарным состоянием без вращения. Причем, в радиальном направлении скорость нагрева возрастает больше, чем в окружном направлении. Полученные экспериментальные данные подтверждают гипотезу автора об эффекте закрученного движения (потока) свободных электронов в данном случае. В исследуемом явлении теплопроводности присутствуют две составляющие: от действия центробежного ускорения и растягивающей центробежной силы. На основе полученных экспериментальных данных о

влиянии растяжения вторая составляющая мала и составляет несколько процентов. Таким образом, указанный рост теплопроводности существенно связан с увеличением электронной проводимости в металле при воздействии центробежных ускорений. Полученные результаты имеют важное практическое значение для оценки теплового состояния высокотемпературных деталей (лопаток, покрытий и др.), работающих в поле центробежных ускорений и сил в авиадвигателестроении, энергетике и других отраслях машиностроения.

Библиографический список

1. A.R. Lepeshkin. Technique of studying thermal diffusivity of metallics in different directions in a field of centrifugal accelerations and forces // Journal of engineering thermophysics. 2017. v. 26. № 1. p. 10-16.
2. А.Р. Лепешкин. Исследование температуропроводности металлов с учетом инерции электронов в поле центробежных ускорений // Сборник трудов конференции “Актуальные проблемы физики“. 11-15 ноября. М.: ФИАН. 2012. – С. 65-66.
3. А.Р. Лепешкин. Способ и установка для определения теплофизических характеристик твердых материалов в поле действия центробежных сил / Патент 2235982 Р.Ф., опубл. 20.04.2011, Бюл. № 11.
4. С.Н. Эмиров, Н.М. Булаева, Э.Н. Рамазанова Влияние давления и температуры на теплопроводность моно- и поликристаллических образцов антимолида галлия // Труды XII Российской конференции по теплофизическим свойствам веществ. М.: 2008. – С. 306.
5. В.Л. Гинзбург, Ш.М. Коган. Об электронно-инерционных опытах // ЖЭТФ, 1972. – Т. 61, вып. 3(9). – С. 1177-1180.
6. R. Tolman, T. Stewart The electromotive force produced by the acceleration of metals // Phys. Rev. 1916. -Vol. 8, No. 2. - P. 97-116.

Лепешкин А.Р.

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

Москва, 125993, Волоколамское шоссе, д. 4

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,

Москва, 111250, Красноказарменная, 14

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НИЗКОЧАСТОТНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Исследование теплопроводности металлических материалов в поле действия низкочастотных механических колебаний является новой и сложной проблемой, решение которой имеет актуальное значение для авиационной техники, энергетике и других отраслей промышленности. Лопатки турбин авиадвигателей работают при значительных механических колебаниях (виброускорениях) и изменение теплопроводности металлических материалов в этих условиях можно ожидать значимым. Кроме низкочастотных механических колебаний на детали турбин действуют центробежные ускорения и растягивающая центробежная

сила. Необходимо отметить, что любые виды ускорений: линейные, центробежные и виброускорения влияют на теплопроводность металлических материалов [1-3]. Ранее проводились исследования влияния центробежных ускорений и сил на теплопроводности металлов приведены в [4, 5]. В [6, 7] приводятся сведения по электронному явлению в металлах, которое было установлено опытным путем. В данных опытах подтверждается, что ускорения оказывают влияние на перемещение свободных электронов в металлах, в частности, при торможении [6, 7].

В данной работе приведена методика определения теплопроводности разных металлических материалов в поле действия низкочастотных механических колебаний с учетом гипотезы автора о поступательно-вихревом движении свободных электронов в металле. Разработано устройство для определения указанных характеристик на виброустановке. Методика исследований предусматривала закрепление на конце балки образцов из тонких хромелевого и медного проводов и небольшого электронагревателя. На концах образцов и перед электронагревателем приваривались термопары. Образцы и электронагреватель были теплоизолированы от балки, установленной на виброустановке. Приведены результаты исследований нестационарного нагрева образцов в поле действия низкочастотных механических колебаний при разных амплитудах (размахах) колебаний 2A (0, 0.35 и 0.7 см) на частоте 120 Гц на виброустановке. По полученным результатам представлены оценки теплопроводности образцов. Из анализа результатов экспериментальных исследований нестационарного теплового состояния и скоростей нагрева образцов следует, что теплопроводность хромелевого теплопроводника (образца) при виброускорении 120 g возрастает на 50 % по сравнению со статическим состоянием и для медного - на 30 %, при этом время передачи тепла от начала образца к его концу уменьшается также на десятки процентов. Данный рост теплопроводности связан с увеличением электронной проводимости в металле за счет перемещения теплоносителей (имеющих массу) - свободных электронов при воздействии низкочастотных механических колебаний. Полученные результаты имеют важное практическое значение для оценки теплового состояния деталей авиационных двигателей и других энергетических турбомашин, работающих при значительных низкочастотных механических колебаний и других эксплуатационных нагрузках.

Библиографический список

1. A.R. Lepeshkin. Technique of studying thermal diffusivity of metallics in different directions in a field of centrifugal accelerations and forces // Journal of engineering thermophysics. 2017. v. 26. № 1. p. 10-16.
2. А.Р. Лепешкин Исследование температуропроводности металлов при виброускорениях // Сб. тр. V Всероссийской конференции по фундаментальным и инновационным вопросам современной физики. М.: ФИАН. 2013. С. 98.
3. А.Р. Лепешкин. Тепло, еще теплее... Эпоха открытий еще не закрыта. ФИАН. 2014. С. 1-4.

4. А.Р. Лепешкин. Способ и установка для определения теплофизических характеристик твердых материалов в поле действия центробежных сил / Патент 2235982 РФ, опубл. 20.04.2011, Бюл. № 11.

5. А.Р. Лепешкин. Температуропроводность материалов в поле действия центробежных ускорений и сил // Труды пятой Российской национальной конференции по теплообмену. В 8 томах (25-29 октября 2010 г., Москва). Т. 1. Общие проблемные доклады. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010.

6. В.Л. Гинзбург, Ш.М. Коган. Об электронно-инерционных опытах // ЖЭТФ, 1972. – Т. 61, вып. 3(9). – С. 1177-1180.

7. R. Tolman, T. Stewart The electromotive force produced by the acceleration of metals // Phys. Rev. 1916. -Vol. 8, No. 2. - P. 97-116.

Мацин Н.В., Рязанов Р.Р., Соборнов А.Е., Дмитриев С.М., Котин А.В.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
Нижний Новгород, 603155, Минина, 24

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПУЛЬСАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СМЕШЕНИИ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОТОКОВ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Высокая интенсивность турбулентности потока теплоносителя, характерная для энергетических установок, инициирует возникновение крупномасштабных энергонесущих вихревых структур, параметры которых изменяются случайным образом в пространстве и времени. Особый интерес для всестороннего исследования представляют процессы смешения потоков теплоносителя, имеющих различную температуру. Наличие при этом пульсаций скорости ведет к возникновению пульсаций температуры и, следовательно, температурных напряжений, что может приводить к преждевременному исчерпанию ресурса элементов конструкций теплообменного оборудования в результате усталостного разрушения [1]. В связи с этим важными этапами при исследовании процесса неизотермического смешения потоков являются:

- 1) определение статистических и спектрально-корреляционных характеристик термопульсаций расчетно-экспериментальным путем;
- 2) расчетное определение характеристик пульсаций скорости и их взаимосвязь с термопульсациями, которое имеет место при высокой степени качественного и количественного совпадения результатов первого этапа.

В НГТУ им. Р.Е. Алексеева проводится исследование влияния термоциклических нагрузок на ресурсные характеристики конструкционных материалов оборудования ядерных энергетических установок [2, 3], неотъемлемой частью которого является определение температурного поля теплоносителя в области смешения потоков. Экспериментальный стенд представляет собой имитацию водо-водяной реакторной установки. Диапазоны режимных параметров исследования: давление теплоносителя 9,5-10,5 МПа; температура «горячего» потока

(T_h) 250 – 285°C; температура «холодного» потока (T_c) 35 – 60°C; число Рейнольдса (Re_h) для «горячего» потока $3,9 \cdot 10^4 – 5,4 \cdot 10^4$; число Рейнольдса (Re_c) для «холодного» потока $9,8 \cdot 10^2 – 2,2 \cdot 10^3$. Экспериментальный участок - тройниковое соединение, состоящее из экспериментальной модели (фрагмент круглой трубы 60×5 мм), периферийной трубы (расположена под углом 18° по отношению к экспериментальной модели), диффузора и разъемных соединений. Измерение температурного поля теплоносителя осуществляется десятью микротермопреобразователями. Организация процесса смешения производится путем впрыска холодного потока теплоносителя из периферийной трубы в поток горячего теплоносителя.

Расчетное определение характеристик пульсаций температуры и скорости осуществлялось на однородной блочно-структурированной расчетной сетке, содержащей ~ 15 млн сеточных элементов. Поскольку в области смешения возникает интенсивная закрутка потока в поперечном направлении, перенос кинетической энергии турбулентности осуществляется преимущественно крупномасштабными вихрями, поэтому целесообразным является применение метода моделирования крупных вихрей (Large Eddy Simulation, LES) при решении уравнений Навье-Стокса вследствие того, что он позволяет точно разрешить (с учетом пульсаций) наиболее крупные вихревые структуры. В качестве подсеточной модели выбрана локальная модель вихревой вязкости, адаптированная для пристеночных течений (Wall-Adapting Local Eddy-Viscosity, WALE). Она наименее требовательна к размеру пристеночной ячейки, обеспечивает затухание подсеточной вязкости в пристеночной области и корректно определяет турбулентную вязкость в расчетной области в целом. По результатам многих практических расчетов показано, что для расчета гидродинамической неустойчивости, вызванной вихреобразованием, метод LES с пристеночной функцией WALE является наиболее близким к прямому численному моделированию (Direct Numerical Simulation, DNS) [4]. Константа подсеточной модели принималась по умолчанию $C_w=0,325$. Шаг по времени выбирался согласно критерию устойчивости численного решения Куранта - Фридрихса - Леви ($CFL \leq 1$) и составил 0,002 с. В качестве граничных условий на входах «горячего» и «холодного» потоков устанавливался предварительно просчитанный профиль скорости, соответствующий стабилизированному течению.

Обработка полученных данных показала, что расчетные реализации пульсаций температуры имеют схожий вид с экспериментально полученными реализациями. Статистические и спектрально-корреляционные характеристики термопульсаций показали количественное и качественное сходство результатов трехмерного численного моделирования и экспериментального исследования. Расчетный энергетический спектр термопульсаций имеет характерные пики в области частот от 0,15 до 0,5 Гц. Относительное отклонение расчетного осредненного по времени профиля температуры не превышает 8 % от экспериментального. Анализ взаимной корреляции пульсаций полей скорости и температуры теплоносителя свидетельствует о наличии между ними статистической взаимосвязи.

Библиографический список

1. Судаков А.В., Трофимов А.С. Пульсации температур и долговечность элементов энергооборудования. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 176 с.
2. Экспериментальные исследования температурных пульсаций при смешении неизотермических потоков теплоносителя в элементах оборудования ЯРУ / С. М. Дмитриев, А. В. Мамаев, Р. Р. Рязанов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2019. – № 2. – С. 117-127.
3. Измерение температурного и напряженно-деформированного состояний трубного образца при воздействии локальных стохастических температурных пульсаций / С. М. Дмитриев, Р. Р. Рязанов, А. В. Мамаев [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2019. – Т. 10, № 1. – С. 53-60.
4. Снегирёв А.Ю. Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений // Учебное пособие. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. - 143 с.

Митрофанова О.В.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
115409, Москва, Каширское ш., 31

О ВОЗМОЖНОСТИ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА ВТОРОГО РОДА В ТЕКУЧИХ СРЕДАХ НА ПРИМЕРЕ ВИХРЕВОЙ СТРУКТУРИЗАЦИИ ЗАКРУЧЕННЫХ ТЕЧЕНИЙ

Вопрос об аналогии между фазовым переходом второго рода и возникновением неустойчивости в текучих средах рассматривался ранее академиком И.И. Новиковым в рамках развития теории кризиса термодинамической устойчивости макроскопических систем [1,2]. В основу данного термодинамического подхода положены учение Дж.В. Гиббса о критических явлениях [3] и теория фазовых переходов второго рода Л.Д. Ландау [4], опирающаяся на теорию среднего поля. Современные представления о фазовых переходах второго рода основаны на введенном Л.Д. Ландау представлении о параметре порядка, характеризующие изменение симметрии внутренней структуры среды. Параметр порядка равен нулю в среде с полной внутренней симметрией и спонтанно возникает при понижении симметрии.

Согласно молекулярной теории жидкости, интенсивности упорядочивающих межмолекулярных взаимодействий и разупорядочивающего теплового движения молекул в жидкостях имеют сравнимые значения, поэтому жидкостям присущ ближний порядок, т.е. упорядоченность на масштабах, сравнимых с межатомными расстояниями, в течение временных промежутков $\sim 10^{-11}$ - 10^{-12} сек между скачками молекул. Этому соответствует полная внутренняя симметрия среды.

В настоящей работе показано, что наличие внешней массовой силы (например, силы инерции, силы тяжести или электромагнитной силы), сохраняющей

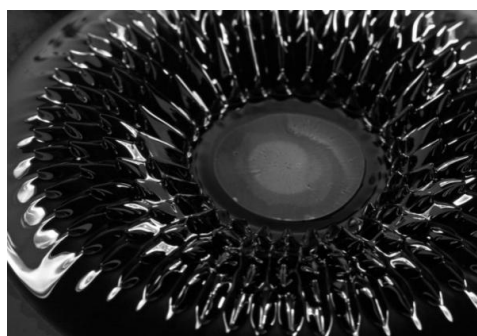
своё направление более длительное время, чем интервалы между скачками, приводит к упорядоченному перемещению молекул и изменению структуры среды с образованием несимметричной фазы с отличным от нуля параметром порядка. Форма, интенсивность и масштаб возникающих при этом организованных вихревых структур свидетельствуют о проявлении дальнего порядка во взаимодействии между частицами жидкости. Примеры устойчивых вихревых структур, возникающих в текучих средах, представлены на рис. 1.

В качестве параметра порядка для описания вихревой структуризации закрученного движения вязких и невязких, нейтральных и электропроводных жидкостей вводится параметр спиральности $H = \dot{u} \cdot \dot{\omega} \neq 0$, где \dot{u} - локальная скорость потока, $\dot{\omega} = rot \dot{u}$ - вектор вихря скорости в данной точке потока. Как было показано в работе [5], образование устойчивой структуры закрученного потока соответствует фазовому переходу второго рода, при котором выполняется условие $(\partial P / \partial V)_T = 0$ и термодинамическая система непрерывным образом проходит через состояние нулевой устойчивости.

Согласно [1], условием термодинамического равновесия гидромеханической системы является минимум термодинамического потенциала – энергии Гиббса Φ при постоянных давлении P и температуре T . Таким образом, о повышении устойчивости структурированной жидкости говорит тот факт, что при появлении детерминированной вихревой структуры потока, возникающей в движущейся текучей среде под действием массовых сил, симметрия однородной среды нарушается, и величина потенциала Гиббса уменьшается, а внутренняя энергия растет. Это коррелирует с отличительными признаками фазовых переходов второго рода, сопровождаемых скачками вторых производных от энергии Гиббса: теплоемкости, коэффициента объемного расширения и коэффициента изотермической сжимаемости.



а)



б)

Рис. 1. Структуризация текучих сред в полях массовых сил: а) – визуализация спирально-вихревой структуры импактного закрученного потока воздуха; б) – структуризация ферромагнитной жидкости в магнитном поле

Рассматривая спиральность как плотность действия центробежных сил при винтовом характере течения, можно оценить энергетический баланс в переходных процессах, соответствующих как структуризации течения с образованием

устойчивой вихревой структуры потока, так и процессу диссипации с распадом вихреобразований.

Библиографический список

1. Новиков И.И. Термодинамика спинодалей и фазовых переходов. - М.: Наука, 2000. - 165 с.
2. Новиков И.И. Термодинамика. - М.: Машиностроение, 1984. - 592 с.
3. Гиббс Дж.В. Термодинамика. Статистическая механика: Пер. с англ.- М.: Наука, 1984. - 584 с.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. 5. Статистическая физика. Ч.1.- М.: Наука, 1976. - 583 с.
5. Митрофанова О.В. О структурном подобии устойчивых форм спирально-вихревого движения // Инженерно-физический журнал. 2017. Т. 90. № 5. С. 1179-1192.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 23-29-00373

**Михайлов Е.А., Тепляков И.О., Степанова А.П., Хасаева Т.Т.,
Азнагулов М.И.**

Физический институт имени П.Н.Лебедева РАН,
Москва, 119991, пр. Ленинский, 53
Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
Москва, 119991, Ленинские горы, 1
Объединенный институт высоких температур РАН,
Москва, 125412, ул. Ижорская, 13 с.2

МАРКЕРЫ ДВИЖЕНИЯ СРЕДЫ ПРИ ЭЛЕКТРОВИХРЕВОМ ТЕЧЕНИИ В ПОЛУСФЕРЕ ПРИ НАЛИЧИИ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Электровихревые течения (ЭВТ) возникают в проводящей среде при взаимодействии тока неравномерной плотности с собственным магнитным полем [1]. Исследование ЭВТ представляет интерес как с точки зрения фундаментальной науки, так и для различных приложений – например, электросварки и электрошлакового переплава металлов. Особый интерес представляет течение жидкого металла в полусферическом сосуде, в котором происходит растекание тока от центрального электрода (малого) к стенке (большому электроду) [2]. Схема задачи изображена на рисунке 1.

Кроме того, для практических приложений важно исследование влияния внешнего вертикального магнитного поля, которое дополняет полоидальное течение среды азимутальным вращением. Данная задача исследовалась нами аналитически, численно, а также экспериментально. Для экспериментального исследования закрутки течения можно использовать визуализацию при помощи маркеров. На поверхность наливается тонкий слой кислоты, в кислоте образуются

пузырьки водорода, которые могут служить маркерами для течения. При этом вопрос о соответствии скорости жидкости и скорости маркера остается открытым - предполагается, что пузырек может отставать от окружающей жидкости [3].

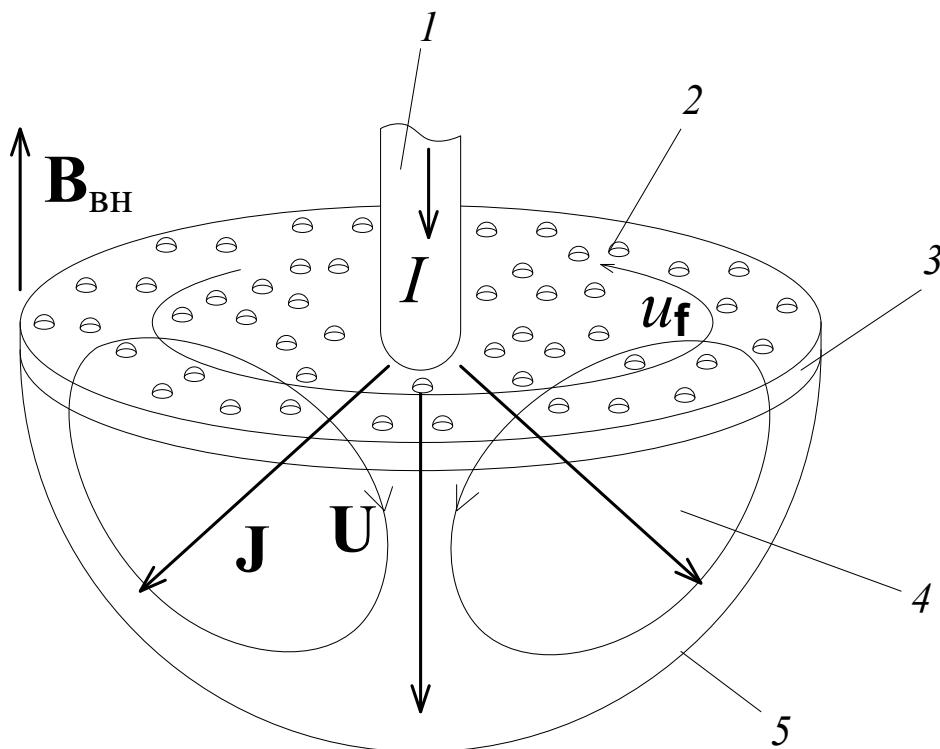


Рис. 1. Схема задачи об электровихревом течении в полусфере: 1 - малый электрод, 2 - пузырьки водорода, 3 - кислота, 4 - жидкий металл, 5 - контейнер (большой электрод).

Для построения траектории движения маркера решалась следующую модельная задача:

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = -\varepsilon \left(\frac{dr}{dt} - u_r(r, \varphi) \right);$$

$$\frac{d^2 \varphi}{dt^2} = -\frac{2}{r} \frac{d\varphi}{dt} \frac{dr}{dt} - \varepsilon \left(r \frac{d\varphi}{dt} - u_\varphi(r, \varphi) \right);$$

где $u_r(r, \varphi)$ и $u_\varphi(r, \varphi)$ - радиальная и азимутальная скорости, вычисленные в рамках теоретической модели [4], ε - параметр, связанный со свойствами кислоты и размерами пузырька.

Нами были исследованы траектории движения пузырьков, полученные в ходе численного решения уравнений, они также сравнивались с результатами эксперимента. Показано, что с достаточной точностью, результаты численной модели подтверждаются измерениями.

Библиографический список

1. В.В. Бояревич, Я.Ж. Фрейберг, Е.И. Шилова, Э.В. Щербинин. Электровихревые течения. \ \ Рига: Зинатне, 1985.

2. В. Г. Жилин, Ю. П. Ивочкин, И. О. Тепляков. К вопросу о закрутке осесимметричных электровихревых течений // Теплофизика высоких температур. 2011. 957.

3. А.А. Будников, Ю. Д. Чашечкин Перенос маркеров в установившемся составном вихре // Вестник Московского университета. Сер. 3: Физ. Астрон. 2014. № 3, 63-66.

4. К.Ю. Малышев, Е.А. Михайлов, И.О. Тепляков. Быстросходящийся ряд для решения задачи об электровихревом течении в полусферическом сосуде // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2022. Т. 62. № 7. С. 1187-1199.

**Молочников В.М., Калинин Е.И., Мазо А.Б.,
Пашкова Н.Д., Паерелий А.А.**

Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр РАН», Казань, 420111, Лобачевского 2/31
Казанский (Приволжский) Федеральный университет, Казань, 420008, Кремлевская, 18

ГЕМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ОБЛАСТИ СОЕДИНЕНИЯ ШУНТА И БЕДРЕННОЙ АРТЕРИИ: ЭКСПЕРИМЕНТ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Одним из наиболее распространенных заболеваний сердечно-сосудистой системы человека является атеросклероз. Часто в качестве единственного метода его лечения используется шунтирование – создание кровотока в обход пораженного участка артерии. Однако в значительном количестве случаев происходит разрастание внутренней поверхности трансплантата и сосуда-хозяина (гиперплазия интимы) в области их соединения, что приводит к необходимости повторного хирургического вмешательства. Общеизвестно, что на эти процессы существенное влияние оказывает локальная гемодинамика: низкое поверхностное трение и его значительные градиенты по пространству и времени [1, 2]. Бедренно-подколенное шунтирование – один из наиболее распространенных видов сосудистой хирургии. Особенностью расхода крови от времени в бедренной артерии является высокая амплитуда пульсаций и наличие протяженной области возвратного течения (реверса расхода) на части периода сердечных сокращений.

Настоящая работа включает результаты экспериментального (метод SIV измерения мгновенных векторных полей скорости) и численного (DNS) изучения структуры отрывного течения и перехода к турбулентности в области соединения шунта с бедренной артерией на стационарном и пульсирующем режимах течения. Угол между шунтом и артерией составлял 60 градусов, доля расхода через неповрежденный участок артерии – 80%. Режимы течения и вязкость рабочей жидкости (водный раствор глицерина) выбирались из условия подобия течения в установке и гемодинамики бедренной артерии по числу Рейнольдса, а

для пульсирующего потока – и по закону изменения расхода за период сердечных сокращений [3], безразмерной частоте (числу Струхалья) и относительной амплитуде пульсаций. В результате проведенных исследований установлены основные закономерности формирования отрывных областей в шунте и артерии. Показано, что в стационарном потоке отрывные области формируются только в обоих ответвлениях артерии, причем при $Re = 240$ (среднее за период пульсаций) течение в этих областях стационарное ламинарное, а при $Re = 1640$ обнаружены признаки турбулизации потока в слое смешения на границе отрывных областей. В пульсирующем потоке отрывная область формируется как в шунте, так и в подводящем канале в фазах изменения расхода, соответствующих ускорению потока как в прямом, так и в обратном направлении. Наблюдаемый при этом существенный рост пульсаций скорости потока локализован по пространству и по времени и обусловлен низкочастотными колебаниями формы области отрыва потока (нарушение повторяемости формы осциллограммы пульсаций скорости от периода к периоду) и формированием на ее внешней границе так называемых разгонных вихрей. Последнее сопровождается появлением высокочастотных пульсаций скорости в соответствующих фазах колебаний расхода. В этих фазах наблюдаются признаки локальной турбулизации потока. По результатам DNS установлено, что в пределах областей отрыва потока развиваются поперечные течения, которое имеет вид парных вихрей – подобие вихрей Прандтля второго рода. Выполнен анализ распределений продольной и окружной компонент вектора трения по окружной координате в сечениях каждой отрывной области. Установлено, что иницируемая вторичными течениями окружная компонента вектора трения в некоторых областях стенки сопоставима по величине с его продольной компонентой. Показано, что при анализе факторов, влияющих на возникновение гиперплазии интимы в области соединения шунта с артерией, необходимо оценивать не продольную компоненту, а модуль вектора трения на стенке артерии или шунта. Получены распределения модуля вектора трения по окружной координате. Выполнена оценка размеров областей стенки, в которых его значение ниже величины трения неповрежденной артерии.

Библиографический список

1. Marie Willem et. Blood flow modeling for patient-specific bypass surgery in lower-limb arteries // PhD Thesis. – 2012. – 239 p.
2. Bassiouny H. S. et al. Anastomotic intimal hyperplasia: mechanical injury or flow induced //Journal of vascular surgery. – 1992. – Vol.15, №. 4. – PP. 708-717.
3. Klein W. M. et al. Magnetic resonance imaging measurement of blood volume flow in peripheral arteries in healthy subjects //Journal of vascular surgery. – 2003. – T. 38. – №. 5. – С. 1060-1066.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 20-61-47068

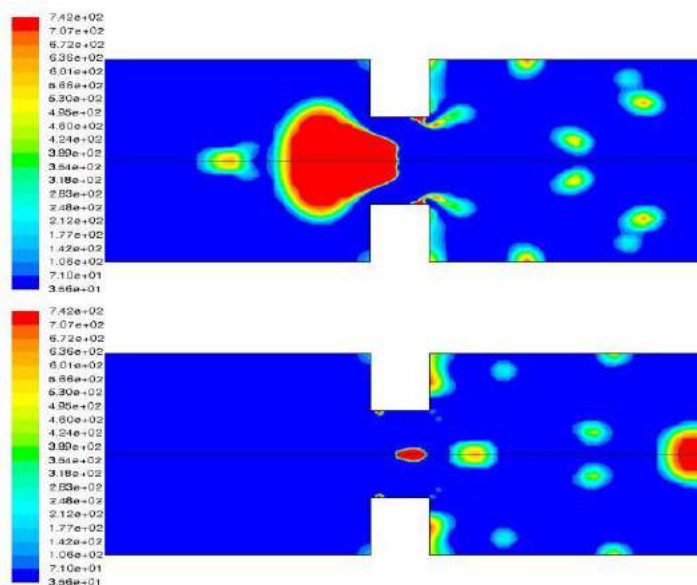
Никулин А.С., Мелихов В.И.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСТЕЧЕНИЯ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЕ ПОГРУЖЕННОГО ДЫРЧАТОГО ЛИСТА

В настоящее время для расчета коэффициента гидравлического сопротивления ПДЛ двухфазному пароводяному потоку, как правило, используются полумпирические соотношения, которые записываются в виде произведения гидросопротивления гомогенной двухфазной смеси, плотность которой определяется объемными долями фаз, и поправки, учитывающей негомогенность потока. Для определения этой поправки необходимы специальные экспериментальные исследования [1, 2]. Относительно недавно были выполнены эксперименты на стенде ПГВ (ЭНИЦ) [3-6], в ходе которых были получены данные по гидродинамическим характеристикам ПДЛ. Тем не менее, помимо экспериментальных методов исследования в настоящее время всё большее место начинают занимать методы компьютерного моделирования с помощью CFD кодов.

В данной работе рассматривается расчет расхода двухфазной пароводяной смеси через отверстие ПДЛ с помощью CFD кода FlowVision. Модель VOF (Volume Of Fluid) используется для описания двухфазной среды. Термодинамические и теплофизические свойства воды определялись по давлению в системе, равному 7 МПа. Был проанализирован эксперимент со скоростью пара в отверстии 4 м/с и скоростью воды 0,16 м/с.



**Рис. 1. Плотность двухфазной смеси вблизи
отверстия**

Течение двухфазной среды имеет сложное нестационарное поведение, образуются дисперсные водные образования, которые непрерывно меняют свою форму, происходят процессы фрагментации капель. Перенос большой капли воды через отверстие представлен на рис.1. Видно, что по мере прохождения через отверстие, большая капля дробится и превращается в несколько маленьких капелек.

При проведении расчетов наблюдалось крайне неустойчивое поведение, а именно: перепад давления колеблется в очень широких

пределах - от 300 Па до 25000 Па. Следует отметить, что пики высокого давления очень кратковременны и связаны с переносом капель воды через отверстие. Среднее значение расчетного перепада давления составляет 970 Па, что близко к экспериментальному значению ~900 Па.

Библиографический список

1. Рябов Г.А., Карасев В.Б., Козлов Ю.В. Экспериментальное исследование гидравлического сопротивления дырчатых листов на пароводяной смеси // Теплоэнергетика. – 1984. – №6. – С.68-70.
2. Рябов Г.А., Козлов Ю.В. Экспериментальное исследование гидродинамики погруженных дырчатых листов // Теплоэнергетика. – 1984. – №8. – С.62-65.
3. Блинков В.Н., Елкин И.В., Емельянов Д.А., Мелихов В.И., Мелихов О.И., Неровнов А.А., Никонов С.М., Парфенов Ю.В. Влияние объемного паросодержания на гидравлическое сопротивление погруженного дырчатого листа // Теплоэнергетика. – 2015. – №7.– С. 24–29.
4. Блинков В.Н., Елкин И.В., Емельянов Д.А., Мелихов В.И., Мелихов О.И., Неровнов А.А., Никонов С.М., Парфенов Ю.В. Влияние неравномерной перфорации погруженного дырчатого листа на выравнивание паровой нагрузки на зеркале испарения парогенератора ВВЭР // Теплоэнергетика – 2016. – №1. – С. 54–58.
5. Le T.T., Melikhov V.I., Melikhov O.I., Blinkov V.N., Nerovnov A.A., Nikonov S.M. Investigation of the equalization capability of submerged perforated sheets under thermal-hydraulic conditions of a horizontal steam generator // Annals of Nuclear Energy. – 2020. – Vol. 148. – 107715.
6. Le T.T., Melikhov V.I., Melikhov O.I., Nerovnov A.A., Nikonov S.M. Validation of the STEG code using PGV experiments on hydrodynamics of horizontal steam generator // Nuclear Engineering and Design. – 2020. – Vol. 356. – 110380.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00793

Носкова К.Р., Гурьянова М.М., Гурьянов А.И.

Рыбинский государственный авиационный технический университет имени
П.А. Соловьёва,
152934, Рыбинск, ул. Пушкина, д.53

ВЛИЯНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОЙ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ ЗА КОМПРЕССОРОМ ГТД НА ГАЗОДИНАМИКУ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ

Совершенствование газотурбинных двигателей (ГТД) связано с улучшением удельных показателей, повышением рабочих характеристик, созданием оптимальной проточной части, обеспечивающей минимум потерь давления и высокую газодинамическую эффективность.

Нестационарность течения, возникающая при взаимодействии рабочего колеса компрессора и спрямляющего аппарата, вызывает несимметричность профиля скорости по высоте канала диффузора камеры сгорания (КС). В выполненных работах [1-3] показано, что организация симметричного профиля скорости за компрессором приводит к улучшению газодинамики в КС, снижая гидравлические потери и потери полного давления. Поэтому необходимость учета течения за компрессором при проектировании современных низкоэмиссионных камер сгорания является важным аспектом и требует проведения как численного моделирования, так и экспериментальных исследований.

Несимметричность профиля скорости на входе в диффузор КС определяется коэффициентом K , равным отношению величин среднерасходной скорости в верхнем входном полуканале к скорости в нижнем. При $K > 1$ – эпюра смещена вверх, при $K < 1$ – вниз.

Для исследования влияния профиля скорости на процессы в камере выполнено численное моделирование центробежного компрессора малоразмерного ГТД. По результатам исследований получено, что на выходе из компрессора формируется профиль скорости с коэффициентом $K > 1$.

Для организации возможных профилей скорости за компрессором спроектированы генераторы несимметричности. Ввиду геометрических особенностей генераторов, на выходе из них образуются эпюры скорости со значениями $K = 1$, $K > 1$ и $K < 1$. Выходные параметры за генераторами задавались в виде граничного условия на входе в КС.

Проведены исследования рабочего процесса КС ГТД. При симметричной эпюре скорости ($K = 1$) наблюдается равномерное заполнение внутреннего и наружного кольцевых каналов рабочим телом (воздухом). В области внезапного расширения образуются зоны рециркуляции. При $K < 1$: воздух преимущественно направлен в нижний кольцевой канал. Интенсивность отрывной зоны в области внезапного расширения возрастает, происходит нелобовое столкновение максимального импульса струи с обтекателем, что приводит к неравномерной подаче воздуха в зону смешения топливовоздушной смеси. На выходе из КС возникают смещение линий тока и наблюдается максимум расхода в верхней стенке жаровой трубы.

Наименьшие значения гидравлических потерь по тракту КС получены при симметричной эпюре скорости на выходе из компрессора. При значениях $K > 1$ и $K < 1$ коэффициент гидравлических потерь и потерь полного давления принимают наибольшие значения, в сравнении со случаем $K = 1$.

Таким образом, по результатам численного моделирования и проведенного анализа газодинамики, интегральных параметров в КС и ГТД показана необходимость выдерживать значения K , близким к 1. Это способствует минимизации гидравлических потерь и потерь полного давления в камерах газотурбинных двигателей.

Библиографический список

1. Gur'yanova, M. M. Joint effect of input asymmetrical velocity profile and initial turbulence intensity on hydraulics of a separated diffuser of GTE combustion

chamber / M. M. Gur'yanova, Sh. A. Piralishvili // Russian Aeronautics (Iz.VUZ). – 2016. – Vol. 59. – №2. – Pp. 197–205.

2. Гурьянова, М. М. Расчётно-экспериментальное исследование газодинамики камеры сгорания ГТД / М. М. Гурьянова, К. Р. Тимофеева, А. И. Гурьянов // Вестник РГАТУ имени П. А. Соловьева. – №4 (51). – 2019. С. 32-40.

3. Guryanova, M. M. Investigation of the Effect of the Output Parameters of the Flow behind the Compressor on the Gas Dynamics of the Separation Diffuser of the Combustion Chamber / M. M. Guryanova, K. R. Timofeeva, A. I. Guryanov // AIP Publishing. – 2020. –№2211. – Pp. 1-5.

Работа выполнена в рамках государственного задания на выполнение фундаментальных научных исследований (шифр научной темы FSSG-2023-0002).

Окатыев Р.С., Колесниченко И.В.

Институт механики сплошных сред УрО РАН,
Пермь, 614013, ул. ак. Королева, 1

ЭВОЛЮЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОВОДЯЩЕЙ ДИСПЕРСНОЙ ПРИМЕСИ В ПРОЦЕССЕ МГД-ПЕРЕМЕШИВАНИЯ

Большинство жидких металлов, используемых в промышленности, являются многофазными средами и содержат примеси, которые имеют электрическую проводимость, отличную от проводимости металла. Некоторые примеси (например оксиды) являются плохо проводящими. В процессах, связанных с кристаллизацией, возможно появление кристаллических частиц в объеме жидкого металла. В таком случае проводимость примеси будет выше, чем проводимость основной фазы.

Важными задачами в рамках МГД-технологий является разработка устройств, позволяющих бесконтактным образом изменять распределение примесей. К таким устройствам относятся МГД-сепараторы и МГД-перемешиватели [1]. Для поиска оптимальных параметров и режимов таких устройств зачастую прибегают к методам математического моделирования.

Важным при моделировании процессов, происходящих в многофазных средах, является вопрос выбора модели среды. Существуют различные подходы к описанию поведения примеси в проводящих жидкостях, такие как приближение пассивной примеси, комбинированные лагранжевы-эйлеровы модели [2], модели многоскоростного континуума [3].

В работе на основе модели многоскоростного континуума проведено моделирование МГД-перемешивания примеси в цилиндрической ячейке. Несущей фазой являлась проводящая жидкость с плотностью 6500 кг/м^3 , а дисперсная фаза представляла собой гранулированную среду. Течение жидкости возникало за счёт действия объемной электромагнитной силы, генерируемой симметрично

расположенными катушками, надетыми на цилиндр. Для вычисления электромагнитной силы, действующей на дисперсную фазу, использовалось обобщение модели Леенова-Коллина [4] на случай сплошной среды. Начальное распределение дисперсной фазы задавалось локализованным в некоторой области ячейки. Вычисления проводились методом конечных объемов, реализованном в пакете вычислительной гидродинамики ANSYS Fluent.

В качестве параметра, характеризующего степень перемешивания примеси в системе, использовался интегральный коэффициент гомогенизации, который определяется как

$$T = \int_V (C - C^*) dV,$$

где C^* – объемная доля, соответствующая однородному распределению примеси в объеме V , C – текущее значение объемной доли примеси.

Построены эволюции полей распределения примеси при различных значениях параметров, определяющих перемешивание (расположение катушек, сила тока в катушках) и различных начальных областях локализации примеси. Построены зависимости коэффициента гомогенизации от времени. Произведено сравнение результатов с результатами, полученными в приближении пассивной примеси.

Библиографический список

1. I. Kolesnichenko, R. Khalilov, S. Khripchenko, A. Pavlinov. MHD stirrer for cylindrical molds of continuous casting machines fabricated aluminium alloy // *Magnetohydrodynamics*. – 2012. – Vol. 48, No. 1. – Pp. 221-233.
2. M. Scepanskis, A. Jakovics, B. Nacke. Homogenization of non-conductive particles in EM induced metal flow in a cylindrical vessel // *Magnetohydrodynamics*. – 2010. – Vol. 46, No. 4. – Pp. 413-424.
3. Р. И. Нигматулин *Динамика многофазных сред. Часть I.* – М.: Наука, 1987. – 464 с.
4. D. Leenov, A. Kolin. Theory of Electromagnetophoresis. I. Magnetohydrodynamic forces experienced by spherical and symmetrically oriented cylindrical particles // *Journal of Chemical Physics*. – 1954. – Vol. 22, No. 4. – Pp. 683–688.

Исследование выполняется за счет гранта Российского научного фонда и Пермского края № 22-19-20106, <https://rscf.ru/project/22-19-20106/>.

Митрофанова О.В. , Поздеева И.Г. , Старовойтов Н.А.
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
115409, Москва, Каширское ш., 31
Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,
123182, Москва, пл. ак. Курчатова, д. 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ ТЕЧЕНИЯ В ПРЕРЕЗОНАНСНОЙ ОБЛАСТИ ДЛЯ ОТКРЫТОЙ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Исследовались условия возникновения и развития резонансного режима течения в открытой гидромеханической системе. В качестве модельного процесса рассматривались процессы вихреобразования в импактной закрученной струе при возбуждении изгибных колебаний нижней поверхности выходной щели. В работе проводилось сопоставление визуализации тонкой вихревой структуры импактного закрученного течения с амплитудно-частотной характеристикой акустических колебаний. Экспериментальный участок представлял собой вихревую камеру с тангенциальным подводом, в нижнюю часть которой нагнетался компрессором осушенный воздух. Подробное описание экспериментальной установки и рабочего участка представлено в работе [1]. Верхняя торцевая поверхность камеры была выполнена в виде сменной крышки с центральным отверстием сопловидной формы. Закрученный воздушный поток покидал объем вихревой камеры через отверстие в верхней крышке камеры и ударял по преграде. Незакрепленная преграда в виде круглого диска, выполненного из плексигласа, могла свободно вращаться и перемещаться вдоль вертикальной оси. В экспериментах варьировались материал крышки, диаметр выходного отверстия, а также угол раствора сопла. Непосредственно фиксируемые вихревые структуры наблюдались в выходной щели между верхней торцевой поверхностью вихревой камеры и преградой. Визуализация вихревой структуры проводилась путем нанесения вязкой суспензии на основе оксида титана на верхнюю (нижняя граница преграды) и нижнюю (верхняя граница торцевой поверхности вихревой камеры) поверхности выходной щели.

Расход воздуха доводился до значения, при котором возникали акустические колебания. Особую важность при обработке полученных данных имели визуализационные картины течения на поверхности крышки вихревой камеры, пример которых представлен на рис. 1. Перед началом эксперимента на всю нижнюю поверхность преграды и крышку вихревой камеры по диаметру кромки преграды наносился тонкий слой визуализирующей суспензии. Как показывает рисунок 1, при подаче воздуха в вихревую камеру и доведении расхода до критического значения в области истечения закрученного потока из-под преграды были зафиксированы спирально-вихревые структуры, направления движения в которых имели радиальную направленность.

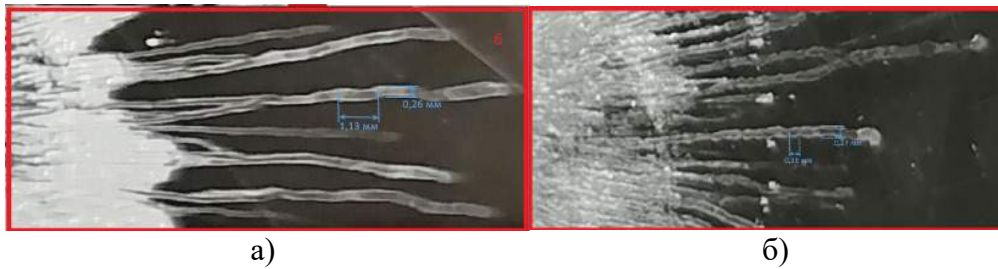


Рис. 1. Визуализация вихревой структуры импактного закрученного течения на поверхности крышки вихревой камеры с увеличением отдельных фрагментов:
 а) – для крышки с отверстием 6 мм и углом раствора сопла 45°(предрезонансный режим)
 б) – для крышки с отверстием 5 мм и углом раствора сопла 60° (резонансный режим)

Одновременно с визуализацией проводилась запись акустических колебаний, в процессе расшифровки которой были получены амплитудно-частотные спектры колебаний (рис.2).

Сопоставление визуализационных картин, показывающих элементы импактного закрученного течения, таких как центральный тороидальный вихрь и тонкие спирально-вихревые структуры, с амплитудно-частотными характеристиками акустических колебаний, где мы также наблюдаем характерные пики, соответствующие этим вихревым структурам, позволяет использовать акустический метод для диагностики образования вихревых структур.

Кроме того, удалось выявить качественное различие тонких спирально-вихревых структур в предрезонансной и резонансной области: при резонансном режиме течения шаг навивки спирали совпадает с диаметром спирального вихря (см. рис.1).

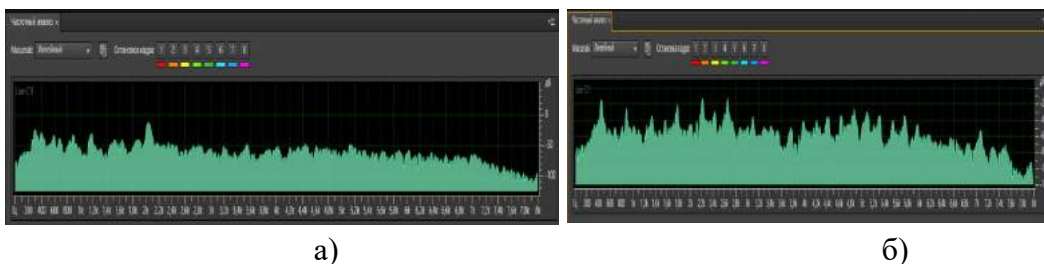


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики акустических колебаний при нанесении вязкой суспензии: а) – для крышки с отверстием 6 мм и углом раствора сопла 45°(предрезонансный режим) б) – для крышки с отверстием 5 мм и углом раствора сопла 60°(резонансный режим)

Библиографический список

1. Поздеева И.Г. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук «Исследование гидродинамики и механизмов генерации акустических колебаний в сложных вихревых течениях», 2019.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 23-29-00373

Попович С.С., Здитовец А.Г., Киселев Н.А., Виноградов Ю.А.
НИИ механики МГУ им. М.В.Ломоносова,
Москва, 119192, пр. Мичуринский, 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ ОБТЕКАНИИ ЦИЛИНДРА СЖИМАЕМЫМ ДОЗВУКОВЫМ ПОТОКОМ ВОЗДУХА

Эффект аэродинамического охлаждения или эффект энергоразделения Эккерта-Вайзе [1-4] заключается в значительном уменьшении температуры стенки в потоке сжимаемого газа при поперечном обтекании цилиндра в области задней критической точки, а также в следе за плохо обтекаемыми телами (цилиндр, ребро, ступенька, лопатки турбомашин) [3-7]. По-видимому, впервые данный результат был опубликован в работе Хилтона У.Ф. [1]. Было отмечено, что температура задней стенки цилиндра практически равняется статической температуре набегающего потока в то время, как в передней части температура близка к температуре торможения. Результат был подтвержден в ряде последующих работ, а также интенсифицирован за счет взаимного влияния пары круговых цилиндров [9,10].

В данной работе представлены результаты исследования поперечного обтекания цилиндра дозвуковым потоком воздуха, полученные методом PIV (система Полис) и инфракрасной термографии (ИК-камера InfraTEC IR8855). Исследование проведено на стационарном режиме при числе Маха набегающего потока 0.6, температуре торможения 15°C, давлении торможения 145 кПа.

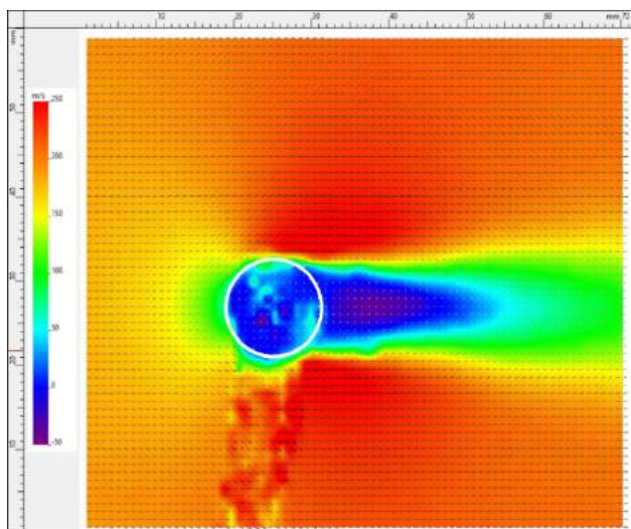


Рис. 1. PIV-визуализация обтекания цилиндра (поток слева направо, подсветка сверху)

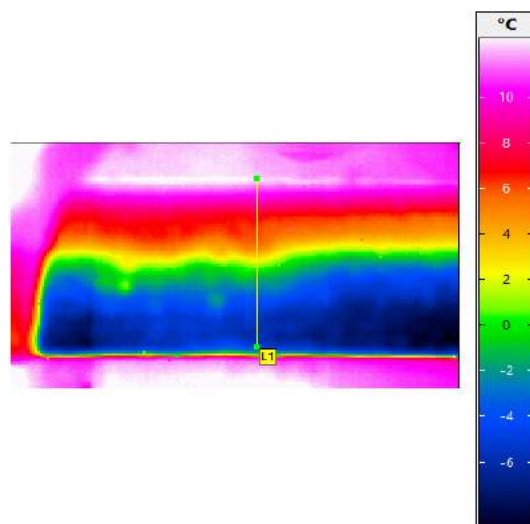


Рис. 2. Термографический снимок обтекания цилиндра (поток сверху вниз)

На рис. 1 представлено осредненное поле продольной компоненты скорости при обтекании цилиндра. Видна характерная область следа с зоной обратных токов. На рис. 2 представлен термографический снимок обтекаемого цилиндра. На визуализации выделяется область отрыва потока со сниженной температурой стенки в окрестности задней поверхности цилиндра.

Библиографический список

1. Hilton W.F. Thermal effects on bodies in air streams. \\\ Proceedings of the Royal Society of London, series A. 1938. V. 168. P. 43-57.
2. Eckert E.R.G. Energy separation in fluid streams. \\\ Int. Commun. Heat Mass Transf. 1986. V. 13. № 2. P. 127–143.
3. Ryan L.F. Experiments on aerodynamic cooling. \\\ PhD thesis. Swiss Federal Institute of Technology. Zurich. 1951.
4. Sanitjai S., Goldstein R.J. Forced convection heat transfer from a circular cylinder in cross flow to air and liquids. \\\ Int. J. Heat Mass Transf., 2004. N. 47. P. 4795–4805.
5. Popovich S.S., Kiselev N.A., Zditovets A.G., Vinogradov Y.A. Experimental study of the adiabatic wall temperature of a cylinder in a supersonic cross flow. \\\ J. Phys.: Conf. Ser., 2021. V. 2039. N. 012029.
6. Popovich S.S. Aerodynamic cooling of the wall in the trace of a supersonic flow behind a backward-facing ledge. \\\ Fluid Dynamics, 2022. V. 57. N. 1. P. 57–64.
7. С.С. Попович, А.И. Леонтьев, В.Г. Лущик, М.С. Макарова. Коэффициент восстановления температуры в сжимаемом турбулентном пограничном слое \\\ Теплофиз. выс. темп. 2022. Т. 60. № 3. С. 455–480.
8. Aleksyuk A.I., Osiptsov A.N. Direct numerical simulation of energy separation effect in the near wake behind a circular cylinder. \\\ Int. J. Heat Mass Transf. 2018. V. 119. P. 665–677.
9. Aleksyuk A.I. Influence of vortex street structure on the efficiency of energy separation. \\\ Int. J. Heat Mass Transf. 2019. V. 135. P. 284–293.
10. Ю.А. Виноградов, А.Г. Здитовец, Н.А. Киселёв, С.С. Попович. Экспериментальное исследование энергоразделения при поперечном обтекании пары круговых цилиндров сжимаемым потоком воздуха \\\ Изв. РАН. МЖГ, 2023. № 2. С. 102–112.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 19-79-10213

Потапов В.Н., Костюнин В.В., Костюнина Т.В., Калиновская К.С.
УрФУ им.первого Президента России Б.Н.Ельцина, Екатеринбург, 620002,
пр. Мира, 19
ООО «Vortex Technology», Екатеринбург

О НЕРАВНОМЕРНОСТИ ИНТЕНСИВНОСТИ КРУТКИ СРЕДЫ ПО РАДИУСУ

Анализ вихревых горелок котлов для эффективности сжигания топлив связан с оценкой интенсивности крутки потока, формирующего факел. Это во многом определяет стабилизацию, экономику и экологичность процесса, форму и размеры индивидуальных факелов горелок. Факел зависит от конструкции горелки и определяет развитие суммарного факела в топке и теплообмен в тракте котла. Инструментальное изучение закрученных потоков (вихрей) затруднено, а адекватность моделирования связана с решением сложных методических и общенаучных проблем. Самыми сложными для интерпретаций остаются сильно закрученные потоки – объемные вихри с развитым приосевым обратным током вдоль оси вращения. Снаружи, на радиусах, превышающих радиус границы обратного тока на 10-15%, по нашим оценкам, имеет место максимальная интенсивность турбулентного обмена. Размеры обратного тока и расход газа в нем зависят от интенсивности закрутки всего вихря, но количественно сильно не совпадают в потоках за разными завихрителями при одинаковых расходах и одинаковом числе крутки среды. В безразмерном виде это число часто принято как отношение момента вращения M (потока момента количества движения) к импульсу K (потоку количества движения), переносимых вихрем вдоль оси:

$$\Theta = 4 \cdot M / K \cdot D, \quad (1)$$

где D – внутренней диаметр канала, или условный внешний диаметр вихря.

Корректное число крутки Θ получают интегрированием радиальных распределений текущих значений моментов вращения и осевых импульсов на базе экспериментальных профилей скоростей, давлений и плотности газа или расчетным моделированием, считая ее интегральной или фактической круткой. Но наш опыт показал, что применение адаптированных к (1) формул оценки крутки отраслевых стандартов часто дает результаты противоречащие реальности, вызывая ошибки при оптимизации процессов. Часто имеет место несоответствие рассчитанной крутки вихря коэффициентам аэродинамического сопротивления разных типов устройств при одинаковой крутке. Можно лишь выделить ряд закручивающих устройств, для которых такие расчеты и базовые характеристики потоков относительно близко соотносятся с реальностью [1].

Для анализа процессов в вихре (по рекомендации Н.Б.Шалаева) мы ввели в рассмотрение новую характеристику структуры вихря. Это ρ_{mi} – плотность потока момента вращения совместно с известной традиционной характеристикой ρ_{ki} - плотностью осевого потока импульса, переносимых вихрем вдоль оси [1,2].

Для сопоставления разных данных, прежде всего, о нарушениях двухфазных течений в вихревых камерах величину ρ_{mi} представим, как $\rho_{mпл}$ и $\rho_{mоб}$, условно для «плоского» и «объемного» вихря. В первом случае момент определяем как произведение текущей вращательной скорости на самую себя, а в другом и для того же вихря – через произведение вращательной скорости на осевую. Для обоих представлений предлагаем два выражения местной крутки полукольца в поперечном сечения потока на местном (текущем) радиусе r_i :

$$\omega_{обi} = 2 \cdot \rho_{mioб} / \rho_{ki} \cdot r_i, \quad (2)$$

$$\omega_{плi} = 2 \cdot \rho_{mпл} / \rho_{ki} \cdot r_i. \quad (3)$$

Например, на выходе из простой вихревой горелки число интегральной крутки (1) вихря по данным эксперимента для «объемного» вихря было равно $\Theta_{об} = 2,1$ а для «плоского» вихря $\Theta_{пл} = 3$. Вихрь в горелке создан стандартной «шеститочечной» улиткой. При этом распределения интенсивности местной крутки по обеим представлениям формирования момента вращения имели вид,

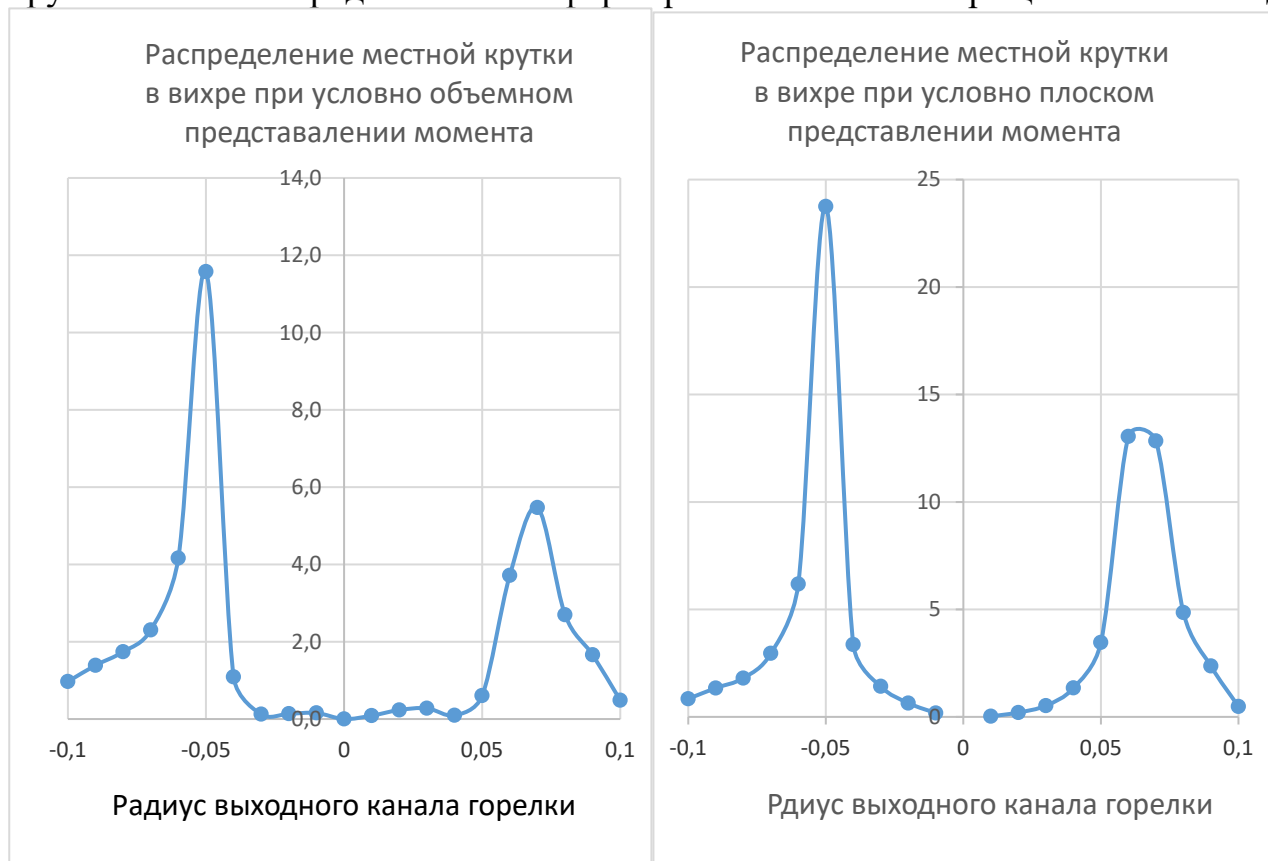


Рис. 1. Распределение по радиусу потока местной крутки концентрических слоев в выходном сечении одноканальной вихревой горелки

приведенный на рис. 1.

Очевидно усиление закрутки потока вблизи приосевого обратного тока, где, по нашим оценкам, снаружи его границы имеет место интенсификация турбулентного переноса, как вдоль, так и поперек основного вихря.

Библиографический список

1. Потапов В.Н. Управление структурой потока на выходе из вихревой горелки: дис. канд. техн. наук:18016: защищена 24.05.2002: утв. 15.11.02 / Потапов В. Н. – Екатеринбург, 2002. - 256 с
2. Потапов В.Н., В.В.Костюнин, А.В.Копейка, М.В.Чистяков Использование распределения в потоке импульса и момента вращения для создания газовых горелок нового типа // Тезисы докладов третьей международной конференции «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках». МЭИ. – Москва, 2008. - С 201-202.

Сафронов А.А.

АО ГНЦ «Центр Келдыша»,
Москва, 125438, Онежская, 8

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ САМОПРОИЗВОЛЬНОГО ИЗГИБА ВЯЗКОЙ СТРУИ, ИСТЕКАЮЩЕЙ ИЗ КАПИЛЛЯРНОГО ОТВЕРСТИЯ

Актуальной для ряда технических приложений является задача создания капельных потоков с малой угловой расходимостью [1]. Один из физических механизмов, препятствующих этому, – явление самопроизвольного изгиба вязкой струи, истекающей из капиллярного отверстия.

В работе предложена линейная модель изгиба струи. Получены дисперсионные соотношения, описывающие скорость роста возмущений. Показано, что изгиб струи возникает самопроизвольно. Проведен качественный анализ влияния вязкости жидкости и скорости истечения на величину углового отклонения. Предложен ряд нелинейных моделей, описывающий различные аспекты явления самопроизвольного изгиба струи. Проведено сравнение теоретически полученных результатов с экспериментами, в том числе – выполненными в условиях микрогравитации и вакуума.

Библиографический список

1. А.А. Сафронов, А.А. Коротеев, Н.И. Филатов, А.Л. Григорьев. Изгиб вязкой струи, истекающей из капиллярного отверстия // Инженерно - физический журнал. 2020. Т. 95. № 1. С. 72 – 79.

Скрипкин С.Г., Куйбин П.А., Шторк С.И.
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. ак. Лаврентьева, д. 1

ДВОЙНЫЕ НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ВИХРИ В ЗАКРУЧЕННОМ ПОТОКЕ

Экспериментальное исследование закрученных потоков с образованием крупномасштабных вихревых структур представляет значительный интерес с точки зрения фундаментальной науки, так как подобные структуры широко распространены в природе в различных масштабах. Не менее важную роль вихревые структуры играют и в технических приложениях, например, камерах сгорания

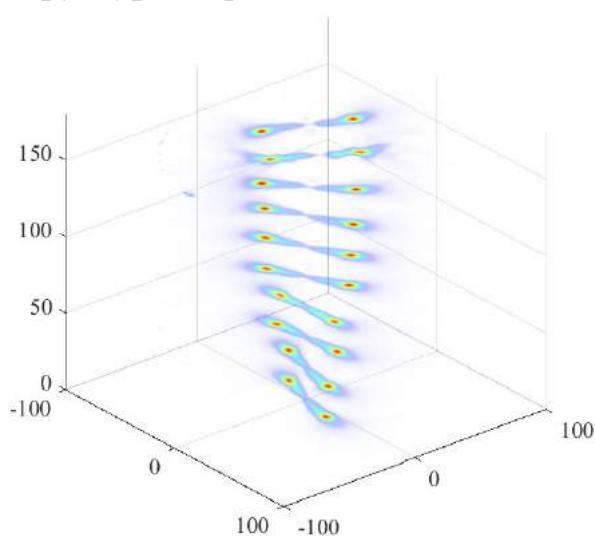


Рис. 1. Фазовоосредненная двойная вихревая спираль визуализированная Г2 функцией введенной в [4]

[1], вихревых сепараторах и циклонах [2], вихревых химических и солнечных реакторах [3]. Отдельный интерес представляет собой нестационарный двуспиральный распад вихря. С практической точки зрения, подобный режим течения должен обеспечивать более эффективное перемешивание интенсифицируя процессы теплообмена, по сравнению с одиночным вихрем. Двойные вихревые структуры в закрученном потоке ввиду реализуются гораздо реже и ограниченное количество экспериментальных данных является основной проблемой, сдерживающей дальнейшее развитие аналитических теорий винтовых вихрей.

Исследования проводились в вихревой камере тангенциального типа, являющейся частью замкнутого гидродинамического контура. Основными режимными параметрами являлись число Рейнольдса и геометрический параметр крутки. Были определены границы, с точки зрения режимных параметров, формирования устойчивых прецессирующих двойных вихревых структур и области с наблюдаемым периодическим переходом между двойной и одинарными модами. В качестве определяющего структуру течения параметра был выбран конструктивный параметр крутки S .

Параметр $S = D2\sin(\gamma)/(N \cdot s)$ можно оценить, исходя из геометрии вихревой камеры, где $D = 190$ мм – диаметр камеры, $N = 4 \times 3 = 12$ – количество сопел, $s = 14$ мм \times 23 мм – площадь одного сопла, а γ – угол поворота сопел относительно центральной оси. Угол поворота сопел γ меняется от 0 до 45 градусов, соответственно, параметр крутки может варьироваться 0 до 6.6. При перекрытии ряда сопел параметр крутки может быть увеличен пропорционально отношению площадей открытых и закрытых сопел.

Варьируя такие параметры как число Рейнольдса и S , была составлена режимная карта, демонстрирующая формирование устойчивых одиночных и двойных вихрей (рис. 1), а также переходные области для тангенциальной вихревой камеры. На основе фазово-осредненных распределений скорости, полученных в результате PIV измерений, были определены основные параметры двойного вихря, которые востребованы при апробации аналитической модели винтовых вихрей.

Библиографический список

1. D. Durox, J.P. Moeck, J.F. Bourgouin, P. Morenton, M. Viallon, T. Schuller, S. Candel, Flame dynamics of a variable swirl number system and instability control, *Combust. Flame.* 160 (2013) 1729–1742. doi:10.1016/j.combustflame.2013.03.004..
2. K. Elsayed, C. Lacor, Modeling, analysis and optimization of aircyclones using artificial neural network, response surface methodology and CFD simulation approaches, *Powder Technol.* 212 (2011) 115–133. Kuznetsov V.V., Kozlov S.P. Modeling of methane steam reforming in a microchannel with a heat flow distributed in length // *J. Eng. Therm.* 2008. V. 17, No. 1. P. 53–59. 2.
3. A. Chinnici, M. Arjomandi, Z.F. Tian, Z. Lu, G.J. Nathan, A Novel Solar Expanding-Vortex Particle Reactor: Influence of Vortex Structure on Particle Residence Times and Trajectories, *Sol. Energy.* 122 (2015) 58–75.
4. Graftieaux, L., Michard, M., & Grosjean, N. (2001). Combining PIV, POD and vortex identification algorithms for the study of unsteady turbulent swirling flows. *Measurement Science and technology*, 12(9), 1422.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 21-19-00769

Соколов М.А., Разуванов К.Г.

Объединенный институт высоких температур РАН,
111250, Москва, Ижорская, 13/с.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА ЗАТОПЛЕННОЙ СТРУИ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В ПРОДОЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Известно, что жидкие металлы и расплавы солей рассматриваются как перспективные теплоносители для охлаждения различных элементов термоядерных установок. В частности, весьма малоизученной темой остается течение жидкого металла при внезапном расширении, следствием которого является возникновение затопленной струи.

Использование жидких металлов в качестве теплоносителя сопровождается большим числом трудностей для проведения экспериментов. Несмотря на

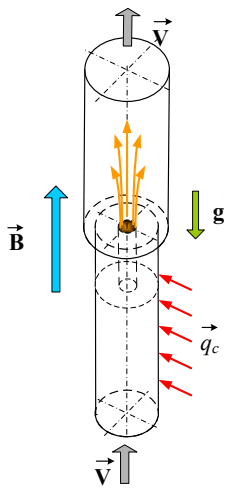


Рис. 1. Исследуемая конфигурация течения

свою токсичность, ртуть является наиболее подходящей модельной жидкостью класса жидких металлов (т.к. остается жидкой при комнатной температуре) и позволяет детально измерить локальные характеристики гидродинамики в условиях турбулентного течения.

Экспериментальное исследование проводилось на ртутном стенде кафедры инженерной теплофизики МЭИ. Исследуемая конфигурация течения ЖМ показана на рис. 1.

Стенд смонтирован таким образом, что реализовано подъемное течение жидкого металла в вертикальной обогреваемой составной трубе. Исследуется гидродинамика струи, истекающей из узкого отверстия диаметром $d=5$ мм в широкую трубу диаметром $d=25$ мм. Струя формируется

в области однородного постоянного магнитного поля (продольного), создаваемого соленоидом.

В пересчете на трубу диаметром 18 мм стенд обеспечивает безразмерные параметры по числам Рейнольдса Re - до 55000, Пекле Pe - до 1200; Грасгофа Gr_q - до 10^8 , Гартмана Ha - $0 \div 460$.

Для проведения измерений локальных характеристик течения (профилей продольной скорости в потоке жидкого металла) использовался термопарный корреляционный зонд.

Профили скорости измеряются корреляционным методом с использованием естественного фона турбулентных флуктуаций температуры, переносимых потоком.

Получены предварительные результаты по полю продольной компоненты скорости на трубе диаметром $d=25$ мм, от среза сопла струи, истекающей из отверстия диаметром $d_c=5$ мм, расположенного по оси трубы. Рассматривались режимы течения с числами Рейнольдса, определенного по диаметру в диапазоне от 4300 до 11100 при значениях магнитной индукции магнитного поля в диапазоне $B = 0 \div 0.96$ Тл, что соответствует числам Гартмана $Ha = 0 \div 460$.

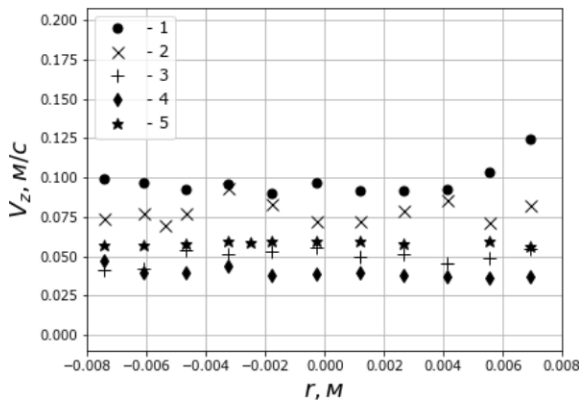


Рис. 2. Профиль безразмерной скорости по радиусу от среза сопла струи на расстоянии 115 мм:
 1 - $Re=7800$, $Ha=300$; 2 - $Re=7670$, $Ha=450$; 3 - $Re=7685$, $Ha=160$; 4 - $Re=7685$, $Ha=0$; 5 - $Re=7685$, $Ha=150$

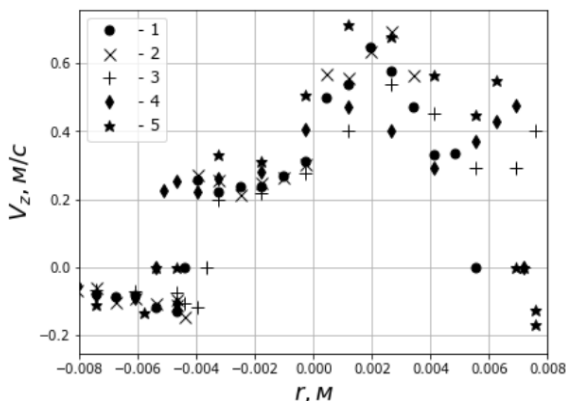


Рис. 3 Профиль безразмерной скорости по радиусу от среза сопла струи на расстоянии 15 мм:
 1 - $Re=7800$, $Ha=300$; 2 - $Re=7670$, $Ha=450$; 3 - $Re=7685$, $Ha=160$; 4 - $Re=7685$, $Ha=0$; 5 - $Re=7685$, $Ha=150$

Профили скорости по радиусу непосредственно на срезе сопла на расстоянии 115 и 15 мм показаны на рис. 2-3. По длине струя расширяется и скорость падает. Влияние продольного магнитного поля значительно. В ПМП струя более устойчива: размывание струи (расширение) затягивается по длине канала.

Библиографический список

1. Генин Л.Г., Листратов Я.И., Свиридов В.Г., Жилин В.Г., Ивочкин Ю.П., Е.В., Разуванов Н.Г. Экспериментальные исследования гидродинамики и теплообмена жидких металлов в магнитных полях. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: термоядерный синтез. Выпуск 4. – М. 2003. – с. 35-44

2. V.G. Sviridov, N.G. Razuvanov, Yu.P. Ivochkin, Ya.I. Listratov, E.V. Sviridov., L.G.Genin, V.G. Zhilin, I. A. Belyaev. Liquid Metal Heat Transfer Investigations Applied to Tokamak Reactor/ Proceeding of the International Heat Transfer Conference IHTC14, August 8-13, 2010, Washington, DC, USA, p.1-8

Михайлов Е.А., Степанова А.П., Таранюк А.А., Чудновский А.Ю.

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1

Физический институт имени П.Н.Лебедева РАН,

Россия, 119991, Москва, Ленинский проспект, 53

АО «ЛАТВО»,

Латвия, LV-1005, Рига, улица Ганибу Дамбис, 53

НЕЛИНЕЙНОЕ СТАЦИОНАРНОЕ ЭЛЕКТРОВИХРЕВОЕ ТЕЧЕНИЕ МЕЖДУ ДВУМЯ ЦИЛИНДРАМИ

Электровихревое течение возникает при прохождении электрического тока переменной плотности через проводящую среду (например, жидкий металл). Это приводит к взаимодействию тока с собственным магнитным полем и появлению электромагнитной силы, провоцирующей появление закрученных потоков в жидкости [1]. В последнее время все больше работ проводится с использованием высокопроизводительных вычислений, как правило, основанных на стандартных компьютерных пакетах [2]. Научный интерес с точки зрения фундаментальной гидродинамики представляют теоретические приближения, основанные на свойствах автомодельности решений [3]. Они позволяют понять принципиальные закономерности, связанные с особенностями течений. Можно отметить ряд важных результатов, полученных, например, для течения между двумя плоскостями [4, 5].

В настоящей работе рассмотрена модельная задача о течении между двумя вертикальными цилиндрами большой длины. Электрический ток распространяется в радиальном направлении от внутреннего цилиндра к внешнему, приводя к возникновению электровихревого течения, которое достаточно быстро выходит на стационарный режим. Подобная конфигурация позволяет пользоваться

скалярной функцией тока, которую можно представить в автомодельном виде $\psi(r, z) = zf(r)$. Ранее была рассмотрена линейная задача, для которой показано, что около внутреннего цилиндра формируются восходящие потоки, а около внешнего – нисходящие [6]. Между тем, большое значение имеют нелинейные эффекты, которые будут описывать быстрые течения. Для этого в безразмерных переменных рассматривается следующее уравнение:

$$\frac{1}{r} \frac{d^4 f}{dr^4} - \frac{2}{r^2} \frac{d^3 f}{dr^3} + \frac{3}{r^3} \frac{d^2 f}{dr^2} - \frac{3}{r} \frac{df}{dr} + \frac{1}{r^2} f \frac{d^3 f}{dr^3} - \frac{1}{r^2} \frac{df}{dr} \frac{d^2 f}{dr^2} - \frac{3}{r^3} f \frac{d^2 f}{dr^2} + \frac{1}{r^3} \left(\frac{df}{dr} \right)^2 + \frac{3}{r^4} f \frac{df}{dr} = \frac{S}{r^2};$$

где S – параметр электровихревого течения. Его решение ищется с помощью метода ван Дайка в виде ряда по степеням данного параметра:

$$f(r) = Sf_1(r) + S^2 f_2(r) + \dots,$$

где f_i - новые искомые функции переменной r .

Библиографический список

1. В.В. Бояревич, Я.Ж. Фрейберг, Е.И. Шилова, Э.В. Щербинин. Электровихревые течения. \ \ Рига: Зинатне, 1985.
2. A. Kharicha, I. Teplyakov, Y. Ivochkin, A. Guseva, M. Wu, A. Ludwig. Experimental and numerical analysis of free surface deformation in an electrically driven flow \ \ Experimental Thermal and Fluid Science, 2015, 62. С. 192 – 201.
3. Е.М. Смирнов. Автомодельные решения уравнений Навье – Стокса для закрученного течения несжимаемой жидкости в круглой трубе \ \ Прикладная математика и механика, 1981, 45. С. 833 – 839.
4. Е.А. Михайлов, А.Ю. Чудновский. Асимптотическое разложение решения уравнения для медленного осесимметричного электровихревого течения между двумя плоскостями \ \ Сибирский журнал индустриальной математики, 2020, 23. С. 88 – 100.
5. Е.А. Михайлов, А.П. Степанова, А.А. Таранюк. Анализ и модель системы электровихревых течений между двумя плоскостями при больших токах \ \ Труды НГТУ им. Р.Е.Алексеева, 2022, 1. С.32 – 42.
6. Е.А. Михайлов, А.П. Степанова, А.А. Таранюк, А.Ю. Чудновский. Электровихревые течения между двумя цилиндрами при наличии внешнего магнитного поля \ \ Материалы Восьмой Российской национальной конференции по теплообмену 17 – 22 октября 2022. Т. 1. С. 43 – 44.

Гютюма В.Д.

Республиканское научно-производственное унитарное предприятие «Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси»,
г. Минск, 220072, ул. Академическая 15, корпус 2

РАВНОВЕСИЕ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ В ГРАВИТАЦИОННОМ ПОЛЕ

Проблема понимания природы смерчей, механизма их образования и источников огромной разрушительной силы является одной из самых загадочных в динамике атмосферы. Несмотря на значительные усилия и обширный материал наблюдений она до сих пор не имеет однозначного решения. Существующие теории и модели интенсивных атмосферных вихрей традиционно развиваются в рамках гидродинамики [1, 2]. Однако традиционные подходы в рамках классической теории не в состоянии объяснить механизм возникновения больших тангенциальных скоростей и значительных разрежений в центре вращающихся воздушных масс.

Если в неподвижной среде в результате нагрева возникает зона с повышенной температурой воздуха, то согласно барометрической формуле из-за разности гидростатических давлений вертикальных столбов воздуха с разной температурой между ними установится перепад давлений, величина которого зависит от разности температур и высоты, на которую простирается область прогретого воздуха. Используя барометрическую формулу для простейшего случая изотермической модели атмосферы, нетрудно рассчитать требуемую разность температур для заданного перепада давлений у земной поверхности в зависимости от высоты нагретого столба воздуха, графически представленную на рис. 1. Как видно из представленных графиков, с увеличением высоты столба нагретого воздуха требуемый перепад температур для обеспечения заданного разрежения заметно снижается. Но, даже для высоты 4000 м при перепаде давлений в 100 гПа он составляет весьма внушительную величину в 100 К. Чтобы достичь перепада давлений в 200 гПа при высоте столба горячего воздуха 4000 м необходимо повысить его температуру на 300 К. Проведенные оценки показывают, что гидростатическое равновесное давление не в состоянии обеспечить требуемые достаточно значительные разрежения, которые возникают в смерчах и торнадо при весьма небольших разностях температур порядка 12–20 К.

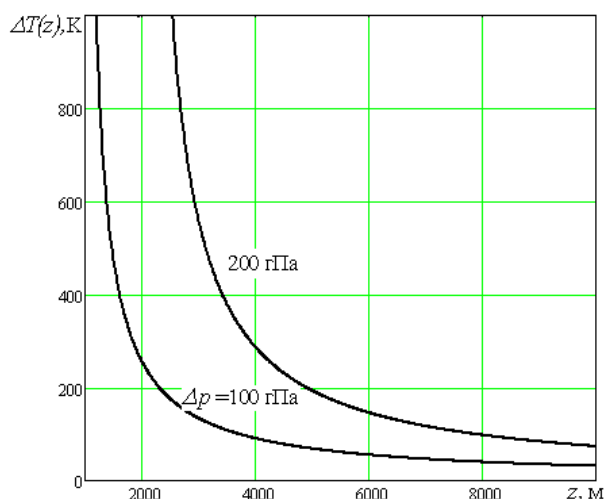


Рис. 1. Зависимость разности температур $\Delta T(z)$ от высоты z при заданном перепаде давлений Δp у земной поверхности для изотермической модели атмосферы

Очевидно, что для создания и поддержания низкого давления в центре

вихря должен быть задействован некий другой механизм взаимодействия сдвигового вращающегося вихревого течения с гравитационным полем Земли. В работе [3] показано, что в сдвиговом потоке вязкой сжимаемой жидкости в результате переноса импульса звуковыми волнами условие равновесия в гравитационном поле Земли в зоне вихревого течения описывается зависимостью

$$c^2 \frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g, \quad (1)$$

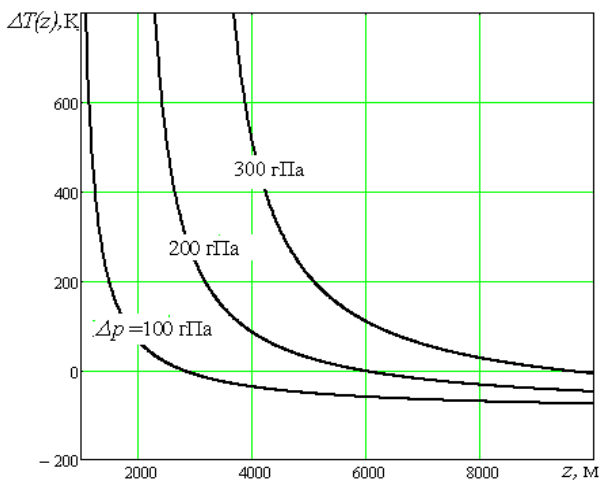


Рис. 2. Зависимость разности температур $\Delta T(z)$ в вихре и окружающей среде от высоты вихря z при заданном перепаде давлений Δp у земной поверхности для изотермической модели атмосферы

где c – скорость звука. Таким образом, при отличной от сухоадиабатической температурной стратификации атмосферы воздуха, в зоне вихря будет устанавливаться вертикальное распределение давления, не совпадающее с гидростатическим распределением давления в малоподвижной окружающей среде. Воспользовавшись барометрической формулой и соотношением (1), для расчета температуры нагретого воздуха при заданной высоте вихря z и заданном перепаде давлений в окружающей среде и в зоне вихревого образования у земной поверхности Δp получим в случае изотермической атмосферы следующее соотношение

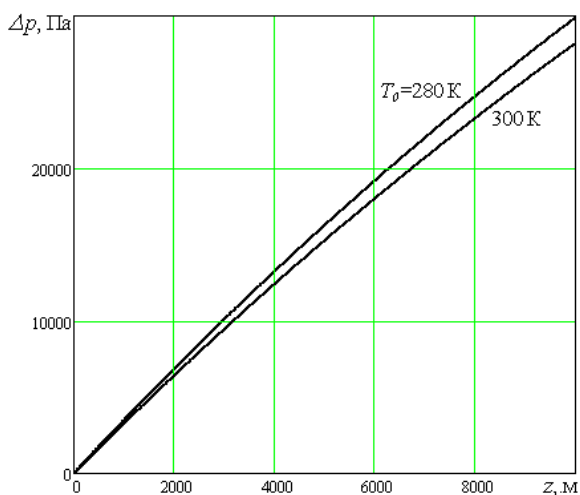


Рис. 3. Зависимость перепадов давления в вихре и окружающей среде от высоты вихря для изотермической модели атмосферы постоянной температуры.

$$T(z) = \frac{gz}{\gamma R} \left(\ln \frac{p_0 - \Delta p}{p_0} + \frac{gz}{RT_0} \right)^{-1}, \quad (2)$$

где T_0 и p_0 – соответственно температура и давление холодного окружающего воздуха у земной поверхности. Результаты расчетов по формуле (2) перепадов температур $\Delta T = T(z) - T_0$ для трех фиксированных перепадов давлений Δp равных 100, 200 и 300 гПа при температуре окружающего воздуха $T_0 = 300$ К представлены на рис. 2. В этом случае заданный перепад давлений достигается при существенно меньшей разности температур

и может реализовываться для больших высот даже при отрицательных перепадах температур.

Если принять, что температура в зоне вихря равна температуре окружающей среды, то положив в формуле (2) $T(z)=T_0$ получим выражение, определяющее зависимость разности давлений у земной поверхности в зоне вихря и окружающей среде от его высоты в случае однородного распределения температуры в земной атмосфере. На рис. 3 приведены графики зависимости Δp от высоты вихря z для двух значений температуры $T_0=280$ К и $T_0=300$ К окружающей воздушной среды. Из представленных графиков видно, что перепад давлений в вихре и окружающей среде в однородной атмосфере почти линейно растет с увеличением высоты вихревого образования z . С увеличением температуры окружающей среды перепад давлений снижается. При этом изменение расчетных значений перепадов давления с высотой достаточно хорошо согласуется с наблюдаемыми в природе величинами разрежения воздуха в смерчах и циклонах.

Библиографический список

1. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. – Л., Гидрометеиздат, 1984. 700 с.
2. Вараксин А.Ю., Ромаш М.Э., Копейцев В.Н. Торнадо. М.: Физматлит. 2011. 344 с.
3. Тютюма, В.Д. Концептуальные особенности построения теории вязких течений сжимаемых сред // Инж.-физ. журн. 2012. Т. 85, №2. С. 333–335.

Митрофанова О.В., Федоринов А.В.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
115409, Москва, Каширское ш., 31

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,
123182 Москва, пл. ак. Курчатова, д. 1

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СЛОЖНЫХ КАНАЛАХ СУДОВЫХ ЯЭУ

Опыт эксплуатации судовых ЯЭУ различных поколений показывает, что большая часть проблем, возникающих при работе основного оборудования реакторных установок (РУ), связана со сложной структурой гидравлического тракта. В связи с этим актуальным является вопрос моделирования процессов гидродинамики и теплообмена в каналах, генерирующих крупномасштабные вихревые структуры, что ведет за собой возникновение ряда эффектов, негативно влияющих на характеристики надежности и безопасности данных установок.

В целях апробации предложенного в рамках работы расчетного метода, использующего в качестве модели турбулентности Shear Stress Transport ($k-\omega$ SST), была рассмотрена задача смешения неравновесных петлевых потоков теплоносителя внутри судовой РУ, которая включает в себя как моделирование закрученных течений, так и взаимодействие сред с различной температурой. Геомет-

рические параметры расчетной модели судовой РУ, а также начальные и граничные условия задачи соответствовали данным экспериментального стенда, являющегося крупномасштабной моделью судового ядерного реактора, и проведенным не нём исследованиям [1,2]. Результаты сравнения численного моделирования и эксперимента показали, что предложенная расчетная схема удовлетворяет экспериментальным данным и может быть использована для дальнейших исследований задач с закруткой потока в каналах судовых ЯЭУ.

В настоящей работе посредством численного моделирования было проведено исследование теплогидравлических процессов в трубопроводах судового парогенератора блочного типа ПГ-28. Были рассмотрены особенности закрученного течения теплоносителя и их влияние на гидродинамику, теплообмен и генерацию акустических колебаний в условиях движения рабочего тела на различных участках змеевиковых каналов. Результаты расчета показали, что система гибов в различных плоскостях на подводящем к змеевику участке канала, а также наличие диффузора приводят к образованию возвратного течения, формирующего рециркуляционную зону движения прокачиваемой среды, что характерно для явления кризиса закрученного потока [3]. Подобная структура течения создает дополнительное гидравлическое сопротивление в канале, а также генерирует низкочастотную составляющую акустического спектра. Следствием этого являются увеличение мощности на прокачку теплоносителя и возникновение резонансных эффектов, что отрицательно сказывается на прочности и шумности всей установки в целом.

Расчетное исследование внутри каналов ПГС интегрального типа выявило похожую закономерность формирования возвратного течения в области диффузора перед входом в теплообменный кольцевой участок. Для выполнения расчетов характеристик теплообмена в подобных сложных кольцевых каналах с витыми трубами было дополнительно проведено исследование на примере сравнения полученных результатов коэффициента теплоотдачи с данными широкой серии тепловых измерений на экспериментальной установке, описанной в работе [4]. Сравнение показало, что численный алгоритм теплового расчета имеет ряд нюансов, связанных с корректностью определения коэффициента теплоотдачи. Более точное определение коэффициента теплоотдачи дает результат, попадающий в доверительный интервал экспериментальных данных. Это позволяет использовать данную методику для адекватного моделирования теплогидравлики парогенераторов интегрального типа.

Библиографический список

1. Баринов А.А. Расчетно-экспериментальное моделирование нестационарных процессов смешения потоков теплоносителя в перспективных ЯЭУ для АЭС малой мощности / А.А. Баринов: дис. ... канд. тех. наук: 05.14.03. - Н.Н., 2020. - 192 с.

2. Баринов А.А. Экспериментальные исследования процессов турбулентного смешения в основном оборудовании ЯЭУ / А.А. Баринов [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. - 2018. - № 3 - С. 120-126.

3. Митрофанова О.В., Ивлев О.А., Уртенев Д.С., Федоринов А.В. Оценка влияния кризисного течения закрученного потока на теплогидравлическую эффективность судовых ядерных энергетических установок // Тепловые процессы в технике. 2019. Т. 11. №6. С. 242-249.

4. Будов В.М., Дмитриев С.М. Форсированные теплообменники ЯЭУ. М.: ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ, 1989. С. 98-113.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда: грант РФФ № 23-29-00373, <http://rscf.ru/project/23-29-00373/>.

Леманов В.В., Шаров К.А. Лукашов В.В., Лапиков М.М.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 1

ВИХРЕВЫЕ СТРУКТУРЫ PUFF В БЛИЖНЕМ ПОЛЕ СТРУИ

Начиная с работ [1] когерентные структуры прочно вошли в арсенал струйных течений. С помощью таких больших вихрей возможно управление процессами теплообмена и смешения в струйных устройствах. В трубах во время ламинарно-турбулентного перехода возникают мощные вихревые образования, в иностранной литературе именуемые puff, которые при истечении из труб могут быть использованы для аналогичных задач [2]. В работе исследуется поведение и характеристики вихревых турбулентных структур (puff) в ближнем поле струи при истечении из трубы.

Струи истекали из длинных осесимметричных каналов диаметром $d = 3-8$ мм в воздушное пространство при низких числах Рейнольдса 2000–4000 и атмосферном давлении. В качестве рабочего тела использовались воздух и двуокись углерода (CO_2). В процессе эксперимента искусственные возмущения, как в трубке, так и в струе не вносились. Для диагностики потока использовали термоанемометр и скоростной 2DPIV. Измерялись распределение средней скорости и пульсаций скорости в начальном сечении (CO_2), коэффициент перемежаемости в начальном сечении ($x/d = 0,17$) и на расстоянии $x/d = 20$ (воздух). Основной акцент был сделан на измерении полей скоростей посредством PIV с частотой 7 кГц в плоскости, проходящей через ось струи с измерительной областью 63х63 мм, которая включала начало струи CO_2 .

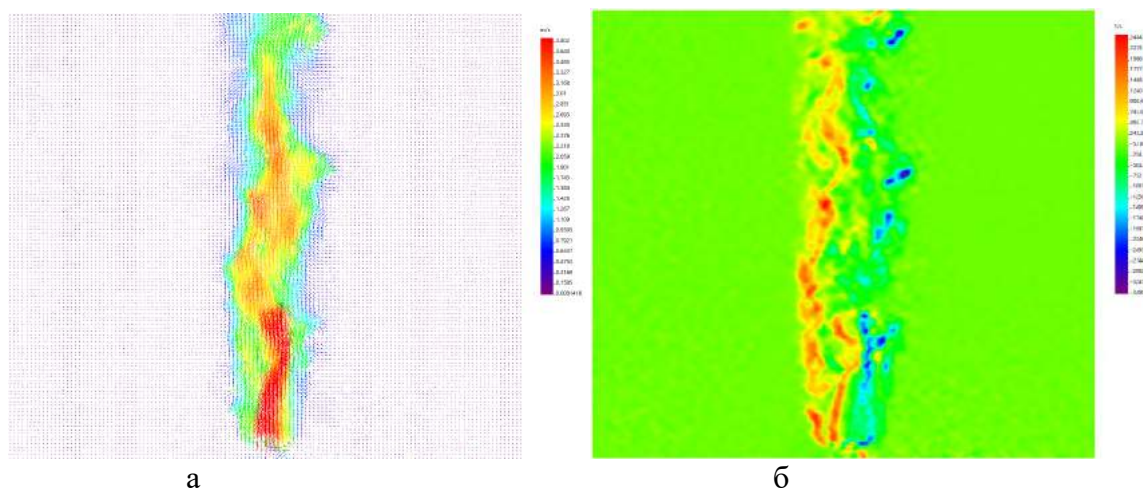


Рис. 2. Поля скоростей (а) и завихренности (б) струи CO₂ при прохождении турбулентной структуры puff.

Были получены поля скорости и завихренности (рис. 1) для случая прохождения puff в ближнем поле инертной струи. Использование высокоскоростного PIV дает возможность проследить изменение пространственной структуры струи с временным разрешением 143 мкс и пространственным 100 мкм. В соответствии с универсальным сценарием перехода к турбулентности в струях через перемежаемость мы выделяем “ламинарную” стадию в отсутствие в ближней области puff, и “турбулентную” стадию, когда puff присутствует. На “ламинарной” фазе в плоскости (x,r) наблюдается безвихревое ядро вблизи оси струи, и максимальная завихренность при этом симметрично сосредоточена на периферии, что вызвано развитием неустойчивости Кельвина-Гельмгольца в слое смешения струи. На стадии прохождения puff можно диагностировать протяженное вдоль оси x возмущение (20-30d) с плавным передним и крутым задним фронтом. Puff характеризуется временной динамикой и сложным пространственным строением. Во время его движения в струе заметно увеличивается уровень флуктуаций скорости, что увеличивает завихренность во всей области puff. В момент максимального снижения скорости на оси струи до значения ~ 0.25 скорости ламинарного течения (рис. 1, а) в приосевой области puff наблюдается синусоидальное возмущение, которое приводит к формированию локализованных вихрей (рис. 1, б). Ниже по течению динамика этих вихрей становится более хаотичной. Интенсивное вихреобразование приводит к существенному росту струи в радиальном направлении до значений 3-4d.

На основе полей скоростей, измеренных скоростным PIV, измерена временная автокорреляционная функция на оси струи в сечении $x = 60$ мм где x – продольная координата от среза трубки вдоль оси. Пространственные интегральные масштабы в турбулентном потоке составляет $l/d=0.04$, где l – интегральный масштаб. В то же время продольные масштабы puff составляют $l/d=9-23$.

Библиографический список

1. S.C. Crow, F.H. Champagne. Orderly structure in jet turbulence. \ Journal Fluid Mechanics, 1971. 48. С. 547-591. DOI:10.1017/S0022112071001745

2. V. Lemanov, V. Lukashov, K. Sharov. Hydrogen vortex flow impact on the catalytic wall. \ Energies, 2023. 16. 104. <https://doi.org/10.3390/en16010104>

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 23-29-00584

Шишкин Н.Е.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. ак. Лаврентьева, 1

КРИТЕРИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ЗАКРУТКИ ПОТОКА

В 1964 г. Chigier & Beer [1] исследуя вихревое движение затопленной струи, предложили интенсивности закрутки оценивать по ОТНОШЕНИЯМ:

$$\Phi = \frac{M_s}{K_x \cdot R_K} \quad \text{или} \quad \Phi_* = \frac{M_s}{K_{x*} \cdot R_K},$$

где M_s – осевая составляющая потока момента количества движения:

$$M_s = 2\pi \int_0^{R_K} \rho \cdot V_x \cdot V_\varphi \cdot r^2 dr,$$

а K_x или K_{x*} - осевая составляющая полного потока количества движения:

$$K_x = 2\pi \int_0^{R_K} (p + \rho \cdot V_x^2) \cdot r dr \quad \text{или} \quad K_{x*} = 2\pi \int_0^{R_K} \rho \cdot V_x^2 \cdot r dr.$$

К сожалению, этот критерий может использоваться только при наличии аксиального течения. Большой класс течений: вихревые камеры, вихревые трубы Ранка-Хилша и др. остаются неохваченными вследствие близости к нулю знаменателя. Даже определяемый M_s , также подвержен в расчетах влиянию V_x . Несмотря на многие ограничения, он до сих пор широко используется, остается единственным.

Если упростить уравнение движения в радиальном направлении, умножить его на радиус, то получим момент импульса закрученного течения. Далее сделаем преобразования как это показано ниже

$$\frac{\partial P}{\partial r} = \rho \frac{V_\varphi^2}{r}, \quad \frac{r}{P} \frac{\partial P}{\partial r} = kM_\varphi^2 \quad \text{или} \quad \frac{\partial(\ln P)}{\partial(\ln r)} = kM_\varphi^2,$$

где $M_\varphi = V_\varphi / a$, $a = \sqrt{kP/\rho}$ - скорость звука, k – коэффициент адиабаты.

Значение kM_φ^2 характеризует безразмерный момент вихревого движения в локальных точках. Ранее автором [2] была показана аналогия наиболее важных параметров при смешении в закрученном потоке. В их число входит и распределение V_φ^2 , также показанное на рис. 1. Приведенные на рисунке в безразмерном

виде $V_{\varphi}^2/V_{\varphi,max}^2$ (отнесено к максимальным значениям у стенки) идентичны отношениям

$$kM_{\varphi}^2/(kM_{\varphi,max}^2).$$

Таким образом, для оценки интенсивности закрутки потока можно указывать только безразмерный момент импульса, записанный в виде

$$I_{\varphi} = kM_{\varphi}^2$$

Тогда как Φ [1], для которого необходимо подставлять значение полного импульса в знаменатель, становится ограничением для слабых аксиальных течений.

Следует отметить, что I_{φ} обратная величина числа Эйлера, известного критерия в газовой динамике. Только вместо полной скорости в расчетах используется вращательная компонента.

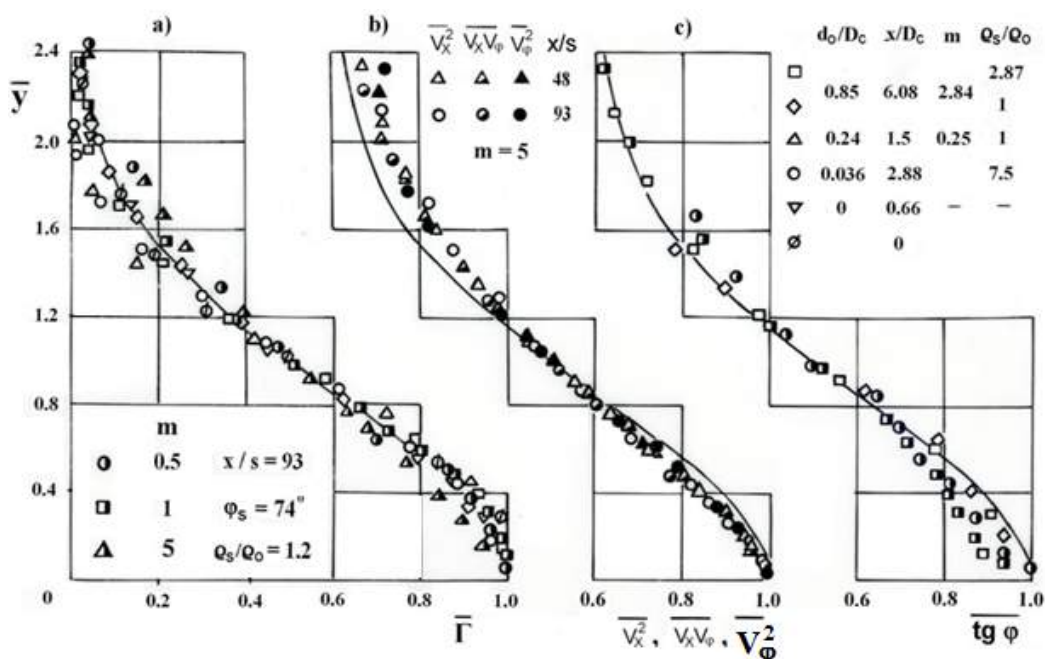


Рис. 1. Профили циркуляции, кинетической энергии в осевом и окружном направлениях, угла закрутки ($\text{tg } \varphi$). Линии - кривая Гаусса.

Библиографический список

1. N.A. Chigier and J.M. Beer. Velocity and static pressure distributions in swirling air jets issuing from annular and divergent nozzles \ \ Trans ASME, J. Basic Eng, 1964, Vol. 86, No.4, P. 788–796.
2. Н.Е. Шишкин. Распределение температуры и скорости газа в трубе при струйном смешении в закрученном потоке \ \ Вихревой эффект и его промышленное применение: Материалы III Всесоюзной конференции. Куйбышев. 1981. С. 371-375.

Болтенко Э.А.

Акционерное общество «Электрогорский научно-исследовательский центр по безопасности атомных электростанций», 142530, Россия, Московская обл., г. Электрогорск, ул. Святого Константина, д. 6

ПОВЫШЕНИЕ КРИТИЧЕСКИХ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ В ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРКАХ С ТРУБЧАТЫМИ ТВЭЛАМИ

В докладе рассмотрены методы интенсификации для ТВС со стержневыми и трубчатыми твэлами. Показано, что на вогнутой поверхности известные методы интенсификации позволяют увеличить критический тепловой поток (КТП), на выпуклой поверхности методов интенсификации теплосъема практически нет.

В РУ с трубчатыми твэлами теплосъем осуществляется как с выпуклой, так и с вогнутой теплоотдающих поверхностей.

В докладе для повышения теплосъема и запасов до кризиса теплоотдачи на выпуклой теплоотдающей поверхности трубчатого твэла рассмотрен метод интенсификации теплосъема, основанный на взаимодействии закрученного и транзитного потоков, движущихся по выпуклой теплоотдающей поверхности. Представлены зависимости для определения интенсивности теплосъема и кризиса теплоотдачи на вогнутых и выпуклых теплоотдающих поверхностях.

Представлена методика расчета теплогидравлических характеристик ТВС с трубчатыми твэлами (модель эквивалентного кольцевого канала). Выполнена оценка запасов до кризиса теплоотдачи в ТВС с трубчатыми твэлами. Запасы до кризиса в этих работах определены традиционным методом, т.е. по сравнению локального теплового потока и КТП в этом сечении. Запасы до кризиса составили 3,4 для выпуклой и 2,9 для вогнутой теплоотдающих поверхностей трубчатого твэла, что более чем в два раза выше запасов до кризиса обычных стержневых твэлов.

Библиографический список

1. Ю.А. Кузма-Кичта Методы интенсификации теплообмена. М.: Изд.-во МЭИ, 1994.

3. Болтенко Э.А. Кризис теплоотдачи и распределение жидкости в парогенерирующих каналах.- М.: Радуга, 2015г. 280с.

1. 3. Патент России 2220464 МПК³ G21C3/00, Тепло выделяющая сборка /В.Н. Блинков, Э.А. Болтенко// Заявка № 2002104121, от 20.02.2002, опубликовано 2003. Бюл. №36.

4. Патент РФ на изобретение 2680175 С1, МПК³ F28F13/12. Способ повышения теплосъема на выпуклых теплоотдающих поверхностях теплопередающих устройств и устройство для его осуществления / Э.А. Болтенко //Заявка №2016142832/28, от 31.10.2016, опубликовано 03.05.2018, Бюл. №13/ Опубликовано: 18.02.2019. Бюл. №5.

5. Патент России 2794744 МПК³ G21C3/00(2006.01), Способ повышения критических тепловых потоков в тепло выделяющей сборке с трубчатыми

твэлами /В.Н. Блинков, Э.А. Болтенко// Заявка № 202211274, от 04.05.2022, опубликовано 24.04.09.2023. Бюл. №12.

6. Э.А. Болтенко Исследование кризиса теплоотдачи на теплоотдающих поверхностях кольцевых каналов с закруткой и транзитным потоком / Теплоэнергетика, 2016, №10 с. 42-47.

СЕКЦИЯ 2. ГОРЕНИЕ ПРИ ЗАКРУТКЕ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ

Гурьянов А.И., Евдокимов О.А

Рыбинский государственный авиационный технический университет имени
П.А. Соловьева,
Рыбинск, 152934, ул. Пушкина, 53

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ РЕЖИМЫ ГОРЕНИЯ В ПРОТИВОТОЧНОМ ЗАКРУЧЕННОМ ТЕЧЕНИИ

Организация горения в противоточных закрученных течениях обеспечивает выполнение спектра требований к перспективным энергоустановкам, включая широкий диапазон устойчивой работы на нестехиометрических режимах, эффективную тепловую защиту термически напряженных элементов конструкции, сверхнизкие значения эмиссии загрязняющих атмосферу веществ, в том числе монооксида углерода CO и оксидов азота NO_x [1–3].

Несмотря на перспективные показатели противоточных вихревых горелок и камер сгорания, определяющая их нестационарная турбулентная структура течения изучена недостаточно. В частности, в литературе практически отсутствуют опубликованные результаты экспериментальных и расчетных исследований пульсаций скорости противоточного течения и прецессии вихревого ядра в изотермической и реагирующей постановке, полученные как современными оптическими методами диагностики потоков, так и с помощью вихреразрешающего моделирования. Также не полностью раскрыта взаимосвязь между геометрией противоточной вихревой камеры и интегральными характеристиками устройства.

В работе рассмотрены нестационарные режимы горения газообразного топлива в противоточном закрученном течении, формируемом в оптически прозрачной вихревой камере (рис. 1). Выполнена визуализация положения пламени с одновременным измерением полей скорости бесконтактным методом PIV.

Результаты экспериментальных исследований противоточных камер с относительной длиной цилиндрического участка равной 2.0, 4.0 и 6.0 калибров показали наличие семи основных режимов горения в противоточном течении: режима воспламенения, режима объёмного горения в цилиндрической камере, переходного режима от объёмного горения в цилиндрической камере к внешнему диффузионному горению, внешнего диффузионного горения, переходного режима от внешнего диффузионного горения к внутреннему горению вблизи соплового ввода, переходного режима от внешнего диффузионного горения к внутреннему объёмному горению, режима бедного срыва пламени.

Результаты бесконтактных оптических исследований методом PIV также позволили выявить фундаментальные особенности структуры противоточных закрученных течений в изотермической и реагирующей постановках. Определено, что по всей длине цилиндрической части противоточной камеры происходит непрерывное перераспределение между окружной и осевой составляющими

скорости, вызванное взаимодействием периферийного и приосевого вихрей. При этом наиболее интенсивное взаимодействие наблюдается в срединном сечении цилиндрической области и связано с частичным разворотом периферийного потока в осевом направлении.



Рис. 3. Экспериментальная модель противоточной вихревой камеры

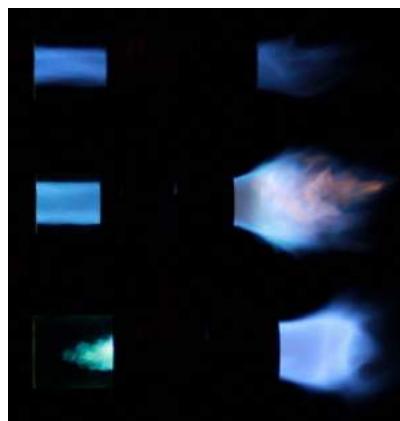


Рис. 2. Режимы горения в противоточном закрученном течении

Библиографический список

1. Guryanov A.I. et al. Criterion analysis and experimental study of combustion mechanisms in a bidirectional swirling flow and their relationship with pollutants emission // Int J Energy Res. 2021. Vol. 45, № 4. P. 5500–5516.
2. Badernikov A.V. et al. A Study of Walls Thermal Conditions for a Bidirectional Vortex Combustor // Heat Transfer Engineering. 2022. P. 1–14.
3. Yu N. et al. Experimental and simulation study of a Gaseous oxygen/Gaseous hydrogen vortex cooling thrust chamber // Acta Astronautica. 2016. Vol. 118. P. 11–20.

Работа выполнена в рамках государственного задания на выполнение фундаментальных научных исследований (шифр научной темы FSSG-2023-0002)

**Ашихмин А.Е., Дюпин А.А., Верходанов Д.А., Пискунов М.В.,
Стрижак П.А.**

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Томск, 634050, пр. Ленина, 30

РАСПЫЛЕНИЕ И ГОРЕНИЕ БИОТОПЛИВА, ПРИГОТОВЛЕННОГО ПРИ ОДНОЭТАПНОЙ ПЕРЕЭТЕРИФИКАЦИИ В НАНОМЕМБРАННОМ РЕАКТОРЕ

Биотопливо обладает огромным потенциалом в качестве топлива для энергетического сектора и двигателей внутреннего сгорания, так как может быть из-

готовлено из широкого ряда доступных ресурсов (масла, жиры, сельскохозяйственные отходы и т.д.). Преимуществами использования биотоплива являются снижение количества твердых частиц (PM), нейтральность углерода, сокращение выбросов парниковых газов, утилизация отходов, энергетическая и экономическая безопасность, к тому же биотопливо все меньше и меньше зависит от нефти как источника энергии.

Представленные в многочисленных работах результаты по распылению, зажиганию и горению биодизельных топлив относятся по большей части к дизельным двигателям [1]. Однако все ещё остаются актуальными вопросы использования биотоплива в существующих энергетических установках.

Исследуемое биотопливо получено путем одноэтапной переэтерификации в мембранном нановолокнистом реакторе. Данный подход позволяет существенно снизить время приготовления биотоплива, а также снизить трудозатраты, оптимизируя этапы классической технологии производства метиловых эфиров жирных кислот. Измерены физические свойства приготовленных топлив (цетановое число, температура вспышки в закрытом тигле, кинематическая вязкость, плотность, коэффициент поверхностного натяжения, теплота сгорания), а также получены результаты их масс-спектропии. Проведен сравнительный анализ характеристик полученных топлив с учетом ГОСТ.

Экспериментальное исследование проводилось на лабораторном стенде с вихревой горелкой, оборудованной камерой сгорания с оптическим доступом и системой рециркуляции дымовых газов. Схема стенда представлена на рисунке 1.

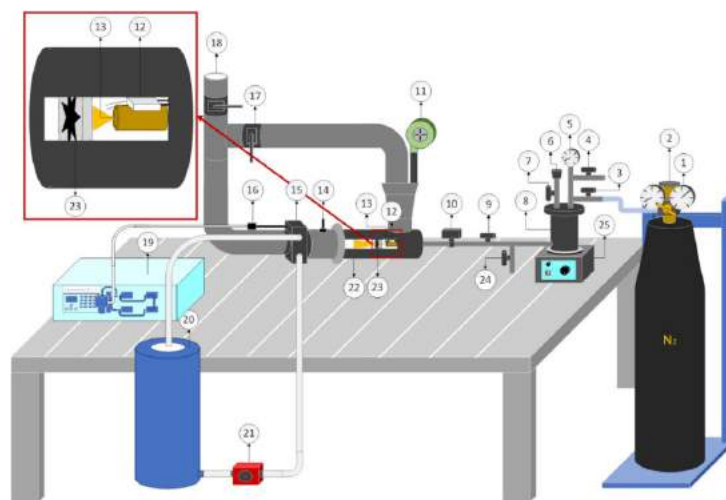


Рис. 1 – Схема лабораторного стенда:

- 1 – азотный редуктор газового баллона; 2 – газовый баллон; 3, 4, 24 – регулирующий клапан; 5 – манометр; 6 – узел загрузки топлива; 7, 9 – шаровой кран; 8 – резервуар хранения топлива; 10 – электрический клапан; 11 – центробежный вентилятор; 12 – электроды воспламенения; 13 – дизельная форсунка; 14 – датчик концентрации кислорода; 15 – первичный теплообменник; 16 – зонд-щуп газоанализатора; 17 – дроссель-клапан; 18 – патрубок выпуска дымовых газов в атмосферу; 19 – газоанализатор; 20 – бак; 21 – циркуляционный насос; 22 – камера сгорания с оптическим доступом; 23 – завихритель потока; 25 – магнитная мешалка

В результате испытаний по распылению исследуемых топлив получены зависимости количества фрагментов и среднего размера распыленных капель от массового расхода топлива. Приведены зависимости температуры в камере сгорания от массового расхода топлива, а также времена сгорания от концентрации биотоплива в составе. Представлены концентрации CO, CO₂, NO_x в дымовых газах при сжигании биотоплива.

Библиографический список

1. Chen Y, Ma J, Han B, Zhang P, Hua H, Chen H, et al. Emissions of automobiles fueled with alternative fuels based on engine technology: A review. J Traffic Transp Eng (English Ed 2018;5:318–34.

Работа выполнена при поддержке программы развития «Приоритет 2030» (Приоритет 2030-НИП/ЕБ-038-1308-2022)

Веселов К.Е., Евдокимов О.А.

ФГБОУ ВО Рыбинский государственный авиационный университет им П.А. Соловьева, 152934, Рыбинск, Пушкина, 53
ПАО ОДК Сатурн, Рыбинск 152903, пр. Ленина, 163

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧИ ГОРЕНИЯ ЖИДКОГО ТОПЛИВА В ЗАКРУЧЕННОМ ВОЗДУШНОМ ПОТОКЕ

В промышленности активно развито применение закрученных потоков для интенсификации протекающих процессов. Типичным примером является камера сгорания газотурбинных двигателей (ГТД), в которой реализуется целый комплекс теплофизических процессов, что говорит о сложности устройства. Кроме того, ограничены и методы экспериментальных исследований камер сгорания ГТД: зачастую проведение эмпирических исследований требует применения упрощенных газодинамических моделей.

Последние десятилетия в практику решения исследовательских задач внедряется численное моделирование для изучения рабочего процесса камер сгорания, которое, с учетом адекватной валидации, обеспечивает достоверность в прогнозировании протекания процессов. В настоящее время не существует единого подхода к численному моделированию газодинамики и горения в энергетических установках, что определяет необходимость индивидуальной настройки решаемой системы уравнений в рамках отдельных теплофизических решений, что ограничивает их применимость.

Валидация условий моделирования рабочего процесса сжигания топлива на более простых задачах имеет особое практическое значение.

Цель настоящей работы состоит в разработке валидационного подхода к моделированию комплекса протекающих в камере сгорания процессов, который обеспечит возможность получения достоверных результатов в приемлемые

сроки. Для этого рассмотрены стационарные и нестационарные подходы к моделированию турбулентности (RANS и URANS) с замыканием на основе распространенных моделей турбулентности, а также гибридный вихререзающий подход DES в совокупности с PDF Flamelet моделью описания горения жидкого керосина.

В рамках работы проведен анализ результатов моделирования на основе сопоставления с данными бесконтактных оптических измерений на основе методов PIV и CARS [1,2].

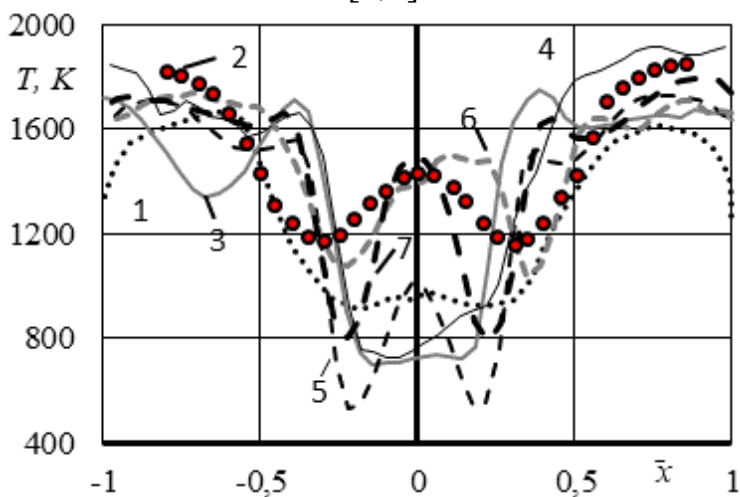


Рис. 1. Распределение температуры в сечении камеры на высоте $h=0,625x$:
 1 - LES [1], 2 - CARS [2] (эксперимент),
 3 - RSM SSG, 4 - SST стационар,
 5- SST нестационар, 6 – DES, 7 - SAS-SST,
 x - половина ширины камеры

Исследование процесса сжигания топлива в модельной камере сгорания с двухрядным фронтным закручивающим устройством позволило выявить особенности применения рассмотренных моделей турбулентности и гибридных вихререзающих подходов в совокупности с относительно подробной кинетической-химической схемой реакций (883 реакции без учета образования NO_x) для корректного описания распределения скоростей и температуры в зоне горения. На основе полученных данных

сделан вывод о наиболее корректном моделировании процессов газодинамики и горения при использовании нестационарной постановки с использованием гибридных вихререзающих подходов, заключающихся в использовании LES подхода в ядре течения и RANS - моделирования вблизи стенок – что реализовано в DES подходе. Применение SAS-SST модели позволяет достигать большей точности в сравнении с URANS-моделированием.

На основе сопоставительного анализа получен вывод о необходимости применения нестационарных подходов для получения требуемого соответствия, а также необходимости дальнейшего исследования процесса горения жидкого топлива с акцентом на моделировании многофазной газодинамики и теплообмена, а также детального рассмотрения химических механизмов: в области двухфазных течений наблюдается наибольшее несоответствие расчетных данных относительно эксперимента (рис.1).

Библиографический список

1. Eckel G. et al. LES of a swirl-stabilized kerosene spray flame with a multi-component vaporization model and detailed chemistry // Combustion and Flame. 2019. Vol. 207. P. 134–152.

2. Grohmann J. et al. Comparison of the Combustion Characteristics of Liquid Single-Component Fuels in a Gas Turbine Model Combustor // Volume 4A: Combustion, Fuels and Emissions. Seoul, South Korea: American Society of Mechanical Engineers, 2016. P. V04AT04A010.

Гайдукова О.С., Дорохов В.В., Стрижак П.А., Шлегель Н.Е.
Томский политехнический университет,
Томск, 634050, пр. Ленина, 30

ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС И ДИСПЕРГИРОВАНИЕ ПРИ НАГРЕВЕ КОМПОЗИЦИОННОГО ТОПЛИВА

Композиционные топлива отличаются повышенными экологическими свойствами и производятся с активным вовлечением местных энергоресурсов [1]. К настоящему времени энергетическое использование газовых гидратов сдерживается отсутствием технологических решений, позволяющих обеспечивать условия устойчивого и безопасного зажигания, а также максимально полного и экологичного выгорания топлива с минимизацией эффектов захлаживания стенок камеры сгорания, вследствие эффекта самоконсервации. Добавление рапсового масла в качестве биотоплива к газовому гидрату позволит получить экологичное и энергоэффективное композиционное топливо. Цель настоящей работы – определение критических условий зажигания образцов композиционного жидкого топлива на основе гранул гидрата метана и жидкого биотоплива в

виде рапсового масла на основе результатов экспериментальных исследований.

В качестве образцов газового гидрата использовались гранулы гидрата метана с пористостью 28–32%. В качестве жидкого горючего компонента использовалось рапсовое масло (ГОСТ 31759-2012).



Рис. 4. Схема экспериментального стенда

Для определения характеристик зажигания и горения исследуемых топлив использовался экспериментальный стенд, представленный на рис. 1.

На рис. 2 представлены типичные видеок cadры, полученные при регистрации характеристик зажигания исследуемых топлив. Зажигание газового гидрата (рис. 2, а) включало два этапа. Сперва инициировалось зажигание в процессе диссоциации метана и кипения талой воды, а затем инициировалось горение в приповерхностном слое газового гидрата с малым размером пламенной зоны. Зажигание метана после его диссоциации происходит в нижней зоне муфельной печи. Такой эффект обусловлен тем, что, когда образец топлива помещается в

муфельную печь, его держатель прогревается значительно быстрее. Как следствие, за счет эффекта Лейденфроста происходит диспергирование капелек воды. Этот фактор способствует разбрызгиванию гидрата по камере сгорания.

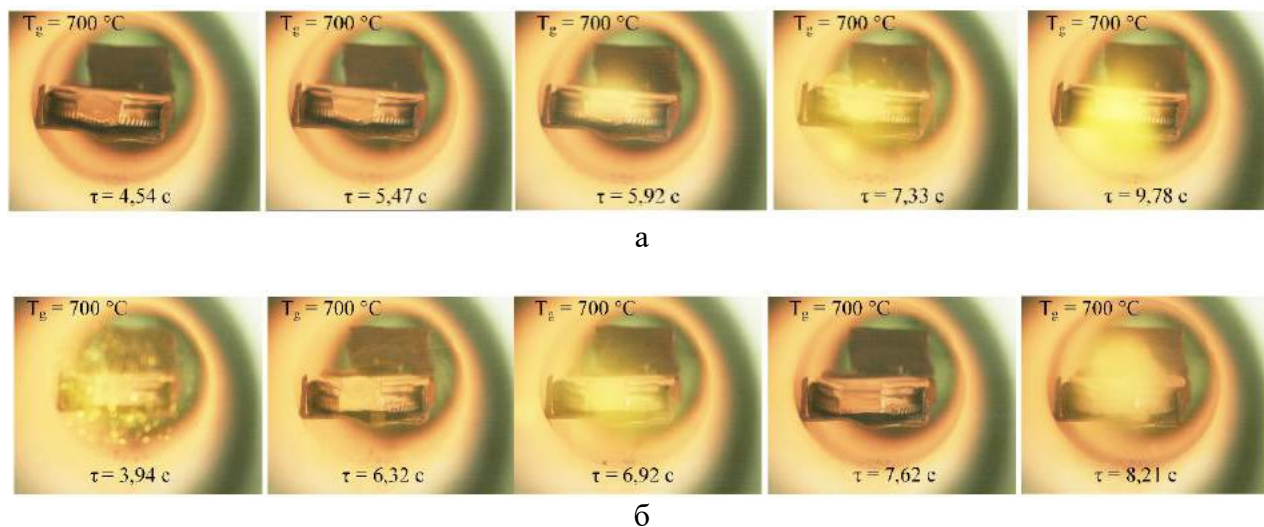


Рис. 2. Видеофрагменты воспламенения образцов исследуемых топлив: а – гидрат метана; б – рапсовое масло с гидратом метана

При совместном сжигании гидрата метана и рапсового масла (рис. 2, б) сперва происходило зажигание диссоциирующего метана и паров рапсового масла, сопровождающееся диспергированием микрокапель жидкости. Далее инициировалось воспламенение рапсового масла, прогретого до критических температур. Так как в образце топлива с маслом присутствует гидрат, то при его диссоциации определенный объем воды остается. Формируется граница раздела вода/масло. Этот фактор приводит к диспергированию образца в режимах микровзрыва и паффинга при диспергировании размер гранул гидрата и капелек масла менее 0,3 мм. Это приводит к быстрой диссоциации и локальному зажиганию гидрата метана, попавшего на стенки трубчатой печи. После зажигания метана скорость прогрева рапсового масла увеличивается в несколько раз. Это приводит к снижению времени задержки зажигания.

Библиографический список

1. Y. Wei, Z. Zhang, X. Li, G. Li, M. Zhou, B.Y. Belal. The ignition characteristics of dual-fuel spray at different ambient methane concentrations under engine-like conditions \ Applied Thermal Engineering, 2022. Article number 119634.

Работа выполнена при поддержке гранта Приоритет-2030-НИП/ЭБ-006-375-2023.

Евдокимов О.А., Гурьянов А.И.

Рыбинский государственный авиационный технический университет имени
П.А. Соловьева,
Рыбинск, 152934, ул. Пушкина, 53

ГАЗОДИНАМИКА И ГОРЕНИЕ В МАССИВАХ ПРОТИВОТОЧНЫХ ЗАКРУЧЕННЫХ СТРУЙ

Исследования противоточных вихревых горелок показывают, что при определенных геометрических и режимных параметрах за выходным соплом устройства формируется противоточное коаксиальное течение, обладающее перспективными для энергетики характеристиками. Использование таких течений в форме массива позволит значительно расширить границы применимости технологии горения в структурированных системах и создать комплекс эффективных устройств сжигания топлива для авиации и энергетики.

Противоточные закрученные течения, как отмечается в ряде публикаций [1,2] и результатах собственных исследований [3,4], характеризуются возможностью организации горения как в сверхбогатых ($\alpha < 0.2$), так и ультрабедных ($\alpha > 15$) условиях. При этом наиболее стабильный рабочий процесс наблюдается при $0.5 < \alpha < 1.0$, а область минимальных значений эмиссии NO_x и CO соответствует $1.5 < \alpha < 2.0$. Также важно отметить, что весь диапазон режимов противоточных горелочных устройств характеризуется пониженными значениями вредных выбросов по сравнению с устройствами-аналогами, что обеспечивает большую вариативность в выборе рабочих параметров.

Характерной особенностью нереагирующего противоточного закрученного течения является формирование коаксиальной структуры внутри устройства-генератора (рис. 1). Организация горения приводит к смещению указанной структуры вниз по потоку, а ее положение и условия формирования на режимах работы $0.7 < \alpha < 1.0$ являются более выраженными и предпочтительными по сравнению с режимами $\alpha > 1.0$.

Коаксиальная противоточная структура течения, характеризующаяся наличием центральной зоны рециркуляции, окруженной реагирующим закрученным потоком, сопряжена с уменьшением пульсаций скорости и температуры внутри вихревой горелки-генератора, что позволяет рассматривать ее в качестве элемента пространственных многофорсуночных систем сжигания топлива. Для решения данной задачи выбран метод численного моделирования, основанный на верифицированных подходах к определению параметров противоточного закрученного течения с горением.

В качестве исследуемой модели спроектирована система, состоящая из 9 противоточных струй, расположенных в виде квадрата 3×3 с расстоянием между горелками-генераторами, равным их диаметру. В качестве центрального элемента массива использовалась тороидальная вихревая горелка, а периферийные струи генерировались цилиндрическими противоточными камерами. Результаты исследований показали, что наиболее интенсивное взаимодействие элементов

такой системы достигается в области, расположенной за центральным рециркуляционным течением, которое в данном случае играет стабилизирующую роль (рис. 2). При этом увеличение площади фронта пламени в исследованном массиве обеспечивает повышение величины осредненной массовой скорости выгорания на 68% по сравнению со случаем горения в одиночной противоточной струе, генерируемой в цилиндрической вихревой камере.

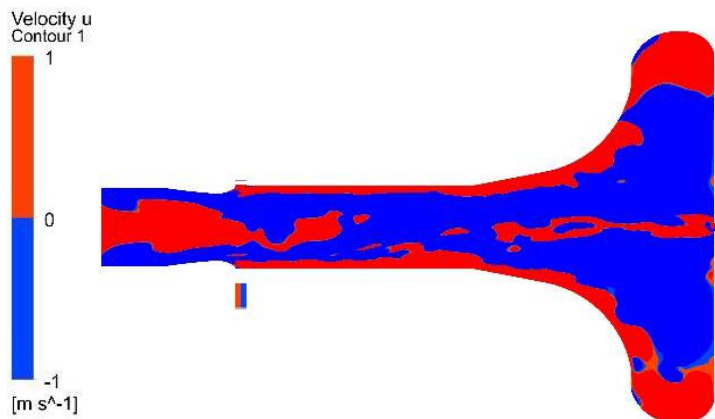


Рис. 5. Мгновенная реализация осевой скорости в продольном сечении профилированной противоточной вихревой камеры

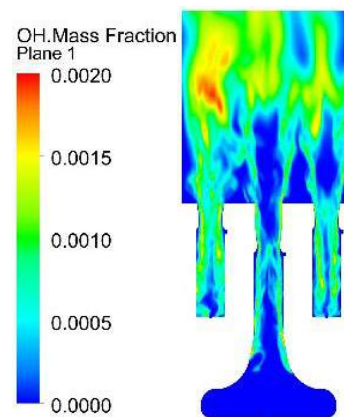


Рис. 2. Структура фронта пламени в массиве противоточных закрученных струй

Библиографический список

1. Гупта А., Лилли Д., Сайред Н. Закрученные потоки. М.: Мир, 1987. 588 с.
2. Majdalani J., Chiaverini M.J. Characterization of GO₂–GH₂ Simulations of a Miniature Vortex Combustion Cold-Wall Chamber // Journal of Propulsion and Power. 2017. Vol. 33, № 2. P. 387–397.
3. Guryanov A.I. et al. Criterion analysis and experimental study of combustion mechanisms in a bidirectional swirling flow and their relationship with pollutants emission // Int J Energy Res. 2021. Vol. 45, № 4. P. 5500–5516.
4. Guryanov A.I. et al. An experimental study of syngas combustion in a bidirectional swirling flow // International Journal of Hydrogen Energy. 2022. P. S036031992205162X.

Работа выполнена в рамках государственного задания на выполнение фундаментальных научных исследований (шифр научной темы FSSG-2023-0002)

Гурьянов А.И., Комова О.В.

ФГБОУ ВО Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьёва,
152934, Рыбинск, ул. Пушкина ул., 53

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЕРХБЕДНЫХ РЕЖИМОВ ГОРЕНИЯ СИНТЕТИЧЕСКОГО ТОПЛИВА НА ОСНОВЕ ВОДОРОДА В УСЛОВИЯХ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ПРОТИВОТОКА

В настоящее время к камерам сгорания газотурбинных установок (ГТУ) для осуществления экологической безопасности предъявляются все более жесткие требования на уровень выбросов в атмосферу загрязняющих веществ от сжигания топлива в виде оксидов азота NO_x , монооксида углерода CO , несгоревших углеводородов C_xH_y , поэтому проблема снижения выбросов токсичных веществ является актуальной. Решить проблему уменьшения выбросов NO_x удастся при переходе в область бедного горения. Однако при этом возникает проблема существенного снижения полноты сгорания топлива и рост эмиссии CO и несгоревших углеводородов C_xH_y . Для улучшения экологических характеристик по всем видам загрязняющих веществ необходимы новые способы сжигания углеводородного топлива [1].

Было проведено исследования горения бедных и сверхбедных смесей углеводородного топлива (CH_4) с многокомпонентным водородсодержащим топливом (МВТ) в противоточном горелочном устройстве (ПГУ). Также был выявлен эффект влияния добавок МВТ на эмиссионные характеристики горения.

Было установлено, что при добавлении 15 % МВТ к метану в условиях ПГУ при горении сокращается эмиссия оксидов азота NO_x в 1,5 раза относительно горения чистого метана. При коэффициенте избытка воздуха $\alpha > 5$ значение концентрации NO_x в продуктах сгорания находится в нуле. Это подтверждает целесообразность применения топливных смесей метана с МВТ для снижения эмиссии оксидов азота NO_x в перспективных камерах сгорания газотурбинных двигателях. При переводе противоточного горелочного устройства с метана на МВТ существенно снижается концентрация монооксида углерода CO и несгоревших углеводородов C_xH_y для коэффициента избытка воздуха в области бедного горения до $\alpha = 5$.

В области сверхбедных режимов горение МВТ сопровождается значительным увеличением концентрации CO и C_xH_y при коэффициенте избытка воздуха, лежащего в пределах $5 < \alpha < 18$. Это объясняется тем, что в области сверхбедных режимов горение углеводородов практически прекращается, а тепло экзотермической реакции, обеспечивающее устойчивость горения, выделяется при окислении водорода, который входит в состав МВТ. В сверхбедном режиме при $\alpha \approx 13$ происходит «остановка» реакции окисления CO до CO_2 .

Добавка МВТ в диапазоне от 7 % до 80 % сопровождается расширением концентрационного диапазона устойчивого горения до $\alpha=18$. Это можно объяс-

нить тем, что в составе МВТ присутствуют активные промежуточные компоненты, обусловленных развитием цепного механизма протекания процессов горения.

Исследования горения МВТ в ПГУ подтвердили возможность организации сверхбедных режимов горения, а также обеспечения температуры продуктов сгорания на выходе из ПГУ. При увеличении α от 4 до 14, температура газов на выходе уменьшается от 1250 °С до 600 °С. При этом режим горения в ПГУ является устойчивым без пульсаций температуры и возникновения механизмов виброгорения.

Библиографический список

1. Guryanov AI et al., An experimental study of syngas combustion in a bidirectional swirling flow, International Journal of Hydrogen Energy, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.11.004>

Работа выполнена в рамках гранта РНФ 22-29-20220.

Потапов В.Н., Костюнин В.В., Костюнина Т.В.

УрФУ им.первого Президента России Б.Н.Ельцина, Екатеринбург, 620002,
Мира, 19

ООО «Vortex Technology», Екатеринбург

НЕКОТОРЫЕ ПРИЧИНЫ НАРУШЕНИЙ ДВИЖЕНИЯ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА В ВИХРЕВЫХ ГАЗОГЕНЕРАТОРАХ И КАМЕРНЫХ ЗАВИХРИТЕЛЯХ

В оригинальных вихревых газогенераторах [1] получены приемлемые для практики результаты. Это аппараты в 2-4 камеры, включенные по ходу среды последовательно, со схемами, отработанными на десятках моделей, как холодных, так и с горением, а также с вертикальной и горизонтальной осями вращения вихря.

Главная проблема, которую необходимо решить – это естественная несимметричность вихря, связанная с конструкцией вихревых камер. Следует также учесть ошибки, связанные с упрощенным представлением о характере формирования момента вращения вихря исключительно в тангенциальных соплах ввода воздуха или несущего газа в аппарат. Наш опыт изучения камерных завихрителей газа (улиток, циклонов, цилиндров с тангенциальными соплами) показал, что, во-первых, наибольший момент вращения поток получает не во входных воздушных соплах, а при повороте вошедшей в камеру струи и ее развитии у боковой стенки на примерно 60-120 градусов за счет увеличения тангенциальных скоростей на 10-20%. На это накладывается ощутимая остаточная доля момента вращения вихря, которая остается в нем после полного оборота потока. Реальная

крутка потока на разных радиусах при разном угле поворота струи вдоль стенки может отличаться до двух и более раз.

Нами созданы вихревые аппараты нового типа для газификации разных твердых топлив и отходов. При этом предложены технологические приемы управления и настройки газогенерации и горения полученного газа. В ряде случаев был получен процесс с управляемым воздушным пиролизом, «растянутым», пока условно, на стадии, с повышением времени пребывания углеродного остатка до его почти полной газификации в отводимой золе. На базе этих представлений нами разработаны оригинальные аппараты газогенерации топлив и биомассы мощностью 0,5 - 7 МВт по топливу. Часть из них успешно прошли опытно-промышленное освоение. Самым успешным с новыми широкими возможностями был аппарат (рис.1). Температуру газа на выходе обычно поддерживаем на уровне 800-900°С. При колебаниях качества подводимого топлива подачи воздуха реализовали разный уровень дефицита кислорода и температур среды в разных камерах.

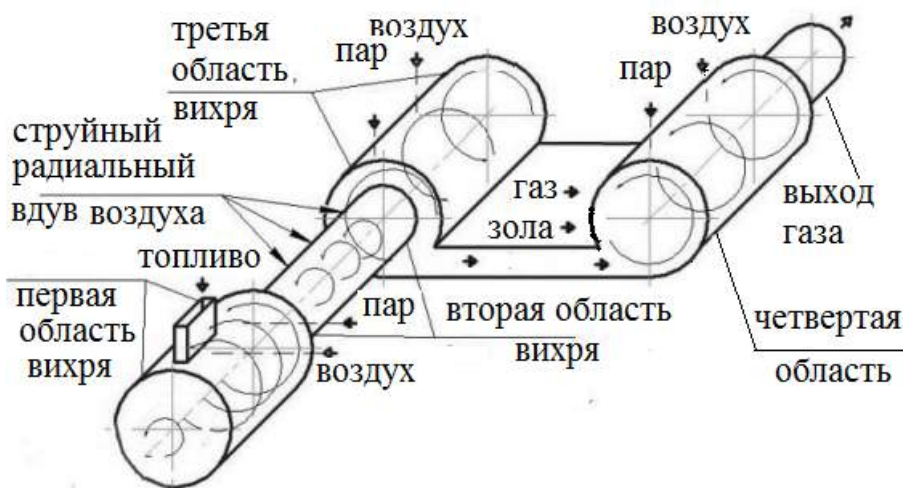


Рис. 1. Технологическая схема четырехкамерного вихревого реактора

В предельных режимах, например, при газификации сланцевой мелочи зольностью 60-65% и влажностью 5-12% получен газ 1200 ккал/м³ при механической неполноте сгорания всего лишь до 0,03 – 0,04%. На аппарате также опробована опытная газификация костной муки с почти полным выжиганием остатков органики по требованиям Евросоюза для возможности использования золы. Без добавок к этой муке топлив, как принято в других технологиях, был получен низкокалорийный газ (около 800 ккал/м³) и снижено содержания горючих в золе костной муки в 20 – 30 раз, до 0,3 – 0,14%.

Библиографический список

1. Костюнин В.В., Потапов В.Н. и др. О новых схемах аппаратов с вихревыми потоками для генерации горючих газов и их сжигания // Материалы третьей Международной конференции “Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках” – 2008. – Москва: МЭИ, 2008. С. 197-198.

2. Потапов В.Н. Костюнин В.В. Особенности формирования момента вращения в камере аппарата вихревой газогенерации твердого сырья // Тезисы докладов VIII Всероссийской конференции «Горение твердого топлива» - 2012 – Новосибирск: ИТ СО РАН, 2012. С. 104

Ильинков А.В., Щукин А.В., Такмовцев В.В., Попов И.А.
Казанский национальный исследовательский технический университет
им.А.Н.Туполева – КАИ,
Казань, 420111, К.Маркса, 10

ВИХРЕВАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ ГОРЕНИЯ В ПОТОКЕ

Стабильность горения топлива в потоке является важнейшим условием надежной работы теплотехнологических установок. При нарушении устойчивости горения происходит либо отрыв пламени от горелки, либо проскок пламени в смесительную часть горелки. В горелках энергетических котлов, ГТУ и технологических установок для предотвращения отрыва или проскока пламени применяются специальные устройства, называемые стабилизаторами горения. Общим принципом стабилизации против отрыва пламени является повышение температуры в зоне горения и, особенно, у корня факела.

Сегодня существует много типов стабилизаторов горения – струйные, закрученные потоки, вихревые, микрофакельные и перфорированные фронты, воздушно-форсуночные, на базе плохо- и хорошообтекаемых тел и т.д. Среди стабилизаторов горения можно выделить вихревые, суть которых заключается в том, что при большой скорости смеси в корне факела создаются специальные зоны пониженного давления (разрежение) вследствие резкого увеличения сечения. За счет разрежения происходит возвратное движение раскаленных продуктов сгорания в эти зоны, т.е. к корню факела; холодная смесь быстро нагревается и воспламеняется. Вихревые стабилизаторы можно классифицировать на следующие типы: туннельный диффузорный и конфузорный стабилизатор; хорошо- и плохообтекаемые тела; локальные или круговые выемки.

Объект исследования – вихрегенераторы в виде одно- и двухполостных выемок – полусферической (ПСВ), однополостной диффузорной (ОДВ) и двухполостной диффузорной (ДДВ) выемках (рис.1).

Основными задачами исследования являлись стабилизация горения и интенсификация теплообмена от продуктов сгорания к стенкам канала и выемки, что является необходимым условием для проектирования теплотехнологического оборудования.

Исследование проводилось при горении природного газа в пристеночной области в канале при протекании воздуха. На стенке размещались вихрегенераторы в виде выемок различной формы. Подача газа осуществлялась со дна вы-

емок. В ходе исследования определялось рациональное местоположение отверстий подачи газа, угол подачи топлива и параметр вдува газа, обеспечивающие максимальную эффективность сгорания топлива.

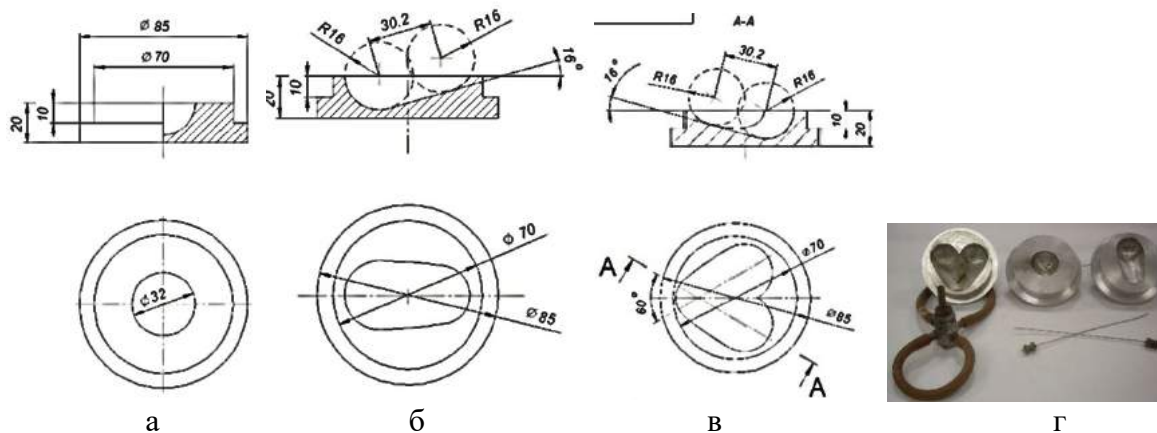


Рис. 1. Объекты исследования: а – схемы ПСВ, б – схема ОДВ, в – схема ДДВ, г – внешний вид всех видов вихрегенераторов

Устойчивое горение удалось получить во всех типах исследованных выемок. Эффективности ОДВ и ПСВ практически одинаковы. Наибольшая стабилизация горения получена при использовании ДДВ. Стабильное горение обеспечивается при параметре вдува $m \approx 2$. Места вдува газа у ДДВ и ОДВ следует выполнять в их полюсной (самой глубокой части).

Исследования горения при вихревой стабилизации горения с использованием ДДВ необходимо продолжить с определением полноты сгорания топлива, теплоотдачи к стенкам камеры сгорания.

Полученные результаты применимы для проектирования плоских камер сгорания теплотехнологических установок, например, печей сушки сыпучих материалов, подогрева рабочих газовых сред и т.д., обеспечивающих нагрев стенок оборудования за счет сжигания топлива.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение №075-03-2023-032.

Прохоров В.Б., Киричков В.С., Чернов С.Л., Извеков А.В.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,

Москва, 111250, ул. Красноказарменная, 14

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПЕРЕВОДА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОТЛОВ НА НЕПРОЕКТНЫЕ ТОПЛИВА

Энергетические топлива обладают различными характеристиками, такими как теплота сгорания, зольность, влажность, выход летучих и другие, которые

напрямую оказывают влияние на процессы горения и эффективность работы топочных устройств [1]. Существующие энергетические котлы проектировались заводскими изготовителями без указания диапазонов изменения основных характеристик проектных топлив. При работе на непроектных топливах возникают такие проблемы, как шлакование, неустойчивость горения, повышенные выбросы оксидов азота в атмосферу, абразивный износ конвективной части котла, снижение экономических показателей и надежности работы оборудования.

Запасы угля в РФ расположены в границах 22 угольных бассейнов и 146 отдельных месторождений. Наибольшая часть запасов (более 80%) сосредоточена в Сибири, около 63% запасов угля РФ пригодны для условий открытой разработки [2,3]. Наиболее перспективными по запасам и качеству, состоянию инфраструктуры и горнотехническим возможностям являются угли Кузнецкого и Канско-Ачинского бассейнов, а также угли Восточной Сибири и Дальнего Востока.

Проведены исследования возможности перевода котла ТПП-210А на различные непроектные твердые топлива. Для подтверждения возможности сжигания любого альтернативного топлива можно использовать численное моделирование процесса горения с определением полей температур и скоростей (рис. 1, а), величин концентраций CO , NO_x , O_2 и др. в программной среде ANSYS Fluent. Также проведено моделирование процесса шлакования топочных экранов (рис. 1, б). Условием шлакования считался контакт частицы с топочным экраном при температуре частицы большей (или равной) температуре начала шлакования [4].

При сравнении результатов численного моделирования с данными, полученными в ходе эксплуатации котла ТПП-210А, получено, что: значение удельных потерь теплоты с механическим недожогом (1,85%) попадает в эксплуатационный интервал значений (0,27-5,09%); относительная разность температуры дымовых газов на выходе из модели не превышает 1,4% (по результатам численного моделирования получена величина 1316°C ; по результатам тепловых позонных расчетов значение температуры составило 1298°C); величина концентрации оксидов азота в дымовых газах при $\alpha=1,4$ попадает в эксплуатационный интервал значений.

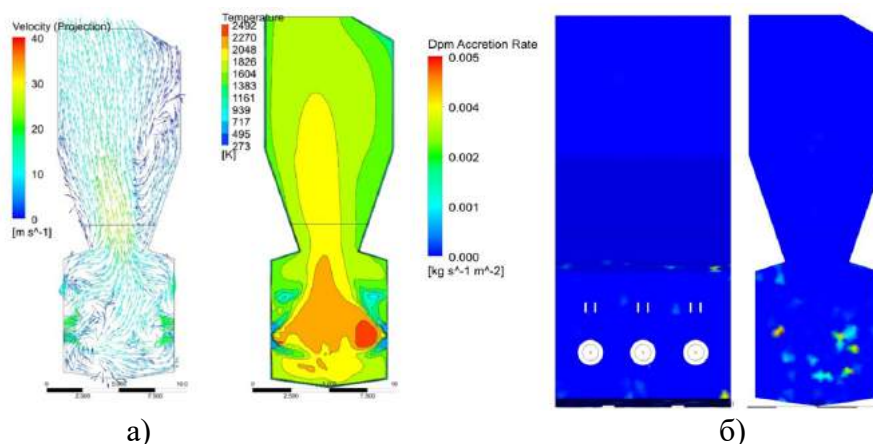


Рис. 6. Визуализация результатов моделирования горения твердого топлива в топке котла ТПП-210А: а) векторное поле скоростей и поле температур; б) скорость роста отложений на стенах топочной камеры

Таким образом, численное моделирование можно рассматривать в качестве одного из основных инструментов при оценке возможности сжигания не-проектных топлив, в том числе и смесей твердых топлив различных марок.

Библиографический список

1. М.Н. Майданик, Э.Х. Вербовецкий, А.Н. Тугов. Предварительная оценка возможности перевода котлов тепловых электростанций на сжигание альтернативного угля \ \ Теплоэнергетика, № 9, 2021. С. 33-42.
2. Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2019 году \ \ Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. М.: 2020. 494 с.
3. В.В. Богомоллов и др. Энергетические угли восточной части России и Казахстана: Справочник \ \ Челябинск: УралВТИ, 2004. 304 с.
4. А.Н. Алехнович. Шлакование пылеугольных энергетических котлов \ \ М.: НТФ «Энергопрогресс», 2013. 112 с. [Библиотечка электротехника, приложение к журналу «Энегетика»; Вып.8 (176)].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00722, <https://rscf.ru/project/22-19-00722/>

Сергеев С.С.

ФГУП НАМИ,

Москва, 125438, ул. Автомоторая, 2

МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЕТА РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ГАЗОПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПРЕДКАМЕРНЫМ ЗАЖИГАНИЕМ

Предкамерное (форкамерно-факельное) зажигание является преобладающим видом организации процесса сгорания современных крупногабаритных газопоршневых двигателей (водный транспорт, стационарные энергоустановки и др.), работающих на обедненных топливно-воздушных смесях [1]. Смесь в предкамере стехиометрическая и воспламеняется от искры свечи зажигания. Из предкамеры (ПК) выбрасывается горящий факел, который и зажигает обедненную смесь в основной камере сгорания [2].

Доклад посвящен разработке модели для численных исследований рабочего процесса в газовом двигателе с предкамерным зажиганием.

ПК и основная камера сгорания (КС) моделируется отдельно.

Давление и температура в ПК вычисляются на основе нульмерной модели сгорания (для открытой термодинамической системы).

Для основной КС решается система двумерных уравнений турбулентного переноса импульса, энергии и компонентов газа (с применением условия цилиндрической симметрии). Алгоритм численного решения базируется на методе контрольных объемов и неявной схемы интегрирования по времени [3,4].

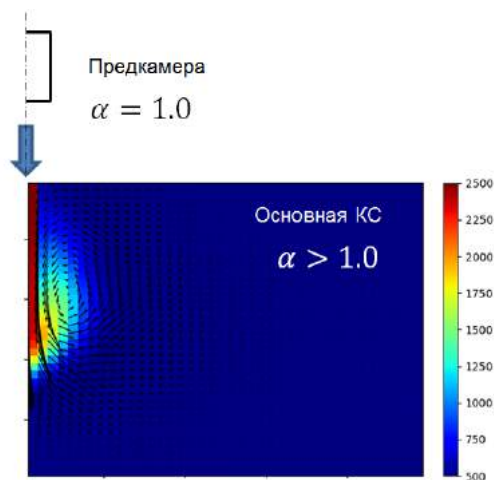


Рис.1. Поле скоростей и температур (К), возникающие при перетекании продуктов сгорания из предкамеры в основную КС

боты предкамеры и основной КС для достижения наилучшей стабильности и эффективности процесса сгорания в исследуемом двигателе.

Для согласования полей скоростей и давления применяется алгоритм Simple. Расчетная сетка подвижная. Процесс горения в основной КС вычисляется на основе одностадийного уравнения превращения топлива в продукты сгорания.

Скорость перетекания газа из ПК в основную КС вычисляется на основе решения задачи о распаде произвольного разрыва. Поле скоростей и температур, полученное в процессе перетекания продуктов сгорания, показано на рис.1.

Цель исследования рабочего процесса – согласование режимов работы предкамеры и основной КС для достижения наилучшей стабильности и эффективности процесса сгорания в исследуемом двигателе.

Библиографический список

1. S. Murakami, T. Baufeld. Current Status and Future Strategies of Gas Engine Development \\\ CIMAC Congress 2013, Shanghai.
2. Кавтарадзе Р.З. Теплофизические процессы в дизелях, конвертированных на природный газ и водород. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 238 с.
3. Сергеев С.С. Двумерная модель для расчета рабочего процесса двигателя с искровым зажиганием \\\ Математическое моделирование. Том 33, номер 12, стр. 21-32, 2021.
4. Сергеев С.С. Двумерная модель расчета образования вредных веществ в продуктах сгорания двигателя с искровым зажиганием \\\ Труды НАМИ, Вып. №2 (293), 2023 (в печати).

Фоменко М.В., Фоменко Н.Е., Прохоров В.Б.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, ул. Красноказарменная, 14

РАЗЛИЧНЫЕ ПОДХОДЫ К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ СХЕМ СЖИГАНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРЯМОТОЧНЫХ ГОРЕЛОК И СОПЕЛ

Применение прямооточных горелочных устройств, которые являются горелками группового взаимодействия, для сжигания твердого топлива позволяет

получить высокие показатели надежности, экономичности и экологичности работы топочной камеры котла.

Для достижения эффективных показателей работы топки горелки и сопла должны быть размещены определенным образом. Поэтому необходимо проведение серии исследований, которые целесообразно выполнять с помощью численного моделирования, позволяющего детально проработать аэродинамику топочного объема с малыми затратами времени и прочих ресурсов.

В настоящей работе рассмотрены три подхода к разработке оптимальных схем сжигания твердого топлива с применением прямоточных горелочных устройств и сопел с помощью численного моделирования.

В первом подходе используется изотермическое численное моделирование течения струй внутри топочного объема, аналогичное исследованию на лабораторном физическом стенде, с дальнейшим уточнением схемы с помощью численной модели горения [1].

Во втором подходе на начальном этапе проводится оптимизация топочной аэродинамики с помощью упрощенной численной модели, учитывающей определенные особенности распространения горелочных струй в топочной камере с помощью инверсной зависимости изменения плотности от температуры для горелочных струй. На конечном этапе проводится уточнение окончательной схемы с помощью численного моделирования горения [2].

В третьем подходе проводится оптимизация положения и компоновки сопел и горелочных устройств по зонам, соответствующим зонам трехступенчатого сжигания, с помощью численной модели горения. Позонная оптимизация начинается с зоны, наиболее удаленной от выхода из топочной камеры, и продолжается в зонах следующих по движению дымовых газов. При этом учитывается оптимальное расположение горелок и сопел зон, расположенных до исследуемой зоны, но исключаются горелки и сопла, следующие за исследуемой (в них не подается ни воздух, ни топливо) [3]. На рис. 1 приведены температурные поля итоговых схем трех рассматриваемых подходов оптимизации.

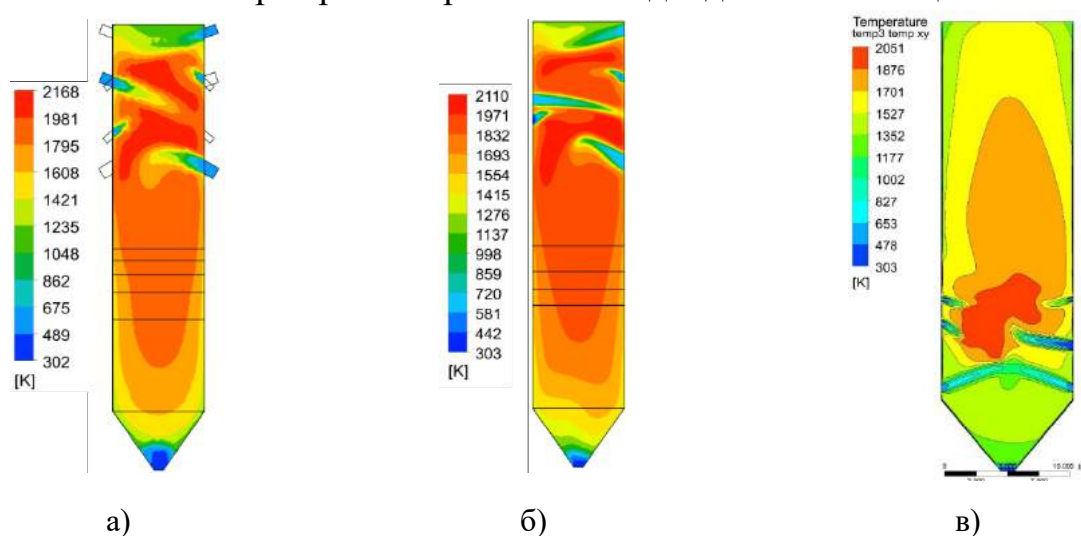


Рис. 1. Температурные поля в вертикальном сечении топочной камеры, полученные в результате реализации различных подходов оптимизации: а) первого; б) второго; в) третьего

В первом и втором случае исследования проведены для инвертной топочной камеры, а в третьем случае – для традиционной топки с восходящим потоком дымовых газов. Критериями оптимизации служили минимальное значение удельных потерь тепла с механическим недожогом топлива и концентраций оксидов азота в дымовых газах, а также отсутствие шлакования топочных экранов.

Библиографический список

1. Prokhorov, V. B. et al. Numerical variational study of the M-shaped boiler invert furnace // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2020. – Vol. 1683. – No. 4. – pp. 1-12 – С. 042033. – DOI 10.1088/1742-6596/1683/4/042033
2. Prokhorov, V. B., Fomenko, M. V., Fomenko, N. E. Development of a simplified methodology for furnace aerodynamics with vortex combustion of organic fuel modeling // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – Moscow, 2021. – P. 012016. – DOI 10.1088/1742-6596/2088/1/012016.
3. Fomenko, M. V., Prokhorov V. B., Fomenko N. E. Investigation of the direct-flow burners and nozzles arrangement at the direct-flow-vortex coal combustion in a furnace with solid slag removal // Journal of Physics: Conference Series – Moscow, 2021. – P. 012015. – DOI 10.1088/1742-6596/2088/1/012015

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №22-19-00722, <https://rscf.ru/project/22-19-00722/>.

Шлегель Н.Е., Клименко А., Стрижак П.А.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Томск, 634050, пр. Ленина 30

ИССЛЕДОВАНИЕ ФРАГМЕНТАЦИИ КАПЕЛЬ ВОДОМАЗУТНОГО ТОПЛИВА С ДОБАВЛЕНИЕМ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ПРИСАДОК

Тяжелый мазут является одной из альтернатив топлива на морских и энергетических установках из-за его экономичной цены [1]. Как правило, мазут получают из установок сероочистки нефтеперерабатывающих заводов. Основной проблемой сжигания НФО является образование различных загрязняющих веществ, таких как дым, остаточная зола, ценосфера, сажа и серная кислота. Мазут характеризуется высоким содержанием серы до 4,5% массы и большими выбросами SO₂. Кроме того, НФО содержит различные количества микроэлементов тяжелых металлов, таких как ванадий, никель, свинец, медь и т.д., которые создают дополнительные проблемы, включая высокотемпературную коррозию и загрязнения [2–4]. Вследствие этого снижение спроса на мазут вызвало переход к использованию более низкосернистого топлива (ЕСА, MARPOL) в международных водах, снижением использования мазута для производства электроэнергии и тепла, а также снижение использования мазута для отопления жилых и про-

мышленных помещений и переход на газовое топливо [5]. Для снижения вредных выбросов и улучшения характеристик топлива используют дополнительные присадки в небольших долях.

Один из способов улучшить характеристики горения и уменьшить антропогенные выбросы — это использование специальных присадок.

Присадки для водомазутного топлива используются в котельных агрегатах для улучшения работы горелки, снижения потребления топлива, повышения эффективности горения и сокращения выбросов вредных веществ в окружающую среду. Выбор оптимальных присадок для улучшения характеристик горения считается сложной задачей, так как на сегодняшний день есть множество присадок, которые могут влиять на реологические характеристики, характеристики горения.

Проведены исследования по изучению характеристик горения и фрагментации капель водомазутных топлив с применением специализированных присадок. При использовании присадки «ИОН М» удалось установить снижения времён задержки зажигания капли водомазутного топлива практически на 46 %. При соударении такой капли с твердой стенкой теплового оборудования критическое число Вебера для устойчивой фрагментации капли снижается практически на 20%. Проведенные исследования показали, что при использовании присадки «ИОН М» улучшаются характеристики вторичного измельчения при соударении о твердую поверхность. С помощью технологий вторичного измельчения присадка «ИОН М» позволяет снизить скорость столкновения капель со стенками теплового оборудования, а также способствует к полному сгоранию водомазутного топлива.

Библиографический список

1. Darbandi M., Fatin A., Bordbar H. Numerical study on NOx reduction in a large-scale heavy fuel oil-fired boiler using suitable burner adjustments // *Energy*. 2020. Vol. 199. P. 117371.
2. Abdul Jameel A.G. et al. Calculation of Average Molecular Parameters, Functional Groups, and a Surrogate Molecule for Heavy Fuel Oils Using ¹H and ¹³C Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy // *Energy & Fuels*. American Chemical Society, 2016. Vol. 30, № 5. P. 3894–3905.
3. Goldstein H.L., Siegmund C.W. Influence of heavy fuel oil composition and boiler combustion conditions on particulate emissions // *Environ. Sci. Technol.* American Chemical Society, 1976. Vol. 10, № 12. P. 1109–1114.
4. Sippula O. et al. Comparison of particle emissions from small heavy fuel oil and wood-fired boilers // *Atmos. Environ.* 2009. Vol. 43, № 32. P. 4855–4864.
5. Minzyak M. V. Contradictions in the implementation of the new provisions of the MARPOL and UNCCD conventions in international maritime practice // *Ocean Manag. Limited Liability Company*, 2022. № 4 (18). P. 17–20.

Исследование выполнено за счет средств Российского научного фонда (проект № 22-79-00197, <https://rscf.ru/project/22-79-00197>)

СЕКЦИЯ 3. ТЕПЛОМАССОБМЕН НА МАКРО-, МИКРО- И НАНОМАСШТАБАХ

Дмитриев А.С., Макаров П.Г., Михайлов В.В., Михайлова И.А., Чан К.Т.
Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, ул. Красноказарменная, 14

ЗАКРУЧЕННЫЕ ПОТОКИ ГРАФЕНОВЫХ НАНОЖИДКОСТЕЙ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ГЕНЕРАЦИИ ПАРА В ТЕПЛОВОЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

В последнее время интерес к процессам генерации пара в наножидкостях для солнечной теплоэнергетики и систем получения чистой обессоленной воды значительно вырос [1-3]. Одной из важнейших проблем является оптимизация нагрева, рост эффективности теплообмена и генерации пара в подобных системах. В данном исследовании впервые использован метод закрутки объема графеновой наножидкости как теплоносителя, нагреваемой излучением солнечного планковского спектра, для оптимизации процессов генерации пара.

Впервые проведены исследования вращающихся графеновых наножидкостей, изучены эффекты, возникающие внутри подобных структур, оптические и другие характеристики вращающихся объемов наножидкостей. Для создания закрученных потоков в наножидкостях использовались либо специализированные мешалки, либо вращающиеся платформы. Естественно, получаемые закрученные потоки наножидкостей по своим физическим свойствам отличались для низких и высоких частот вращения. Излучение планковского спектра создавалось имитатором солнечного излучения в диапазоне длин волн от 1,85 до 8,9 мкм, мощностью около 1,91 Вт/см² и эффективной поверхностью - 78,4 см².

Показано, что медленно вращающиеся цилиндрические объемы графеновой наножидкости с различной концентрацией графеновых нанохлопьев, их различной слойности и латеральных размеров, могут приводить к улучшению распределения температуры, формированию поверхности испарения большей площади, что влияет на показатели эффективности преобразования солнечного излучения в пар. Помимо этого, даже слабая закрученность потоков наножидкостей приводит к их стабилизации, снижению эффектов коагуляции наночастиц и их седиментации, более равномерному распределению наночастиц в объеме. Теплофизические свойства закрученных потоков наножидкости также приводят к увеличению теплопереноса, что ведет к новым решениям для систем генерации пара в солнечной тепловой энергетике [4,5].

Библиографический список

1. M. Macha, S. Marion, V. Nandigana, A. Radenovic. 2D materials as an emerging platform for nanopore based power generation // Nat. Rev. Mater. 2019. V. 4. P. 588–605.

2. А.С. Дмитриев, А.В. Клименко. Преобразование солнечного излучения в пар – новые возможности на основе наноматериалов (обзор). Теплоэнергетика, 2020, № 2, с. 1–16.

3. А. С. Дмитриев, А.В. Клименко. Перспективы использования двумерных материалов в энергетических технологиях (обзор). Теплоэнергетика, 2023, № 8, с. 1–24.

4. T. Rasheed, T. Hussain, M. Anwar et al. Hybrid Nanofluids as Renewable and Sustainable Colloidal Suspensions for Potential Photovoltaic/Thermal and Solar Energy Applications. Front Chem. 2021; 9: 737033.

5. G. Yao, J. Xu, G. Liu. Solar steam generation enabled by bubbly flow nanofluids Solar Energy Materials and Solar Cells. V. 206, 2020, 110292.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-19-00840).

Борщев Н.О.

Объединенный институт высоких температур (РАН), 125412, Москва,
ул. Ижорская, д. 13, стр. 2

МЕТОД ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ТЕПЛОЙ ПРОВОДИМОСТИ ТЕПЛООВОГО АККУМУЛЯТОРА КАК ФУНКЦИИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

При проектировании систем обеспечения теплового режима (СОТР) широкое распространение в ракетно-космической отрасли и в повседневной жизни получили широкое распространение накопители тепловой энергии – тепловые аккумуляторы, работающие на принципе плавление- кристаллизация. За счет теплового эффекта реакции плавления эти устройства позволяют абсорбировать сравнительно большое количество тепловой энергии [1]. Однако при моделировании теплового режима данных устройств остается зачастую открытый вопрос о наличии термогравитационной конвекции при эффекте плавления, поскольку у некоторых теплоносителей, таких как парафин, теплофизические свойства в жидком после теплового эффекта реакции несильно отличаются от твердой фазы. Таким образом, встает актуальная задача – определение эффективной проводимости как функции температуры теплового аккумулятора на всем этапе его функционирования.

В данной работе предлагается экспериментальное определение эффективной тепловой проводимости такого устройства на основе минимизации среднеквадратичного отклонения между теоретическим и экспериментальным полем температур в местах установки датчиков температур. В качестве метода минимизации выбран метод сопряженных градиентов [2,3], как наиболее точный метод

первого порядка сходимости, позволяющий достичь критерия останова итерационного процесса за минимальное число итераций. В качестве критерия останова итерационного процесса принята интегральная погрешность расчета, складываемая из системной погрешности, погрешности постановки «прямой» задачи теплообмена, погрешности метода расчета и т.д.

Таким образом можно сформировать следующую последовательность действий для определения эффективного коэффициента теплопроводности теплового аккумулятора.

1. Задание начального приближения для коэффициента теплопроводности и выбор базисной функции, учитывающей его зависимость от температуры.

2. Решение «прямой» задачи прогрева конструкции методом конечных разностей (метод рассредоточенных параметров [4,5]) при задании начально-граничных условий расчета (тепловые подводимые мощности и температура в начальный момент времени), моделируя условия штатной эксплуатации конструкции.

3. Составление среднеквадратичной ошибки между теоретическим и экспериментальным температурным полем температур в местах установки датчиков температур.

4. Решение двух сопряженных задач по поиску компонент градиента целевого функционала невязки между теоретическим и экспериментальным температурным полем.

5. Вычисление шага спуска в методе сопряженных направлений на основе метода итерационной регуляризации.

6. Получение следующих итерированного приближения параметризованного коэффициента теплопроводности теплоносителя данного устройства.

7. Проверка критерия останова итерационного процесса. В случае его выполнения, параметризованные величины считаются искомыми, иначе необходимо повторно выполнить пункты 1-6.

Библиографический список

1. Формалев В.Ф. Теплоперенос в анизотропных твердых телах .- М.:Физматлит, 2015.- 238 с.

2. Васин В.В. Модифицированный метод наискорейшего спуска для нелинейных регулярных операторных уравнений//Доклады Академии наук. 2015. Т. 462. № 3. С. 264.

3. Голичев И.И. Модифицированный градиентный метод наискорейшего спуска решения нелинейной задачи для нестационарных уравнений Навье-Стокса//Уфимский математический журнал. 2013. Т. 5. № 4. С. 60-76.

4. Формалев В.Ф., Ревизников Д.Л. Численные методы.- М.:Физматлит, 2004.- 400 с.

5. Формалев В.Ф. Анализ двумерных температурных полей в анизотропных телах с учетом подвижных границ и большой степени анизотропии//Теплофизика высоких температур. 1990. Т. 28, № 4. С. 715-721.

**Коновалов И.А., Баринов А.А., Чесноков А.А., Макаров М.А.,
Зырянова Т.К.**

НГТУ им. Р.Е. Алексеева,
Нижний Новгород, 603155, ул. Минина, д.24

МЕТОД ЛОКАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ РАСЧЕТНОЙ СЕТКИ ДЛЯ LES МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА ТУРБУЛЕНТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ СКОРОСТИ

Метод моделирования крупных вихрей (Large Eddy Simulation, LES) нашел широкое применение при изучении различных теплофизических явлений: от не-изотермического смешения до естественно-конвективных процессов. Вместе с тем LES предъявляет особые требования к качеству используемой расчетной сетки. В данной работе представлен один из возможных подходов к оптимизации характерных размеров ячеек расчетной сетки для LES.

Суть предлагаемого метода заключается в определении размеров ячеек сетки, служащих пространственным фильтром при LES моделировании, на основе анализа модельного энергетического спектра турбулентных пульсаций скорости в потоке. Полученный результат может быть использован в качестве первого приближения для дальнейшей оптимизации. На основе анализа распределения турбулентной кинетической энергии, полученного как результат менее затратного RANS моделирования, могут быть определены параметры для локальной оптимизации расчетной сетки.

В работе представлены результаты теоретического, численного и экспериментального моделирования турбулентного течения в канале квадратного сечения 50x50 мм. Размеры ячеек расчетной сетки выбирались на основе анализа модельного энергетического спектра, как ширина пространственного фильтра, при которой отфильтрованный по методу LES энергетический спектр ослабляется на 3 дБ относительно модельного. Теоретический вид спектра турбулентных пульсаций был получен как результат анализа зависимостей, представленных в книге [1]. На полученной расчетной сетке производилось численное моделирование турбулентного течения методом LES.

В результате сравнения интегральных характеристик турбулентности, полученных в экспериментах [2] и при LES моделировании на разных расчетных сетках, был сделан вывод о наличии порогового значения размеров ячеек сетки, которое хорошо согласуется с теоретическими оценками по модельному спектру. При использовании сеток с размерами ячеек, превышающих это значение, наблюдалось значительное несоответствие картины смешения потоков, полученной в экспериментах и при помощи CFD моделирования.

Библиографический список

1. Pope B.S. Turbulent Flows. Cambridge University Press, 2000. 777 pp.

2. Дмитриев С.М., Хробостов А.Е., Легчанов М.А., Бородин С.С., Коновалов И.А., Баринов А.А., Чесноков А.А., Макаров М.А. Экспериментальные исследования гидродинамики стратифицированного течения спутных смешивающихся потоков // Теплофизика и аэромеханика, Т.28, N 4, 2021, С. 499-506.

Кузнецов В.В., Шамирзаев А.С.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск,
630090, пр. ак. Лаврентьева, 1

ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛООБМЕН ПРИ МИКРОКАНАЛЬНОМ И МИКРОСТРУЙНОМ ОХЛАЖДЕНИИ ТЕПЛОНАПРЯЖЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Новые разработки в области энергетики и электроники привели к значительному увеличению тепловыделения и необходимости разработки принципиально новых технологий охлаждения. Это обусловило развитие двухфазных систем охлаждения, использующих фазовый переход жидкость-пар для повышения коэффициента теплоотдачи и снижения затрат на прокачку теплоносителя [1]. Среди технологий двухфазного охлаждения наибольшую эффективность при высоких тепловых потоках имеет недогретое кипение в условиях вынужденной конвекции в микроканалах и микроструйное охлаждение.

В данной работе представлены новые результаты в области гидродинамики и тепломассообмена при кипении в микроканальных системах. Рассмотрена локальная структура газожидкостных течений, обсуждено влияние волн на поверхности жидкости на режим течения, предложены новые подходы к расчету газожидкостного течений на микромасштабе. Применительно к разработке микроканальных систем терморегулирования рассмотрены физические механизмы теплообмена при насыщенном и недогретом кипении воды, фреонов и диэлектрической жидкости HFE 7100 в микроканальных системах охлаждения, в том числе с теплообменной поверхностью, модифицированной наночастицами. Рассмотрены особенности коэффициентов теплоотдачи и критических тепловых потоков, обоснованы методы подавления преждевременного кризиса кипения и повышения критического теплового потока. Предложен и обоснован метод расчета теплообмена при кипении жидкости в микроканале, учитывающий совместно вклад вынужденной конвекции, подавления пузырькового кипения и испарения волновой пленки жидкости.

Представлены новые результаты в области теплообмена при натекании затопленных распределенных и локализованных микроструй жидкости на теплонапряженную поверхность, расположенную в щелевом канале. Применительно к разработке микроструйных систем охлаждения рассмотрены физические механизмы теплообмена при натекании локализованных и распределенных затопленных микроструй воды и HFE 7100 на охлаждаемую поверхность. Рассмотрены

особенности кривых кипения, коэффициентов теплоотдачи и критических тепловых потоков для различной скорости жидкости, диаметра струй и плотности орошения, обоснованы методы повышения критического теплового потока. Предложен и экспериментально обоснован метод расчета теплообмена при микроструйном охлаждении в условиях недогретого кипения для распределенных микроструй. На рис. 1 приведено сопоставление расчетных и экспериментальных кривых кипения для охлаждения мишени водой. Начальная температура равна 25 °С, использованы распределенные струи диаметром 174 мкм, скорость жидкости в струях равна 3 м/с. Пунктирной линией показан расчет кривой кипения в условиях большого объема, сплошной линией показан расчет недогретого кипения по модифицированному методу [2] с учетом [3].

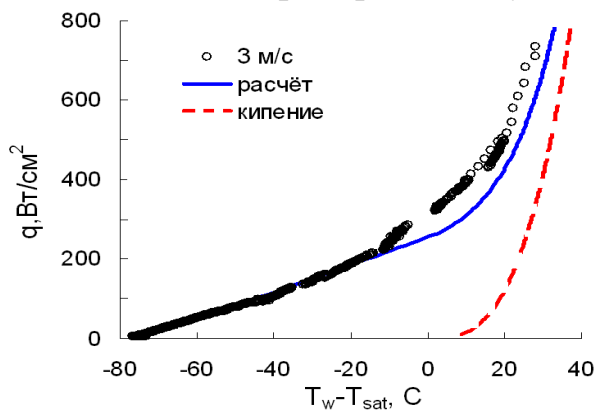


Рис. 7. Сравнение расчета и эксперимента для микроструйного охлаждения мишени водой

Проведено сопоставление эффективности микроканальных и микроструйных систем охлаждения, показано, что наибольшую термогидравлическую эффективность имеют интегрированные системы охлаждения, объединяющие преимущества микроканального и микроструйного охлаждения, дополненные паровыми камерами. Рассмотрены особенности применения технологий двухфазного охлаждения для терморегулирования теплонапряженных элементов энергетических устройств и электронного оборудования, включая трехмерные системы охлаждения процессоров.

Библиографический список

1. I. Mudawar. Recent advances in high-flux, two-phase thermal management \ Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 2013. V. 5. P. 021012-1.
2. Z. Liu, R.H.S. Winterton. A general correlation for saturated and subcooled flow boiling in tubes and annuli \ International Journal of Heat and Mass Transfer, 1991. V. 34. P. 2759-2766.
3. M. Fabbri, V.K. Dhir. Optimized heat transfer for high power electronic cooling using arrays of microjets \ Journal of Heat Transfer, 2005. V.127. P.760-769.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 21-19-00626

Киселёв Н.А., Маластовский Н.С., Виноградов Ю.А.

НИИ механики МГУ, 119192, Москва, Мичуринский пр., 1;
МГТУ им. Баумана, 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, к. 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В СЖИМАЕМОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ С ПОЛОЖИТЕЛЬНЫМ ГРАДИЕНТОМ ДАВЛЕНИЯ В МАЛОРАЗМЕРНОМ КАНАЛЕ

Исследование течений с продольным градиентом давления относится к классу классических задач гидро и газодинамики.

Первые попытки экспериментального исследования таких турбулентных течений были предприняты Клаузером [1] в двумерной постановке и условиях изотермичности и несжимаемости. Позднее Клаузер [2] сформулировал требования, обеспечивающие равновесность (автомодельности) пограничного слоя с продольным градиентом давления - постоянство параметра $\beta = \delta^*/\tau_w \cdot dp/dx$ (безразмерный параметр градиента давления) во всем потоке. Кроме того, должно сохраняться значение формпараметра Клаузера

$$G = (H - 1) / \left(H \sqrt{c_f/2} \right),$$

где $H = \delta^*/\theta$ - формпараметр пограничного слоя, c_f - коэффициент трения.

Для равновесных потоков Меллор и Гибсон, а позднее Со предложили решения, описывающие автомодельные профили скорости [3] и температуры [4] во всей области течения и соответствующие им значения коэффициентов трения и теплоотдачи, определяемые числом Рейнольдса по толщине вытеснения и параметром градиента давления β .

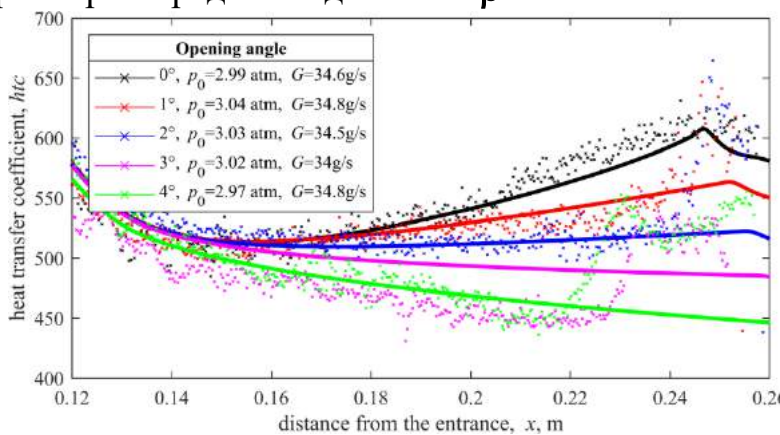


Рис. 8. Распределение коэффициента теплоотдачи по длине каналов. Точки – эксперимент, линии – расчет

Несмотря на стремительное развитие методов вычислительной газовой динамики, успешно применяемых для описания градиентных течений [5], автомодельные решения остаются актуальными при проведении сравнительных исследований [6] и экспериментальных работ [7].

В рамках комбинированного экспериментально-численного подхода получено

влияние положительного градиента давления на интенсивность теплоотдачи для малого сверхзвукового сопла (рис. 1).

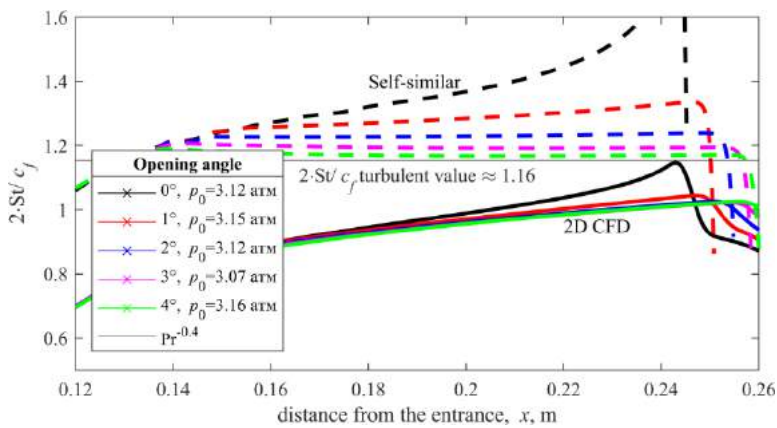


Рис. 2. Фактор аналогии Рейнольдса: пунктирные линии – значения в условиях автомодельности, сплошные линии – 2D расчет

Выполнено сопоставление фактора аналогии Рейнольдса с данными для автомодельного течения в диапазоне β $-0.02 \dots 0.85$, которые удается реализовать для исследуемого канала (рис. 2).

Показано, что для сверхзвуковых течений положительный градиент давления оказывает незначительное влияние как на коэффициент трения, так и на интенсивность теплоотдачи.

Библиографический список

1. Clauser FH (1954) Turbulent Boundary Layers in Adverse Pressure Gradients. J Aeronaut Sci 21:91–108 . doi: 10.2514/8.2938;
2. Clauser FH (1956) The Turbulent Boundary Layer. Adv Appl Mech 4:1–51 . doi: 10.1016/S0065-2156(08)70370-3
3. Mellor GL, Gibson DM (1966) Equilibrium turbulent boundary layers. J Fluid Mech 24:225–253 . doi: 10.1017/S0022112066000612
4. So RMC (1994) Pressure gradient effects on Reynolds analogy for constant property equilibrium turbulent boundary layers. Int J Heat Mass Transf 37:27–41 . doi: 10.1016/0017-9310(94)90159-7
5. Atzori, M., Mallor, F., Pozuelo, R., Fukagata, K., Vinuesa, R., & Schlatter, P. (2023). A new perspective on skin-friction contributions in adverse-pressure-gradient turbulent boundary layers. International Journal of Heat and Fluid Flow, 101. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2023.109117>
6. Wenzel, C., Gibis, T., Kloker, M., & Rist, U. (2020). Reynolds analogy factor in self-similar compressible turbulent boundary layers with pressure gradients. Journal of Fluid Mechanics, 907. <https://doi.org/10.1017/jfm.2020.876>
7. N.A. Kiselev, A.I. Leontiev, Y.A. Vinogradov, A.G. Zditovets, S.S. Popovich, Heat transfer and skin-friction in a turbulent boundary layer under a non-equilibrium longitudinal adverse pressure gradient, Int. J. Heat Fluid Flow 89 (2021), 108801, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2021.108801>

Исследование выполнено за счет средств гранта РФФИ (№19-79-10213)

Светушков Н.Н.

ГБОУ ВО Московской области «Технологический университет
им. дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта
А.А. Леонова», г. Королев, Московская область

ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ НЕСТАЦИОНАРНЫХ УРАВНЕНИЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Возможность численного решения нестационарного уравнения теплопроводности с заданной точностью имеет большое практическое значение, особенно при термообработке и закалке геометрически сложных изделий из углеродных сталей [2,3,4]. Как известно, самым распространенным подходом для численного решения задач теплопроводности в трехмерном случае являются различные модификации метода конечных элементов, однако они не позволяют оценить погрешность полученного решения.

В работе [1] автором выведена система интегральных уравнений типа Фредгольма, которые в правых частях содержат начальные и граничные условия исходной задачи. Для их численного решения используется подход, основанный на сеточном усреднении. Используя достаточно крупное сеточное разбиение, можно определенным способом усреднить теплофизические характеристики материала изделия, и получить систему алгебраических уравнений, которые легко решаются известными алгоритмами. В результате будут получены усредненные значения температуры в каждой отдельной сеточной области.

Отдельной задачей является проблема восстановления значений температуры в узловых точках по известным средним значениям. В работе представлены результаты применения к этой задаче метода наименьших квадратов, что приводит к «осциллирующему» характеру получаемого численного решения. Автором в этом случае предлагается способ, основанный на параболической аппроксимации полученных значений, и показано, что он дает достаточно хорошие результаты.

После получения численных значений температуры в узловых точках сеточного разбиения возможно повторить процедуру усреднения и получить более точное решение. Предлагаемый итерационный подход численного решения уравнений теплопроводности обеспечивает возможность не только оценить точность решения, но и получить достаточно хорошее численное приближение при сравнительно небольших временных затратах.

Библиографический список

1. Н.Н. Светушков. Интегральный подход в вычислительной теплофизике: монография. \ М.: Научный консультант, 2020. - 150 с.
2. Н.Н. Светушков. Численное моделирование процессов термообработки на основе интегрального подхода \ Материаловедение. 2018. № 6. С.31-36.
3. Н.Н. Светушков. Численное моделирование высокоинтенсивного теплового воздействия на изделия из углерод-углеродных композиционных материалов \ Конструкции из композиционных материалов. 2018. №2. С.15-21.

4. Svetushkov N.N. Modeling the Structure of a Reinforcing Phase at Heat Treatment of Steel Products \ Inorganic Materials: Applied Research, 2019, doi:10.1134/s2075113319010313

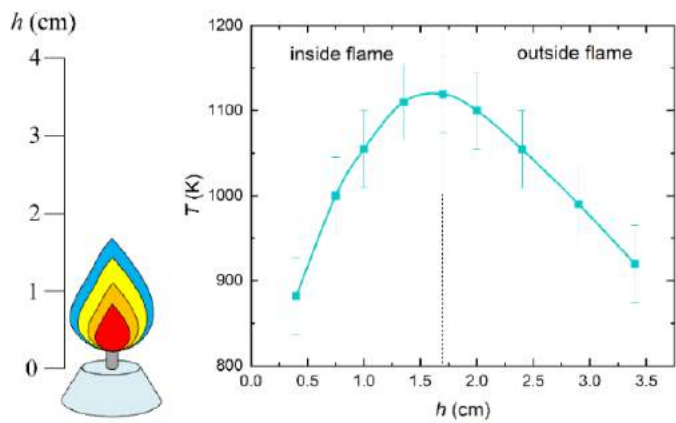
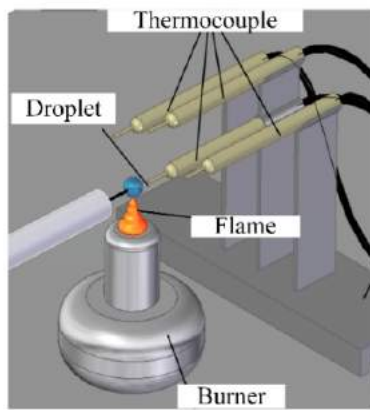
Антонов Д.В., Федоренко Р.М., Высокоморная О.В., Стрижак П.А.
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Томск, 634050, пр. Ленина, 30

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ВТОРИЧНЫХ ФРАГМЕНТОВ В РЕЗУЛЬТАТЕ МИКРО-ВЗРЫВА И ПАФФИНГА ДВУХЖИДКОСТНЫХ КАПЕЛЬ

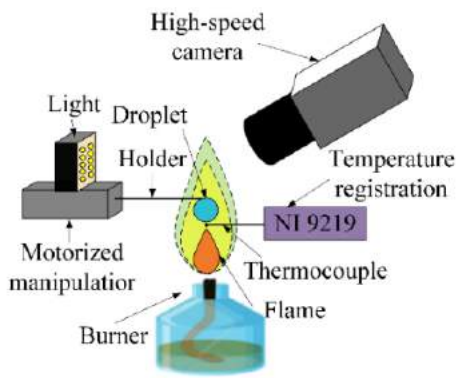
Вторичное измельчение двухжидкостных капель при нагреве реализуется в двух режимах [1]: паффинг и микро-взрыв. Эти режимы позволяют получать размеры вторичных капель в десятки и даже сотни раз меньше, чем размеры родительской капли [2]. Чем больше отличия теплофизических и реологических характеристик горючей и негорючей жидкостей в составе капли, а также чем существеннее отличаются теплоты парообразования и температуры кипения (нуклеации), тем до меньших размеров происходит ее измельчение [1]. К настоящему времени на базе экспериментальных данных [3] разработана группа физических и математических моделей [4], позволяющих прогнозировать характеристики микро-взрывного измельчения капель жидкостей. Применяются два основных критерия в качестве критических условий распада капель: перегрев границы вода/топливо до температуры выше температуры нуклеации (кипения), рост размера пузыря в капле в 2–3 раза относительно начального размера последней.

В качестве компонентов родительских капель использованы типичные для эмульгированных и суспензионных топлив жидкости [1]: вода и рапсовое масло. Концентрация масла в родительской капле варьировалась в диапазоне, при котором в [1] зарегистрированы эффективные условия микро-взрывной фрагментации: 10–90 %. Для разделения компонентного состава вторичных фрагментов в воду добавлялся Rhodamine В [5].

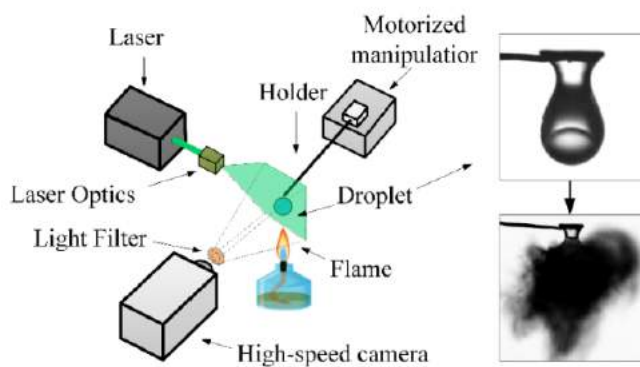
Для создания высокотемпературной пламенной зоны (рис. 1) применялось горелочное устройство. Максимальная температура пламенной зоны около 1120 К. За счет варьирования высоты положения капли относительно основания горелки варьировалось значение температуры газовой среды вокруг капли. Двухжидкостные капли от места генерации до зоны нагрева перемещались на расстояние 100 мм за время движения около 3 с.



a



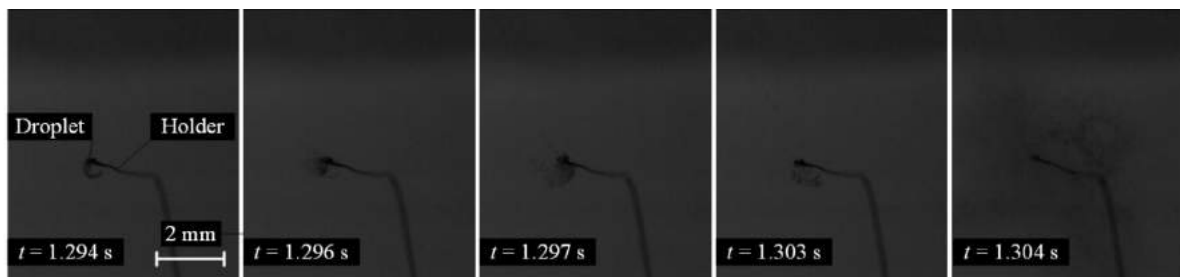
b



c

Рис. 9. Схема измерения температуры в области регистрации (а); схемы использования Shadow Photography (SP) (в) и Planar Laser Induced Fluorescence (с)

Проведенные эксперименты позволили выявить типичные режимы фрагментации капель: паффинг (частичная фрагментация, при которой образуются вторичные фрагменты радиусами более 10 мкм и общим количеством не более 25 капель) и микро-взрыв (полный распад родительской капли с образованием мелких вторичных фрагментов с размерами менее 10 мкм). Кадры с изображением капель для соответствующих режимов при разных схемах нагрева показаны на рис. 2.



a

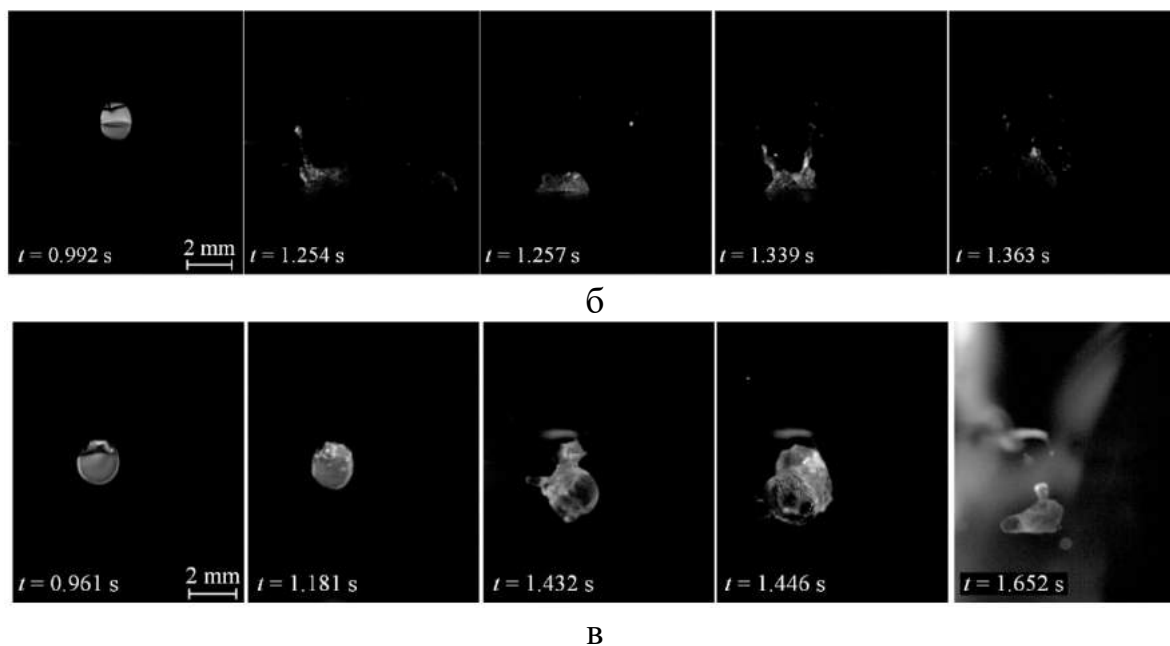


Рис. 2. Кадры с изображением каплей вода/рапсовое масло (вода 50 об.%, $R_{d0}=1.061$ мм) для режимов фрагментации паффинг/микро-взрыв при $T_a \approx 843$ К: в муфельной печи (а); на разогретой подложке (б); в пламени горелки (в)

Определяющее влияние на режим и характеристики фрагментации оказывали исходные условия и варьируемые параметры. Наибольшее влияние оказывали температура внешней газовой среды, тепловой поток к капле, а также схемы нагрева. Так варьирование температуры за счет удаления или приближения капли к основанию горелочного устройства приводило к переходу от одного к другому режиму фрагментации (от паффинга к микро-взрыву). Увеличение температуры газовой среды вокруг капли способствовало росту скоростей нагрева межкомпонентной границы вода/топливо, а, следовательно, и к росту степени перегрева относительно равновесной температуры кипения воды (373.15 К). Энергия, запасённая в двухжидкостной капле, растёт с увеличением температуры. Как следствие, реализуется переход от режима частичной фрагментации (паффинг) к полной фрагментации (микро-взрыв). Увеличение площади поверхности испарения жидкости кратно возрастает от 10–20 раз до 100–200 раз.

Библиографический список

1. D.V. Antonov, M.V. Piskunov, P.A. Strizhak. Breakup and explosion of droplets of two immiscible fluids and emulsions \ International Journal of Thermal Sciences, 2019. С. 30–41.
2. D. Antonov, M. Piskunov, P. Strizhak, D. Tarlet, J. Bellettre. Dispersed phase structure and micro-explosion behavior under different schemes of water-fuel droplets heating \ Fuel, 2020.
3. M.A. Ismael, M.R. Heikal, A.R.A. Aziz, F. Syah, E.Z. Zainal A., C. Crua. The effect of fuel injection equipment on the dispersed phase of water-in-diesel emulsions \ Applied Energy, 2018.
4. S.S. Sazhin, T. Bar-Kohany, Z. Nissar, D. Antonov, P.A. Strizhak, O.D. Rybdylova. A new approach to modelling micro-explosions in composite droplets \ International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020.

5. F. López Arbeloa, T. López Arbeloa, M.J. Tapia Estévez, I. López Arbeloa. Photophysics of rhodamines. Molecular structure and solvent effects \ The Journal of Physical Chemistry, 1991. С. 2203–2208.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 23-69-10006

Антонов Д.В., Высокоморная О.В., Стрижак П.А.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Томск, 634050, пр. Ленина, 30

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ ВТОРИЧНЫХ КАПЕЛЬ ПРИ СОУДАРЕНИЯХ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТЕЙ

Процессы вторичного измельчения капель способствуют увеличению площади контакта жидкости с греющей средой, что приводит к снижению расходов энергии, повышению скорости выгорания, улучшению процессов распыления топлива в камере сгорания. Известны несколько механизмов вторичного дробления капель жидкостей [1]: (1) за счет теплового перегрева (в капельных потоках неоднородных жидкостей, когда в капле возникает граница раздела фаз, при нагревании образуются очаги локального парообразования, развитие которых приводит к разрушению оболочки капли); (2) за счет аэродинамического воздействия газового потока, в котором происходит движение капель жидкости; (3) в результате соударения капель при движении в газовой среде.

На сегодняшний день не создана унифицированная модель для изучения столкновений капель многокомпонентных топлив, учитывающая связь последствий распада с влиянием многочисленных факторов, в связи с недостаточной экспериментальной базой. Поэтому исследование характеристик вторичных капель при дроблении капель жидкостей в результате их взаимодействия с учетом таких параметров как соотношение размеров, скоростей взаимодействующих капель, свойств взаимодействующих жидкостей является важным шагом для развития существующих и создания новых моделей столкновения капель.

Цель настоящей работы – разработка модели, позволяющей достоверно прогнозировать интегральные характеристики вторичных капель при соударениях исходных капель жидкости.

Столкновения капель воды можно описать с использованием физических свойств, а именно плотности, вязкости, поверхностного натяжения и других свойств. Применены три безразмерных критерия:

- 1) число Вебера $We = \frac{\rho U_{rel}^2 D_0}{\sigma}$;
- 2) число Рейнольдса $Re = \frac{\rho U_{rel} D_0}{\mu}$;

3) отношение диаметров $\Delta = \frac{D_s}{D_L}$.

При моделировании выделены четыре режима столкновений: коагуляция, отскок, разлет и дробление.

Математическое моделирование проводилось с помощью модели VOF. Жидкая и газовая фазы рассматриваются в качестве единой многокомпонентной среды, пространственное распределение фаз в пределах расчетной области определяется с помощью специальной функции маркера $F(x, y, z, t)$. Объемная доля фазы в расчетной ячейке принимается равной $F(x, y, z, t) = 0$, в случае если ячейка пустая, $F(x, y, z, t) = 1$, в случае если ячейка полностью заполнена фазой, $0 < F(x, y, z, t) < 1$, в случае если через ячейку проходит граница раздела фаз.

Уравнение объемной доли жидкой и паровой фаз:

$$\frac{\partial F_1}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v} F_1) = \frac{\dot{m}_1}{\rho_1}, \quad \frac{\partial F_2}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v} F_2) = \frac{\dot{m}_2}{\rho_2}, \quad \dot{m}_2 = -\dot{m}_1;$$

Уравнение импульса:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_{12} \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho_{12} \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \left[\mu_{12} \left(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T \right) \right] + \rho_{12} \vec{g} + f_{r12},$$

где $\rho_{12} = \rho_1 \cdot F_1 + \rho_2 \cdot F_2$, $\mu_{12} = \mu_1 \cdot F_1 + \mu_2 \cdot F_2$;

Уравнение энергии:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_{12} h_{12}) + \nabla \cdot (\rho_{12} \vec{v} h_{12}) = \nabla \cdot (\lambda_{12} \nabla T) + S_{h12},$$

где $h_{12} = \frac{F_1 \rho_1 h_1 + F_2 \rho_2 h_2}{F_1 \rho_1 + F_2 \rho_2}$, $h_1 = C_1 (T - 298.15)$, $h_2 = C_2 (T - 298.15)$, $\lambda_{12} = \lambda_1 F_1 + \lambda_2 F_2$.

Модель фазового перехода пар–жидкость, предложенная Ли:

$$\dot{m}_2 = -\dot{m}_1 = f F_1 \rho_1 \frac{T - T_{\text{sat}}}{T_{\text{sat}}}, \quad T > T_{\text{sat}} \text{ (boiling process);}$$

$$\dot{m}_1 = -\dot{m}_2 = f F_2 \rho_2 \frac{T_{\text{sat}} - T}{T_{\text{sat}}}, \quad T < T_{\text{sat}} \text{ (condensation process).}$$

На рис.1 представлено сравнение режимов взаимодействия двух капель воды в эксперименте и модели для нескольких входных начальных параметров. Как можно видеть из рис. 1, режимы взаимодействия капель совпадают, контуры капель в процессе слияния похожи, четко прослеживается образование жидкого мостика между каплями в процессе коагуляции в модели и эксперименте. Некоторое различие режимов взаимодействия и последствий столкновений капель можно объяснить допущениями, принимаемыми в модели, а также погрешностями при определении ключевых параметров в эксперименте.

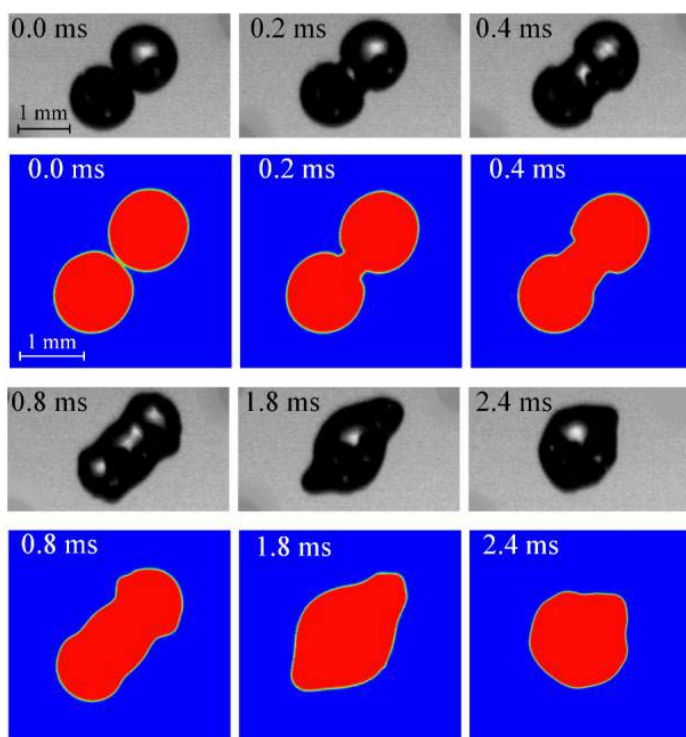


Рис. 10. Кадры взаимодействия двух капель воды по результатам экспериментов и теоретических расчетов:

$T_a = T_d = 27 \text{ }^\circ\text{C}$ $R_{d1} = 0.601 \text{ мм}$, $R_{d2} = 0.596 \text{ мм}$,
 $U_{d1} = 1.67 \text{ м/с}$, $U_{d2} = 2.05 \text{ м/с}$, $\alpha_1 = 50^\circ$; $\alpha_2 = -85^\circ$

регистровалась деформация поверхности капель в процессе движения перед взаимодействием.

Экспериментальные погрешности в определении положения центров капель, скоростей, а также углов атаки оказывают существенное влияние на центричность удара и, следовательно, последствия соударений.

Библиографический список

1. D.V. Antonov, R.S. Volkov, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak. Experimental Study of the Effects of Collision of Water Droplets in a Flow of High-Temperature Gases \ \ Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2016.

Работа выполнена при поддержке программы развития Национального исследовательского Томского политехнического университета Приоритет-2030-НИП/ЭБ-038-375-2023.

1. В модели не учитывается движение капли по третьей координате (по координате z), которое может оказывать существенное влияние на характеристики взаимодействия двух капель. Смещение центров капель по третьей координате при соударениях в экспериментах приводит к их дополнительному вращательному движению, изменению форм капель, последствий соударений, а также времен взаимодействия.

2. При расчетах не учитывались зависимости свойств воды от температуры. Предполагается, что они будут оказывать влияние на характеристики взаимодействия двух капель, но не более чем на 10-15%.

3. При расчетах принималось допущение, что капли имеют в начальный момент времени сферическую форму, в экспериментах регистрировалась деформация поверхности капель в процессе движения перед взаимодействием.

Финошкина Д.В., Мелихов В.И., Мелихов О.И.
Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, ул. Красноказарменная, 14

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ РАСПЛАВОВ С ВОДОЙ ПРИ ИХ КОНТАКТЕ

При некоторых сценариях развития аварий на АЭС возможен прямой контакт высокотемпературного расплава с водой, который может привести к паровым взрывам, представляющим угрозу целостности конструкций АЭС [1]. В качестве расплава может быть рассмотрен расплав материалов активной зоны энергетического реактора при тяжелой аварии на АЭС с реактором с водой под давлением [2] или жидкометаллический теплоноситель (свинец или свинцово-висмутовый сплав) на АЭС с реактором на быстрых нейтронах при аварии с разрывом трубки парогенератора [3].

Возможность парового взрыва в многофазной смеси существенно зависит от характеристик дисперсных образований (капли расплава в паровых оболочках, находящиеся в воде, или капли воды в паровых оболочках, находящиеся в расплаве), в первую очередь, от их размера. Размер капель определяется характерным масштабом растущих (вследствие гидродинамической неустойчивости) возмущений на межфазной поверхности, которые затем превращаются в дисперсные образования. В данном исследовании масштаб возмущений и, соответственно, размер капель находится методом линейного анализа гидродинамической устойчивости поверхности раздела фаз для случаев: 1) струя расплава, окруженная паровой оболочкой, движущаяся в воде, 2) струя воды, окруженная паровой оболочкой, движущаяся в жидком свинце, и 3) растущий из точечного источника водяной шар, окруженный паровой оболочкой, в жидком свинце. Расход и энтальпия поступающей в жидкометаллический теплоноситель (расплав) воды из разрыва теплообменной трубки (для второго и третьего случаев) определялись по неравновесной односкоростной модели критического истечения, реализованной в теплогидравлическом коде ATHLET [4].

Анализ первого и второго случаев был выполнен в цилиндрической постановке на основе модели гидродинамической устойчивости Кельвина-Гельмгольца, предложенной в [5]. При рассмотрении третьего случая использовались результаты теории Рэлея-Тейлора гидродинамической устойчивости поверхности раздела жидкостей, движущейся с ускорением. Рост пароводяного шара в окружающем жидкометаллическом теплоносителе описывался интегральными уравнениями сохранения массы и энергии, дополненными уравнением Рэлея-Плессета для скорости движения поверхности раздела.

Результаты выполненных расчетов показывают, что в третьем случае фрагментация происходит медленно, в то время как в двух первых случаях она достаточно эффективна, что приводит к распаду струй (воды или расплава) на коротких расстояниях.

Библиографический список

1. В.И. Мелихов, О.И. Мелихов, С.Е. Якуш. Термическое взаимодействие высокотемпературных расплавов с жидкостями \ \ Теплофизика высоких температур, 2022. С. 280–318.
2. В.И. Мелихов, О.И. Мелихов, С.Е. Якуш. Гидродинамика и теплофизика паровых взрывов. 2020. 276 с.
3. А.В. Безносков, Т.А. Бокова. Оборудование энергетических контуров с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями в атомной энергетике. 2012. 536 с.
4. ATHLET Mod2.1 Cycle A. Models and Methods. Report GRS-P-1/Vol4, July 2006.
5. D.V. Finoshkina, O.I. Melikhov, V.I. Melikhov. Evaluation of melt-water premixture formation due to hydrodynamic instabilities \ \ Proceedings of the 30th International Conference “Nuclear Energy for New Europe”, Bled, Slovenia, September 6-9, 2021, Društvo jedrskih strokovnjakov Slovenije (Nuclear Society of Slovenia), Ljubljana, Slovenia, P. 412.1-412.8.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 21-19-00709

Харламов Г.В.

Сибирский государственный университет путей сообщения,
Новосибирск, 630049, ул. Дуси Ковальчук, 191

МОДЕЛИРОВАНИЕ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИФФУЗИИ В ГАЗАХ И ЖИДКОСТЯХ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

В работе приведены результаты расчетов коэффициентов диффузии в однокомпонентной и бинарной молекулярных системах методом молекулярной динамики в широком диапазоне плотности и температуры. Температурная зависимость коэффициентов диффузии показывает, что механизмы диффузии в газах и жидкостях сильно различаются. Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными в газообразном и жидком аргоне показывает хорошее согласие [1 – 6].

Расчеты проводились в ячейке, содержащей от 1000 до 30000 частиц, взаимодействующих друг с другом согласно потенциалу Леннард-Джонса. Параметры потенциала соответствовали атомам аргона и криптона (в бинарной системе). Сначала рассчитывалась автокорреляционная функция скорости атомов аргона или криптона, а затем коэффициенты диффузии по формуле Грина – Кубо. Использовались безразмерные приведенные единицы измерения [1, 2].

На рис. 1 показаны результаты расчетов приведенных коэффициентов самодиффузии (D_{md}/D_0) атомов аргона в однокомпонентной системе. Коэффициенты самодиффузии, рассчитанные методом молекулярной динамики делились

на коэффициенты диффузии для разреженных газов, вычисленных по теории Больцмана – Чепмена – Энскога:

$$D_0 = \frac{3\sqrt{\pi m_1 k T}}{8m_1 \rho \pi \sigma_{11}^2 \Omega^{(1,1)*}}. \quad (1)$$

Из данных рисунка следует, что при низкой и средней плотности системы и температурах выше критической ($T = 2, 3, 4$) приведенные коэффициенты самодиффузии совпадают. По этим точкам можно выполнить аппроксимацию

$$f_{sd} = \frac{D_{md}}{D_0} = 1 - 0.547 \rho + 0.3 \rho^2 - 0.574 \rho^3. \quad (2)$$

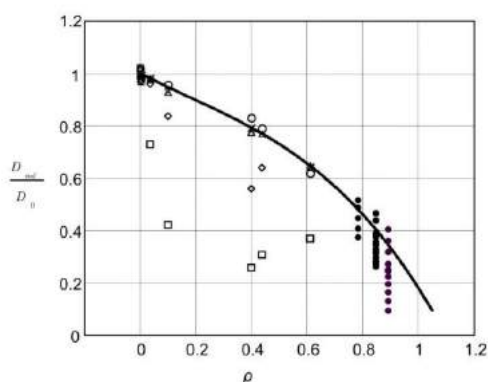


Рис. 1. Зависимость коэффициента диффузии атомов аргона от плотности при различных температурах:

- – $T = 0.75$; ◇ – $T = 1$; ○ – $T = 2$; △ – $T = 3$; × – $T = 4$;
- – точки для жидкой фазы.

механизм). Этот механизм связан с коллективным движением атомов вместе со своим окружением в жидкой фазе.

При определенных условиях в системе наблюдается образование нанокпель в паре или пузырьков в жидкости [6].

Библиографический список

1. Жилкин С.В., Харламов Г.В. Исследование диффузии леннард-джонсовских частиц в условиях фазового перехода методом молекулярной динамики // Оптика атмосферы и океана, 2015. Т. 28. № 2. С. 138-142.
2. Kharlamov G. V. and Zhilkin S. V. Molecular Dynamics Simulation of the Molecular Diffusion in Gases and Liquids // Engineering Letters, 2017. V. 25. N 2. P. 222-227.

3. Kharlamov G. V. and Zhilkin S. V. The molecular dynamics simulation of self-diffusion in gases and liquids // Journal of Physics: Conference Series, 2017. V. 899. 052009.

4. Kharlamov G. V. About diffusion mechanisms in gases and liquids from data of molecular dynamics simulation // Journal of Physics: Conference Series, 2018. V. 1105. 012152.

5. Kharlamov G.V. Molecular diffusion in gases and liquids // Journal of Physics: Conference Series, 2021. V. 2119. 012122.

Чукалин А.В., Петров А.В., Шеркунов В.В.

Ульяновский государственный технический университет «УлГТУ»,
Ульяновск, 432027, Северный Венец, 32

РАСЧЕТ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕНОСА КОЛИЧЕСТВА ДВИЖЕНИЯ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

Актуальным решением для перехода к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике является усовершенствование систем управления пограничным слоем (УПС). На сегодняшний день представлено множество активных и пассивных систем УПС [1-3], многие из которых нашли прикладной характер, однако развитие технических устройств, требования топливной и экологической эффективности подводят к необходимости в разработке новых и эффективных механизмов УПС.

В ходе изучения процессов, протекающих на демпфирующей поверхности в турбулентном пограничном слое (патент РФ № 2018131418), определены зависимости и предложены выражения позволяющие определить интенсивность турбулентного переноса количества движения – α , с учётом количественных и качественных характеристик полостей. Выражение (1) позволяет определить интенсивность турбулентного переноса количества движения на внутренней стороне демпфирующей поверхности с учетом влияния полусферических демпфирующих полостей. Выражение (2) позволяет определить интенсивность турбулентного переноса количества движения на внешней стороне демпфирующей поверхности с учетом влияния полусферических выступов.

$$\frac{\alpha}{\alpha_0} = \frac{\sqrt{1 - 8,4 \cdot 10^5 A_v^* f^2 \exp(1-n)}}{1 + 21,4 \frac{u_\infty du_\infty / dx}{u_0 (du/dy)_{y=0}}}, \quad (1)$$

$$\frac{\alpha}{\alpha_0} = \frac{0,54 \sqrt{(h/d)^{0,12} \exp(-f \tau_w)}}{1 + 21,4 \frac{u_\infty du_\infty / dx}{u_0 (du/dy)_{y=0}}}, \quad (2)$$

где A_v^* – коэффициент, характеризующий работу полусферических демпфирующих полостей, индекс v характеризует объём демпфирующей полости; \bar{f} – относительная площадь перфорации; n – количество перфорационных отверстий, приходящихся на каждую демпфирующую полость; u_∞ – скорость потока вне пограничного слоя (в ядре потока), м/с; x – продольная координата, м; u – скорость в заданной точке, м/с; h – высота полусферического выступа, м; d – диаметр полусферического выступа, м; f – относительная плотность расположения выступов на стенке канала (отношение суммарной площади поверхности под выступами к площади исходного гладкой поверхности без выступов) принимаемые в диапазоне от 0,056 до 0,485 [4].

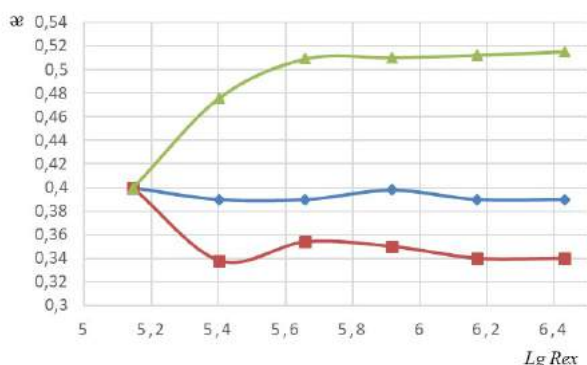


Рис. 11. Интенсивность турбулентного переноса α в зависимости от типа обтекаемой поверхности:

▲ – сторона воздействия полусферических выступов; ◆ – без воздействий; ■ – сторона воздействия демпфирующих полостей

На рис. 1 представлены результаты расчетов по выражениям (1) и (2). Интенсивность турбулентного переноса количества движения претерпевает значительные изменения по длине поверхности, приводя к изменению турбулентной структуры в пограничном слое, что в конечном счете изменяет интенсификацию теплообмена. Предложенные выражения позволяют оценить влияние внешних воздействий на пограничный слой, для дополнительной апробации расчетов запланировано проведение исследования пограничного слоя с использованием оптического метода его визуализации.

Библиографический список

1. Проблемы снижения турбулентного трения активными и пассивными методами (обзор) В.И. Корнилов. Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, Новосибирск 2005. с. 183 – 208.
2. Influence of the depth of single-row oval-trench dimples inclined to laminar air flow on heat transfer enhancement in a narrow micro-channel / S. A. Isaev, I. A. Popov, A. G. Sudakov [et al.] // . – 2019. – Vol. 134. – P. 338-358.
3. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое / С. С. Кутателадзе, А. И. Леонтьев Изд. 2-е., перераб. М.: Энергоатомиздат, 1985. 318 с.
4. Ильинков, А. В. Теплоотдача на полусферических выступах при различной плотности их расположения на стенке канала / А. В. Ильинков, В. Г. Ильинкова, А. В. Щукин // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2011. – № 2. – С. 43-47.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-01173, <https://rscf.ru/project/23-79-01173/>

Черника И.М., Болога М.К.

Институт прикладной физики, Государственный университет Молдовы
Р. Молдова, Кишинев, МД – 2028, ул. Академическая, 5

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛООБМЕНА И КИПЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ НА МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ

Использование электрического поля для целей интенсификации конвективного теплообмена в жидкостях и газах можно отнести к выдаче первого патента [1]. Впоследствии уже в первоначальных работах, посвященных интенсификации пузырькового кипения в электрическом поле, было установлено значительное улучшение теплоотдачи [2], но несмотря на обнадеживающие результаты, многообещающий метод так и не нашел должного практического применения. Интерес к нему возрос, главным образом, в связи с разработкой технических устройств, способных доставлять теплоносители к теплообменным поверхностям [3] и созданием более совершенных и надежных испарительных систем охлаждения и термостатирования [2, 4].

Успешное решение этой важной теплофизической задачи предполагает расширение и углубление исследований гидродинамики и теплообмена в электрических полях, в том числе при фазовых превращениях. Значительный интерес представляют исследования по интенсификации теплообмена и пузырькового кипения под воздействием электрического поля на модифицированных поверхностях. Электрический метод относится к наиболее эффективным средствам интенсификации теплообмена при фазовых превращениях [2, 4-6], когда коэффициент теплоотдачи может возрасти в 10 раз и более в зависимости от напряженности поля.

Задачей представленной работы являлось исследование интенсификации теплообмена при кипении в электрическом поле на модифицированных поверхностях. Теплоотдающим элементом служила нержавеющая горизонтальная трубка диаметром 4 мм и длиной 80 мм, обогреваемая прямым пропусканием электрического тока и погруженная в свободный объем насыщенной жидкости – гексан с температурой кипения 68,7°C. На наружной ее поверхности электроискровым легированием нанесен слой нержавеющей стали толщиной 0,05–0,075 мм с развитой шероховатостью. Высоковольтным электродом служит латунная решетка диаметром 60 мм, состоящая из параллельных стержней диаметром 1 мм и расположенная сверху от поверхности кипения на расстояниях 2–8 мм. На наружной поверхности стержней наносились насечки с целью создания дополнительного притока жидкости из верхних слоев к поверхности нагрева. Использовалась электрическая схема с отрицательной полярностью высоковольтного электрода, потенциал которого изменялся скачкообразно до 25 кВ.

В ходе опытов измерялись температура кипящей жидкости T_s , температура стенки $T_{ст}$, сила тока I и напряжение U , подаваемое на трубке, потенциал электрического поля Φ и давления насыщения p_s . Эксперименты проводились при изменении режимных параметров в диапазонах $q=5 \cdot 10^3 - 1,50 \cdot 10^5$ Вт/м², $\Delta T = T_{ст} -$

$T_s=0,5-30$ К, на установке и по методике [4]. Наряду с изучением теплообмена проводились визуальные наблюдения и киносъемка процесса кипения.

На рис. 1 приведена типичная зависимость коэффициента теплоотдачи α_e от теплового потока q при кипении в электрическом поле различной напряженности E и в его отсутствии (α_0). Влияние поля наиболее ярко выражено при малых и умеренных тепловых потоках, когда на теплоотдающей поверхности наблюдается слаборазвитое кипение. В этом режиме коэффициент теплоотдачи достигает шестикратного увеличения. С увеличением q прирост коэффициента теплоотдачи за счет поля уменьшается. В области развитого пузырькового кипения эффект поля невелик и в зависимости от опытных условий может быть как положительным, так и отрицательным. Слабое воздействие поля при больших тепловых нагрузках и малых напряженностях поля объясняется доминирующим влиянием парообразования по сравнению с электрической конвекцией. С ростом напряженности поля роль электроконвекции в механизме кипения растет и теплообмен интенсифицируется.

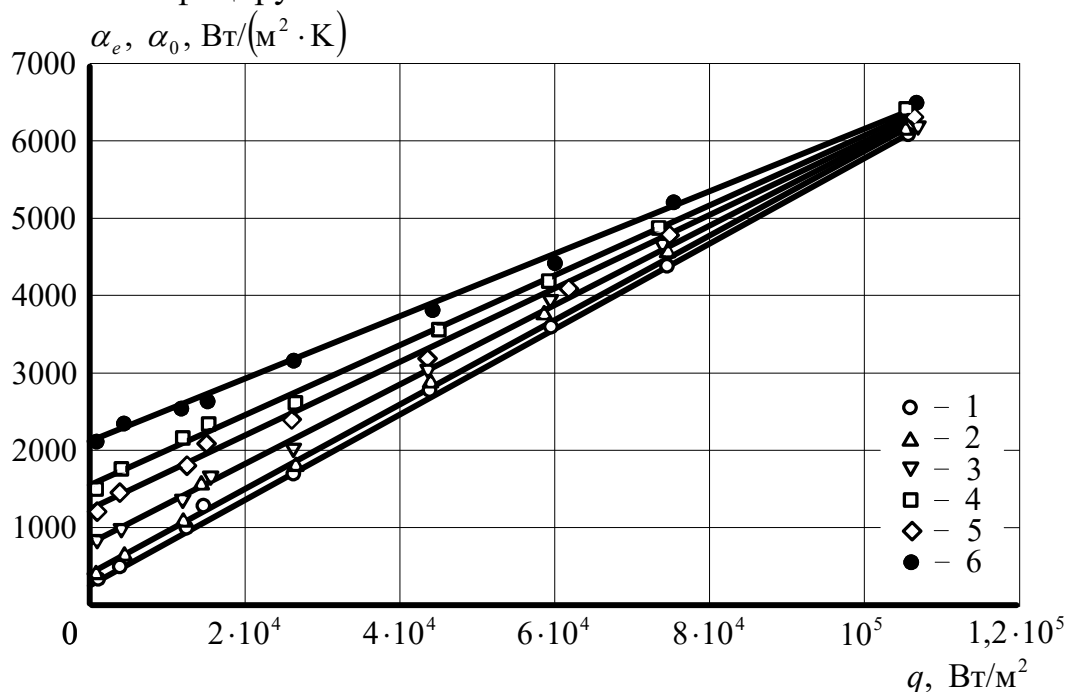
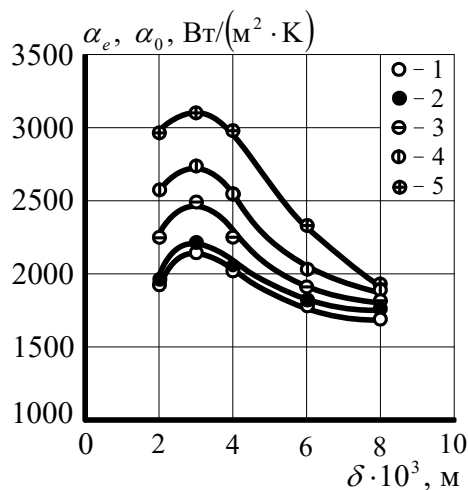


Рис. 1. Теплообмен при кипении под воздействием поля:
1— $E=0$; 2—8,33; 3—16,67; 4—25; 5—33,33; 6—41,67 кВ/см.

Влияние межэлектродного расстояния δ на интенсивность теплообмена неоднозначно (рис. 2). Максимальная интенсификация зафиксирована при зазоре 3 мм, что соизмеримо с отрывным диаметром паровых пузырей. С ростом напряженности поля коэффициент теплоотдачи α_e увеличивается, и наибольший рост наблюдается при оптимальном зазоре. Отмечается также снижение влияния поля при межэлектродных расстояниях $\delta > 3$ мм. Можно предположить, что существует расстояние между высоковольтным электродом и поверхностью нагрева, при котором влияние поля на теплообмен при кипении не проявляется.



**Рис. 2. Зависимость коэффициента теплоотдачи от межэлектродного расстояния δ и потенциала поля Φ при $q=30000 \text{ Вт/м}^2$:
1– $\Phi=0$; 2–2,5; 3–5,0; 4–7,5; 5–10,0 кВ.**

Электрическое поле коренным образом изменяет и гидродинамику при кипении. Под воздействием поля происходит уменьшение размеров, генерируемых с поверхности нагрева пузырьков и плотности центров парообразования, а также изменение траектории движения пузырьков. Подача высокого потенциала сопровождается массовым отрывом паровых пузырьков со всей поверхности нагрева, ускоренным их движением и проскакиванием сквозь сетчатый электрод, что в итоге приводит к значительному росту интенсивности теплообмена.

Расположение высоковольтного электрода сверху и на близком расстоянии (2–8 мм) от поверхности нагрева может существенно влиять на гидродинамику и теплообмен при кипении. Возможно, подобные эффекты незначительны, когда размеры высоковольтного электрода невелики. В этом случае масса горячей жидкости выталкивается свободно от поверхности нагрева в основной поток жидкости и таким же образом поток холодной жидкости опускается к поверхности нагрева. Между паром и жидкостью происходит интенсивное перемешивание, обеспечивающее высокую интенсивность теплообмена. Когда высоковольтный электрод соизмерим по размерам с поверхностью нагрева, его гидравлическое сопротивление растет и в результате уменьшается интенсивность перемешивания жидкости и пара. Применение электрода большого размера характеризуется значительно меньшим темпом роста коэффициента теплоотдачи, а при определенных напряженностях наблюдалась и тенденция стабилизации эффектов интенсификации.

Таким образом, можно заключить, что электрическое поле существенно интенсифицирует теплоотдачу в различных режимах кипения. Электрическим методом, достигается интенсификация теплообмена до шести раз, по сравнению с отсутствием поля и проявляется ряд существенных особенностей процесса.

Библиографический список

1. Cooper P. EHD Enhancement of Nucleate Boiling \ J. Heat Transfer Trans. ASME. 1990. V. 112. С. 458–464.

2. М.К. Болога, Г.Ф. Смирнов, А.Б. Дидковский, С.М. Климов. Теплообмен при кипении и конденсации в электрическом поле. – Кишинев: Штиинца, 1987. – 239 С.

3. Ю.К. Стишков, А.А. Остапенко. Электродинамические течения в жидких диэлектриках. – Л: Изд-во ЛГУ, 1989. – 172 С.

4. I.M. Chernica, M.K. Bologna, O.I. Mardarskii, I.V. Kozhevnikov. Action of electrohydrodynamic flow on heat transfer at boiling \ Journal of Electrostatics, 2021. V. 109. doi.org/10.1016/j.elstat.2020.103524.

5. S.W. Ahmad. Combined effect of electric field and surface modification on pool boiling of R-123 \ Disertation of the Brunel University (USA), 2012. 246 С.

6. А.А. Еронин. Особенности тепловых процессов при кипении диэлектрических жидкостей в неоднородном электрическом поле \ Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: Объединенный институт высоких температур, 2012. 17 С.

Работа выполнена при поддержке правительства Республики Молдова в рамках проекта ANCD 20.80009.5007.06.

Исламова А.Г., Кропотова С.С., Шлегель Н.Е., Стрижак П.А.

Национальный исследовательский
Томский политехнический университет,
Томск, 634050, пр. Ленина, 30

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТИ С ЧАСТИЦАМИ УГЛЯ

Столкновения капель с твердыми поверхностями (стенками, подложками, кольцами, частицами и др.) реализуются в различных технологических приложениях, таких как впрыск топлива в объем двигателя внутреннего сгорания и камеры энергетических установок, охлаждение распылением, металлургия, распылительная сушка в пищевой и фармацевтической промышленности, пожаротушение, пылеулавливание и др. Во всех этих приложениях важную роль играют соударения капель жидкостей как механизм их вторичного измельчения. Проведен ряд работ по исследованию характеристик столкновения капель различных жидкостей с твердыми поверхностями. Определены основные параметры, влияющие на режим взаимодействия, в частности: характеристики поверхности свойства жидкости (вязкость, плотность и поверхностное натяжение) [1,2], скорость движения и размеры капель [3,4], температура поверхности и окружающей среды [5,6]. Целью работы являлось установление основных характеристик процесса столкновения капель суспензий с углеродными частицами, при варьировании вязкости, поверхностного и межфазного натяжения жидкости.

Характеристики столкновения капель суспензий при варьировании вязкости, поверхностного и межфазного натяжения жидкости с твердыми частицами угля изучены при помощи теневой видеофиксации [7]. При проведении экспери-

ментов в качестве основной исследуемой жидкости использовалась дистиллированная вода. Твердую фазу в суспензии представляли частицы каменного тощего угля размерами около 80 мкм. Концентрация угольных частиц варьировалась в диапазоне от 1 масс.% до 50 масс.%. С целью варьирования реологических характеристик суспензии использовались добавки к жидкости: трансформаторное масло (10%), эмульгатор D_cD (0,8 г/л и 1,6 г/л), неонол (0,5 масс.%), Твин 20 и Твин 80 (0,5 масс.%). При проведении экспериментов температура суспензии составляла 20 °С, 50 °С и 80 °С. По результатам экспериментальных исследований влияния реологических характеристик суспензии на исход взаимодействия капли с частицей построены режимные карты в системах координат, учитывающих безразмерный линейный параметр, числа Вебера и Онезорге. Обосновано, что добавление поверхностно-активных веществ способствует понижению значений критической результирующей скорости движения капли, достаточной для ее распада. Установлено, что нагрев суспензии до 80 °С привел к увеличению количества вторичных фрагментов на 30-40 %. Выделены эффекты уменьшения среднего размера капель на 25-35% за счет снижения вязкости и поверхностного натяжения суспензии. Представлены аппроксимационные выражения для описания установленных зависимостей.

Библиографический список

1. C. Antonini, F. Villa, I. Bernagozzi, A. Amirfazli, M. Marengo. Drop Rebound after Impact: The Role of the Receding Contact Angle \\\ Langmuir, 2013. Vol. 29. P. 16045-16050.
2. Z. Li, Q. Kong, X. Ma, D. Zang, X. Guan, X. Ren. Dynamic Effects and Adhesion of Water Droplet Impact on Hydrophobic Surfaces: Bouncing or Sticking \\\ Nanoscale, 2017. Vol. 9. P. 8249-8255.
3. L. Shao, D. Liu, J. Ma, X. Chen. Experimental Characterization of the Effect of Liquid Viscosity on Collisions between a Multi-Component Droplet and a Heated Particle // Chemical Engineering Science, 2022. P. 261.
4. V.V. Dubrovsky, A.M. Podvysotsky, A.A. Shraiber. Particle Interaction in Three-Phase Polydisperse Flows \\\ International Journal of Multiphase Flow, 1992. Vol.18. P. 337-352.
5. V. Sechenyh, A. Amirfazli. An Experimental Study for Impact of a Drop onto a Particle in Mid-Air: The Influence of Particle Wettability \\\ Journal of Fluids and Structures, 2016. Vol. 66. P. 282-292.
6. K. Shi, X. Duan. Freezing Delay of Water Droplets on Metallic Hydrophobic Surfaces in a Cold Environment \\\ Applied Thermal Engineering, 2022. Vol. 216. P. 119131.
7. A.G. Islamova, S.A. Kerimbekova, N.E. Shlegel, P.A. Strizhak. Droplet-Droplet, Droplet-Particle, and Droplet-Substrate Collision Behavior \\\ Powder Technology, 2022. Vol. 403. P. 117371.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 23-71-10040

Асрорзода Н.С., Сафаров М.М.

Таджикский технический университет имени акад. М.С. Осими,
г. Душанбе, Таджикистан

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТВЕРДЫХ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРОВ С ПОМОЩЬЮ МОСТИКА УИТСТОНА

В работе приводятся результаты экспериментального исследования теплопроводности электроизоляционного материала в твердой фазе в интервале температуры (293-343) К. Для измерения коэффициента теплопроводности исследуемых электроизоляционных материалов нами использован метод, осуществляемый мостиком Уитстона. Общая относительная погрешность измерения коэффициента теплопроводности, получаемая данным методом (наша разработка, по которой подана заявка на изобретение), при доверительной вероятности 95% составляет 0,4%.

Для составления обобщенных уравнений и численных расчетов дифференциальных уравнений теплопроводности необходимо знание теплофизических характеристик исследуемых веществ при различных параметрах состояния. Известно, что диапазон изменения параметров состояния (температуры, концентрации нанонаполнителей) зависит от состояния вещества, т.е. жидких, газообразных и твердых. Задача нашего исследования на данном этапе заключается в измерении коэффициента теплопроводности композиционных материалов на основе высокомолекулярного полимерного соединения.

Измерительный мост Уитстона является, по сути, электрическим аналогом аптекарских рычажных весов, так как здесь используется подобный компенсационный метод измерения. Принцип действия измерительного моста основан на уравнивании потенциалов средних выводов двух включенных параллельно ветвей резисторов, в каждой ветви по два резистора. В качестве части одной из ветвей включается резистор, величину которого требуется узнать, а в другую – резистор перестраиваемого сопротивления (реостат или потенциометр).

Схему моста Уитстона часто используют для измерения температуры, когда в одну из ветвей моста включают термометр сопротивления в качестве неизвестного резистора. В любом случае, чем больше разность сопротивлений в ветвях, тем больший ток будет течь через диагональ, а при изменении сопротивлений станет изменяться и ток диагонали.

С помощью экспериментальной установки мостика Уитстона можно определить сопротивление проводников и коэффициент теплопроводности при изменении длины проводника с использованием реохорда [1-4].

Используя реохорд с помощью гальванометра в цепи, приравниваем ток к нулю и соответственно измеряем длину проводника с помощью линейки. Известно, что сопротивление проводников прямо пропорционально их длине, по-

этому напишем следующее выражение: $(\frac{r_1}{r_2} = \frac{l_1}{l_2})$. Известно, что коэффициент теплопроводности твердых тел зависит от температуры, концентрации нанонаполнителей.

$$\lambda=f(T_a, T_d, T_b, C). \quad (3)$$

Установлено, что с повышением температуры теплопроводность электроизоляционных материалов на основе полимеров растет по закону прямой линии. Добавка фуллеренов C_{60} в твердой фазе приводит к повышению теплопроводности электроизоляционных материалов на основе полимера.

На основе закона термодинамического подобия и экспериментальных данных получены аппроксимационные уравнения.

Библиографический список

1. Калашников, Г.С. Электричество, М. Наука, 1985, 185 с.
2. Телеснин, Р.В., Яковлев В.Ф. Курс физики. Электричество. М., 1969. 340с
3. Сафаров, М.М., Хусраов Дж.Х. Методические разработки по курсу «Электричество». Санадвора, Душанбе, 1995.-45 с.
4. Маджидов, Х., Сафаров М.М. Лабораторные работы по электричеству и магнетизму/ мет. разработки/ ДГПИ им. К. Джураева, Душанбе, 1991.-86 с.
5. Ушаков, А.В. Туннельно-резонансные методы идентификации и измерения концентрации нанообъектов в аморфных неорганических компонентах, / Александр Васильевич Ушаков// Автореферат дисс. к.т.н, Тамбов-2017.-17 с.
6. Ушаков, А.В. Туннельно-резонансные методы идентификации и измерения концентрации нанообъектов в аморфных неорганических компонентах, / Александр Васильевич Ушаков// дисс.к.т.н., Тамбов-2017.-119 с.
7. Абдуллоев М.А., Гуломов, М.М., Сафаров М.М. Теплофизические, кинетические свойства и седиментационный анализ аморфной кремниевой кислоты и многостенных углеродных нанотрубок/Монография/, Душанбе, 2021г. - 147 с.

Сафаров П.М., Зоиров Х.А.

Таджикский технический университет имени акад. М.С. Осими, 734025, пр. акад. Раджабовых-10а, Душанбе, Таджикистан

ВЛИЯНИЕ НАНОПОРОШКА ДИМЕТИЛКЕТОНА (ЗАМЕНИТЕЛЯ ГИДРАЗИНА) НА ИЗМЕНЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ВОДЫ

В статье приводятся результаты экспериментального исследования теплопроводности при различных температурах, давлениях и концентрации нанопорошка диметилкетона. Результаты исследования показали, что добавка нанопорошка диметилкетона (заменитель гидразина) повышает теплопроводность

воды. Общая относительная погрешность измерения теплопроводности при доверительной вероятности 0,95 составляет 4,2%. На основе данных по теплопроводности исследуемых наножидкостей системы электролитов (диметилкетона+H₂O) получены аппроксимационные зависимости.

Для обработки большого объема воды, а также систем с небольшим возвратом конденсата применяют деаэрационные установки. Обеспечение надежной и экономичной работы паровых котлов возможно при отсутствии внутренних отложений на поверхностях нагрева и снижении до минимума уровня коррозии конструкционных материалов. Подобные задачи возможно решить путем организации рационального водного режима, который включает в себя необходимую водоподготовку питьевой воды и некоторые определенные конструктивные мероприятия по очистке питательной воды от газообразных и твердых примесей. Такие примеси могут находиться в растворённом или взвешенном состоянии. Питательная вода для паровых котлов готовится умягчением, обессоливанием, дегазацией и дозированием введенных реагентов. Подобные процедуры требуют проведения трудоемких и высококвалифицированных ручных измерений. При допущении ошибок в процессе измерений может возникнуть перерасход топлива, реагентов, воды, сбой в работе оборудования, сроки сокращения его эксплуатации. Снижение эксплуатационных затрат и защита дорогостоящей техники обеспечиваются внедрением автоматизированного комплекса, осуществлением анализа качества воды, управлением дозирующими устройствами, информированием обслуживающего персонала о появившихся неполадках [1].

Для паровых котлов с большим расходом питательной воды используется метод более дорогой, который заключается в обратном осмосе воды, основанном на применении полупроницаемых мембран. В зависимости от производительности установок обратного осмоса следует выполнить предварительное умягчение воды. В случае необходимости пропускают значительное количество воды через обратноосмотическую установку и осуществляют ввод реагента, который предотвращает зарастание мембран жесткими солями. После умягчения или обессоливания питательная вода для паровых котлов подлежит термической дегазации, которая уменьшает содержание кислорода и углекислого газа. Основа этой технологии заключается в снижении растворимости газов в жидкости с повышением температуры. Для снижения финансовых затрат для установок небольших мощностей используются системы частичной дегазации. Они действуют в довольно узком температурном диапазоне. При нагреве растворенные газы в виде пара покидают систему. В определенном диапазоне температур процесс полностью не проходит, в воде остается небольшая концентрация кислорода и углекислого газа. Поэтому требуется дополнительная химическая обработка. Для самых крупных установок и систем с небольшим возвратом конденсата используются деаэрационные установки вакуумного или атмосферного типа [1].

Для численных расчетов и составления физической модели деаэрационной установки необходимо знать теплофизические, термодинамические характеристики питательной воды, в том числе коэффициент эффективной теплопроводности при различных температурах и давлениях [2].

Для исследования теплопроводности питательной воды системы (нано-порошка диметилкетона + воды) в зависимости от температуры использована экспериментальная установка, основанная на методе нагретой нити [2].

С помощью этой установки можно измерять теплопроводность жидкостей и растворов с погрешностью 4,2%.

Результаты исследования теплопроводности воды при различных температурах и концентрации нанопорошка диметилкетона (заменителя гидразина) показали, что повышение температуры, массовой концентрации диметилкетона приводит к росту теплопроводности воды. На основе закона термодинамического подобия и экспериментальных данных по теплопроводности электролитов (вода+ нанопорошок диметилкетона) получен ряд аппроксимационных зависимостей [2].

Библиографический список

1. Манькина, Н.Н. Физико-химические процессы в пароводяном цикле электростанций. М., "Энергия", 1977.- 256с.

2. Гуломов, М.М. Влияние углеродных нанотрубок и нанопорошков кремниевой кислоты на изменение теплофизических, термодинамических и седиментационных свойств некоторых жидких углеводородов и их смесей/ Масрур Мирзохонович Гуломов//Дис.д-ра тех.наук., Душанбе, 2021г. в двух томах (том 1-273стр. и том 2-163стр.).

Сафарова Ф.А., Собиров Дж.Ф.

Таджикский государственный педагогический университет им. С. Айни,
г. Душанбе, Таджикистан

Бохтарский государственный университет им. Носири Хусрава,
г. Бохтар, Таджикистан

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ БЕНЗОЛА ПРИ РАЗЛИЧНОЙ МАССОВОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ЧЕТЫРЕХХЛОРИСТОГО УГЛЕРОДА

В данной статье приводятся результаты расчетно-экспериментального исследования теплопроводности бензола при различных температурах, давлениях и концентрации жидкого четыреххлористого углерода. Для измерения теплопроводности растворов электролитов использована экспериментальная установка, работающая по методу нагретой нити (установка Л.П. Филиппова) и теоретическая модель Максвелла, и профессора Г.Н. Дульнева. Общая относительная погрешность измерения теплопроводности при доверительной вероятности 0,95 составляет 4,2%.

В работе представлен обзор выполненных исследований по теплопроводности бензола, опубликованных до 1976 г. [1]. Затем учеными-теплофизиками было проведено экспериментальное измерение теплопроводности газообразного и жидкого бензола на линии насыщения, которое опубликовано в работах [2-4].

В работах [2-4] диапазон изменения параметров состояния был следующим: [2] $p=100\text{МПа}$, $T=(300-673)\text{К}$; [3] $p=0,1\text{МПа}$, $T=(298-348)\text{К}$; [4] $p=(1,6-332)\text{МПа}$, $T=(310-360)\text{К}$. В работе [5] на основе данных по теплопроводности бензола при различных температурах и атмосферном давлении получены аппроксимационные зависимости.

Для численных расчетов и составления физической и математической моделей и технологического процесса необходимо знать коэффициент эффективной теплопроводности растворов в зависимости от температуры и давления [6]. Жидкий четыреххлористый углерод (тетрахлорметан) [5] принадлежит к числу жидкостей с наименьшими значениями теплопроводности и с этой точки зрения удобен для градуировки приборов, особенно когда объектами исследования являются фреоны. С четыреххлористым углеродом (тетрахлорметаном) можно работать в диапазоне температур от 250 до 350 К без повышения давления [5]. Подобно толуолу четыреххлористый углерод (тетрахлорметан) обладает и другими достоинствами: он не токсичен, не агрессивен, может быть сравнительно легко очищен. Теплопроводность жидкого четыреххлористого углерода (тетрахлорметана) изучена достаточно хорошо [5]. Теплопроводность жидкого четыреххлористого углерода (тетрахлорметана) в зависимости от температуры и давления представлена в [6]. В данной работе также приведены эмпирические уравнения, которые получены автором.

Для исследования теплопроводности системы (жидкий четыреххлористый углерод + бензол) при различных температурах использована экспериментальная установка, основанная на методе нагретой проволоки [2] (установка Л.П. Филлипова).

С помощью этой установки можно измерять теплопроводность жидкостей и растворов с погрешностью 4,2%.

Результаты исследования теплопроводности смесей системы бензола и четыреххлористого углерода (тетрахлорметана) в зависимости от температуры показали, что повышение массовой концентрации (четырёххлористого углерода) приводит к уменьшению теплопроводности. На основе теории подобия и экспериментальных данных по теплопроводности исследуемых растворов получен ряд аппроксимационных зависимостей. Полученные аппроксимационные зависимости дают возможность рассчитать эффективную теплопроводность исследуемых растворов, в данном случае нет необходимости проводить опыты [7].

Библиографический список

1. Теплопроводность жидкостей и газов. / Н.Б.Варгафтик, Л.П.Филлипов, А. А. Тарзиманов, Е.Е.Тоцкий.М.: Издательство стандартов.1978. 723 с.
2. Габулов, Д.М. Теплопроводность органических соединений при высоких давлениях. Автореф. дис..... к.т.н., Грозный, 1978.-21с.
3. Kashiwagi, H., Oishi M., Tanaks Y., et. al. // Int. J. Thermophysics. - 1982, - vol.3.- №2.-p.101-116.
4. Li, S.F.Y., Maitland G.S., Wakeham W.A. // Int. J. Thermophysics.- 1984, - vol.5.- №4.-p.351-365.

5. Справочник по теплопроводности жидкостей и газов. / Н.Б.Варгафтик, Л.П. Филлипов, А.А. Тарзиманов, Е.Е.Тоцкий, Энергоатомиздат. М.; -1990.-352с.

6. Palavra, A.M.F., Wakeham W.A., Zalaf M. //Int. J. Termophysics. - 1985,-vol.4.- №5.—p.427-438.

7. Гуломов, М.М. Влияние углеродных нанотрубок и нанопорошков кремниевой кислоты на изменение теплофизических, термодинамических и седиментационных свойств некоторых жидких углеводородов и их смесей/ Масрур Мирзохонович Гуломов//Дис.....д-ра тех.наук., Душанбе, 2021г. в двух томах (том 1-273стр. и том 2-163стр.).

Тиллоева Т.Р., Гортышов Ю.Ф., Сафаров М.М.

Таджикский технический университет имени акад. М.С. Осими,
г. Душанбе, Таджикистан

Казанский авиационный институт «КНИТУ – КАИ» имени А.Н. Туполева,
г. Казань, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ТЕПЛООВОГО ПРОЦЕССА В СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЯХ В УСЛОВИЯХ РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН

В работе приводятся результаты теоретического исследования теплового расчета солнечной батареи. Для повышения коэффициента полезного действия солнечных батарей необходимо повышать теплофизические и термодинамические характеристики теплоносителей, в частности удельную изобарную теплоемкость теплоносителя. Известно, что в качестве теплоносителя в солнечных коллекторах используется вода. Для повышения удельной изобарной теплоемкости теплоносителя, в частности воды, в него внедряют такие наночастицы как сажа, ОСУНТ, МСУНТ, наносеребро и др. Для практического применения наноматериалов ведутся теоретические и экспериментальные исследования их физических и физико-химических свойств, которые, в свою очередь, определяются поведением коллоидных частиц, их взаимодействием во внешних полях.

Проблема использования солнечной энергии, которая являлась предметом изучения отдельных исследователей, сегодня привлекает пристальное внимание всей общественности (ученых, государственных деятелей и т.д.). Это объясняется конечным запасом ископаемого топлива и заставляет задуматься над получением энергии будущего [1-5]. Несмотря на все преимущества солнечной энергии она не получила широкого применения даже в странах с жарким климатом. Объясняется это периодической облученностью в различные периоды времени, с техническими трудностями при преобразовании. Основные проблемы применения солнечной энергии — это высокая стоимость конструкции при использовании, рассредоточенность и дискретность поступления по часам суток, времени

года и географическим поясам. Ключевой проблемой применения солнечной энергии является проблема аккумуляции [1,3,4].

Проблемы получения наноматериалов и применения их в различных областях современной науки и техники, биологии и медицины являются, безусловно, актуальными, а также весьма актуальными являются задачи исследования теплофизических свойств межчастичных взаимодействий, ориентационных эффектов, развивающихся в коллоидных водных растворах нано-серебра под действием давления и температуры [2,4,7].

Для исследования теплофизических и термодинамических характеристик исследуемых растворов как в чистом виде, так и содержащих различное количество наночастиц нами использованы экспериментальные и численные методы. Образцы в чистом виде и с внедрением наночастиц серебра, ОСУНТ и МСУНТ используются в качестве теплоносителей для солнечных коллекторов нового поколения [6,7].

Для измерения теплопроводности растворов нами использован метод нагретых проволок (прибор Л.П. Филипова), общей относительной погрешностью измерения 4,2% при доверительной вероятности 95% [6].

Прибор, разработанный профессором Сафаровым М.М. для измерения теплоемкости исследуемых растворов, основан на теории монотонного разогрева, с учетом специфики исследуемых растворов и их структуры. Погрешность измерения на данной установке при доверительной вероятности 95% составляет 3,2% [6].

С помощью установки, разработанной и созданной на основе метода гидростатического взвешивания (прибор проф. И.Ф. Голубева), исследована плотность растворов метилового спирта, коллоидных растворов воды с внедрением ОСУНТ и МСУНТ. Измерение проводилось в интервале температуры (293–453) К и давления (0,101-49,01) МПа. Общая относительная погрешность измерения на данной установке при доверительной вероятности 95% составляет 0,1%. Кроме того, для численных расчетов по плотности исследуемых растворов при различных температурах и давлениях с использованием уравнения типа Тейта рассчитана плотность этих растворов. Зная тепловые процессы в солнечных батареях, можно определить коэффициент полезного действия этих батарей [8,9,10,11,12].

Библиографический список

1. Бринкворт, Б.Дж. Солнечная энергия для человека: М.: Мир, 1976.-278с.
2. Берковский, Б.М., Кузьмин В.А. Возобновляемые источники энергии на службе человека. М.: Наука, 1987.- 125 с.
3. Богословский, В.Н. Энергия окружающей среды и строительное проектирование. М.: Стройиздат, 1983. -122 с.
4. Даф, Дж. А., Бекман У. А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии. М: Мир, 1971.- 420 с.
5. Кириллин, В.А. Энергетика. Главные проблемы. М.: Знание, 1990. -121с.
6. Тиллоева, Т.Р. Теплофизические и термодинамические свойства коллоидного водного раствора наносеребра. Дис. на соискание ученой степени к.т.н.

по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника, Душанбе, 2016,-164с.

7. Дмитриев, А.С. Введение в нанотеплофизику /А.С. Дмитриев. М.: Изд. БИНОМ. Лаборатория знаний. 2015.- 792 с.

8. Дмитриев, А.С., Клименко А.В. Преобразование солнечного излучения в пар – новые возможности на основе наноматериалов (обзор). Теплоэнергетика. 2020. № 2. -С. 1–16.

9. Сафаров, М.М. Модифицированное уравнение Тейта для расчета теплопроводности простых эфиров ИФЖ, Т.66, №6, 1994, Минск, - С.721-724

10. Сафаров, М.М. Уравнение состояния жидких простых эфиров на основе данных по теплоемкости ИФЖ, Т.68, №4, 1998, Минск, - С.321-329.

11. Сафаров, М.М., Тиллоева Т.Р., Зоиров Х.А., Зарипова М.А., Джураев Д. С. Температуропроводность коллоидного раствора наносеребра в зависимости от давления при комнатной температуре. Измерительная техника, 2012, №3-С.51-53

12. Дмитриев, А.С. Критерии эффективности преобразования солнечного излучения в пар в солнечной теплоэнергетике/ Материалы III международной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетики», 19–23 октября 2020, М., Изд.МЭИ.- С.91-92.

Федоренко Р.М., Антонов Д.В., Стрижак П.А.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Томск, 634050, пр. Ленина, 30

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ БАЛАНС ВТОРИЧНЫХ ФРАГМЕНТОВ ПРИ МИКРО-ВЗРЫВНОМ РАСПАДЕ НЕОДНОРОДНЫХ КАПЕЛЬ

Дробление неоднородных капель топлив в процессе нагрева является одним из наиболее перспективных направлений развития технологий вторичного распыления [1]. Быстрое испарение и кипение менее летучего компонента (воды) в исходной капле водотопливной эмульсии приводит к микро-взрыву с последующим образованием большого количества капель меньшего размера (вторичных фрагментов) [1]. Процессы взрывного дробления капель многокомпонентных топлив способствуют многократному увеличению площади поверхности испарения, что позитивно влияет на равномерность распыления топлива в камере сгорания, приводит к повышению полноты его выгорания, снижению инерционности зажигания, минимизации расхода топлива, улучшению смешиваемости топливно-воздушной смеси, а также снижению антропогенных выбросов.

Для более глубокого физического анализа данных процессов необходимо определить энергетический баланс вторичных фрагментов, образующихся в результате микро-взрывного распада. В результате микро-взрывного распада энергия, вызванная быстрым испарением воды в составе капли [2], преобразуется в энергию вторичных фрагментов: кинетическую и поверхностную. Настоящие результаты представлены в виде отношения поверхностной и кинетической энергий вторичных фрагментов, что аналогично обратному числу Вебера.

По результатам экспериментальных исследований установлено, что в случае микро-взрывного распада, при котором образуется наибольшее количество вторичных фрагментов, наблюдается максимальное отношение поверхностной и кинетической энергий. Это означает, что при наиболее эффективном распылении (образование максимального количества вторичных фрагментов) поверхностная энергия преобладает над кинетической, т.е. образуются более мелкие вторичные фрагменты с меньшими скоростями движения [3].

При исследовании влияния вязкости и поверхностного натяжения жидкости на количество вторичных фрагментов и отношения исследованных энергий, установлено, что чем выше поверхностное натяжение и вязкость, тем выше отношение поверхностной энергии к кинетической. За счет применения ПАВ, стабилизаторов, сольвентов и пластификаторов можно варьировать значения соотношения энергий вторичных фрагментов в широком диапазоне при разной концентрации воды и горючей жидкости. Этот вывод является очень важным, так как он обосновывает большие перспективы применения микро-взрывного распада неоднородных капель, как методики их вторичного измельчения, в технологиях с высокой долей воды в жидкостном потоке (например, термическая и огневая очистка жидкостей от примесей, теплообменные системы, пожаротушение, охлаждение за счет орошения зон вокруг нагретых объектов).

Библиографический список

1. Dmitry V. Antonov, Roman M. Fedorenko, Pavel A. Strizhak. Child droplets produced by micro-explosion and puffing of two-component droplets \ Applied Thermal Engineering, 2020. 114501.
2. Dominique Tarlet, Christophe Allouis, Jérôme Bellettre. The balance between surface and kinetic energies within an optimal micro-explosion \ International Journal of Thermal Sciences, 2016. С. 179-183.
3. Dmitrii V. Antonov, Geniy V. Kuznetsov, Pavel A. Strizhak, Roman M. Fedorenko. Micro-explosion of droplets containing liquids with different viscosity, interfacial and surface tension \ Chemical Engineering Research and Design, 2020. С. 129-147.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект 21-71-10008, <https://rscf.ru/project/21-71-10008/>).

СЕКЦИИ 4, 5. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ АНОМАЛЬНЫХ ПРИРОДНЫХ ЯВЛЕНИЙ; ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ЗАКРУЧЕННЫХ И ВИХРЕВЫХ ДВИЖЕНИЯХ

Исаев С.А., Никущенко Д.В.

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,
Санкт-Петербург, 190121, ул. Лоцманская, 3
Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации
имени Главного маршала авиации А.А. Новикова
Санкт-Петербург, 196210, ул. Пилотов, 38

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ СТРУКТУРИРОВАННЫЕ ПОВЕРХНОСТИ: ОТ СФЕРИЧЕСКИХ ЛУНОК К НАКЛОННЫМ КАНАВКАМ

Дрейцер Г.А. с коллективом из МАИ [1] открыл эффективные поверхности теплообмена в трубах и каналах, структурированные упорядоченными выступами (изготовленные, например, вальцовкой труб). Тепловая эффективность таких поверхностей на порядок выше, чем для гладких стенок. Однако гидравлические потери растут опережающим темпом. Поэтому этот способ интенсификации теплообмена приемлем при больших ресурсах полного давления.

Несколько десятилетий развивается альтернативный подход к вихревой интенсификации теплообмена, связанный с нанесением на стенки упорядоченных лунок, как правило, сферических. Умеренный рост гидравлических потерь сочетается с умеренным увеличением тепловой эффективности (порядка двух раз). Как установлено Кикнадзе Г.И., управляющий механизм интенсификации обуславливается самоорганизацией закрученных струйно-вихревых структур в сферических и конических лунках. Они установлены в многочисленных исследованиях (см., например, [2]). Важно отметить, что скорости вторичного и возвратного течения в лунках не высоки и внутри заторможенных зон возникают области угнетенного теплообмена.

Стремление интенсифицировать отрывное течение и теплообмен в лунках привело к созданию асимметричных закрученных потоков высокой интенсивности. Сферические формы преобразовались в эллиптические, а затем в овальные, в которых две половинки базовой сферической лунки соединялись цилиндрической траншеей. Ориентация (наклон) лунок к набегающему потоку и их длина, отнесенная к ширине, оказались важными параметрами, определяющими интенсификацию течения и теплообмена.

Открыто явление аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена (АИОТТ) в наклонных овально-траншейных лунках - канавках на стенках узких каналов и пластинах [3,4]. Ультравысокие скорости возвратного и вторичного, закрученного потоков в отрывных зонах канавок оказываются порядка и выше характерных скоростей, а абсолютные величины отрицательного трения и тепловых потоков на дне канавки в однорядном пакете многократно (до 6-8

раз) превосходят соответствующие характеристики в плоскопараллельных каналах. Управляющие механизмы АИОТТ обуславливаются экстраординарными перепадами давления в канавках между зонами торможения потока на наветренном склоне и разрежения в месте генерации торнадоподобного вихря. Эти перепады сопоставимы с перепадами давления между критическими точками при обтекании кругового цилиндра или шара.

Экспериментальное подтверждение экстраординарных перепадов давления в канавке на пластине и стенке канала, которые хорошо согласуются с расчетными прогнозами, получено в экспериментах НИИ механики МГУ [5]. Численно установленное ускорение потока в узком канале с однорядными наклонными канавками обнаружено экспериментально на стенде КазНЦ РАН [4]. А измеренное градиентными датчиками теплового потока двукратное усиление относительной теплоотдачи на дне канавки под углом наклона 45° на пластине по сравнению с гладкой пластиной при $Re=3 \times 10^4$ хорошо согласуется с численными результатами.

Численно установлено, что тепловая эффективность нагретой стенки узкого канала (с высотой 1 и шириной 7), структурированной однорядными канавками с шагом 6 при угле наклона 45° на стабилизированном участке ламинарного потока воздуха при $Re=10^3$, достигает 2 при удлинении канавки порядка 6 и глубине 0.35 (в отношении к ширине) при росте гидравлических потерь порядка 1.5.

Библиографический список

1. Kalinin E.K., Dreitser G.A., Kopp I.Z., Myakotchin A.S. Efficient surfaces for heat exchangers: fundamental and design. Begell house. 2002. 414p.
2. Isaev S.A., Kornev N.V., Leontiev A.I., Hassel E. Influence of the Reynolds number and the spherical dimple depth on the turbulent heat transfer and hydraulic loss in a narrow channel // Int. J. Heat Mass Transfer. 2010. Vol.53. Issues 1-3. P.178-197.
3. Исаев С.А. Генезис аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена в наклонных канавках на структурированных поверхностях // МЖГ. 2022. №5. С. 13-24.
4. Исаев С.А. Аэрогидродинамические механизмы интенсификации физико-энергетических процессов на структурированных энергоэффективных поверхностях с вихревыми генераторами// Теплофизика и аэромеханика. 2023. Т.30. №1. С.83–88.
5. Зубин М.А., Зубков А.Ф. Структура отрывного обтекания цилиндрической каверны на стенке плоского канала// МЖГ. 2022. №1. С. 81–89.

Работа выполнена при поддержке грантов РНФ 22-19-00056 (эксперимент) и 23-19-00083 (расчет)

Кузнецов П.Д., Рувинская Е.А., Куркина О.Е., Куркин А.А.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
Нижний Новгород, 603155, ул. Минина, 24

ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ВНУТРЕННИХ ВОЛН НА ОПОРЫ В ШЕЛЬФОВОЙ ЗОНЕ ОХОТСКОГО МОРЯ: НЕГИДРОСТАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ SUNTANS И IGW

Поле течений, индуцированное интенсивными внутренними волнами, может создавать существенные нагрузки в опорах морских гидротехнических сооружений, иногда превосходящие воздействие поверхностных штормовых волн, приводя к серьезным деформациям объектов морской инфраструктуры (подробный инженерный анализ натурных наблюдений таких эффектов представлен в [1-3]).

В настоящей работе для оценки силового воздействия внутренних волн, генерируемых при трансформации бароклинного прилива в Охотском море, используются предвычисленные поля скоростей, полученные при численном моделировании волновой динамики с использованием двух полнонелинейных моделей. Первая модель – IGW – позволяет численно интегрировать систему уравнений Эйлера в приближении Буссинеска с условием непротекания на дне и «твердой крышкой» на поверхности, а также приливным форсингом на границе [4]. Вторая используемая модель – SUNTANS – решает уравнения Навье-Стокса в приближении несжимаемости и приближении Буссинеска с помощью алгоритма LES [5]. Цель работы – сравнить влияние приближений, используемых как в исходных численных моделях гидродинамики, так и в модификациях формулы Морисона [6], которая в последнее время адаптирована и активно используется при прогнозировании воздействия внутренних волн, на получаемые оценки нагрузок от внутренних волн на цилиндрические опоры.

Вычислены суммарная поперечная сила и момент относительно дна для гипотетических опор, установленных на разном удалении от береговой линии вдоль выбранных вертикальных разрезов на шельфе о. Сахалин. Построены распределения нагрузок по единице длины каждой выбранной опоры в разные моменты времени (в наиболее интересные моменты приливного цикла). Показана существенная неравномерность, знакопеременность распределения нагрузок по вертикали, вызванная интенсивными внутренними волнами. На исследуемых участках максимальные значения суммарной поперечной силы достигали 0.2-0.3 МН.

Библиографический список

1. Osborne, A.R., Burch, T.L., Scarlet, R.I. The influence of internal waves on deep-water drilling. – J Petroleum Technol. 30/10; 1978, p. 1497–1504.
2. Du, T., Sun, L., Zhang, Y., Bao, X., Fang, X. An estimation of internal soliton forces on a pile in the ocean. – J. Ocean Univ. China 6/2; 2007, p. 101–116.

3. Song, Z.J., Teng, B., Gou, Y., Lu, L., Shi, Z.M., Xiao, Y., Qu, Y. Comparisons of internal solitary wave and surface wave actions on marine structures and their responses. – Appl. Ocean Res. 33; 2011, p. 120–129.

4. Lamb K. Numerical experiments of internal wave generation by strong tidal flow across a finite amplitude bank edge // Journal of Geophysical Research. 1994. V. 99. P. 843-864. DOI: 10.1029/93JC02514.

5. S. Vitousek and O. B. Fringer, 2014, "A nonhydrostatic, isopycnal-coordinate ocean model for internal waves", Ocean Model., 83, 118-144, doi:10.1016/j.oceanmod.2014.08.008

6. Xiaoxiao Zan, Zhenhua Lin, On the applicability of Morison equation to force estimation induced by internal solitary wave on circular cylinder, Ocean Engineering, Volume 198, 2020,106966

Представленные результаты получены в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема № FSWE-2023-0004 «Нелинейная волновая динамика прибрежной зоны в условиях меняющегося климата и антропогенного воздействия»).

Галаев С.А., Рис В.В.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

ТУРБУЛЕНТНОЕ ТЕЧЕНИЕ И ТЕПЛООТДАЧА НА НАЧАЛЬНОМ УЧАСТКЕ КАНАЛА ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ С ОДНОСТОРОННИМ ВНУТРЕННИМ ОРЕБРЕНИЕМ

Одним из способов повышения теплоотдачи в каналах охлаждения лопаток газовых турбин является нанесение на стенку макрошероховатостей, в частности, периодически расположенных ребер. Как показывают многочисленные исследования [1, 2] наибольшую интенсификацию обеспечивают ребра, расположенные относительно направления потока под углами от 45° до 60° . Длинные каналы прямоугольного сечения с оребрением одной из стенок широко используются в установках подогрева воздуха под действием солнечной радиации [3].

В работе представлены результаты расчетов турбулентного в среднем нестационарного течения и теплообмена воздуха ($Pr=0,7$) в протяженном канале с соотношением ширины к высоте $W/H=1,5:1$. На широкой стенке канала под углом 45° к продольной оси периодически (с шагом $P/H=1$) расположены ребра квадратного сечения, загромаждающие поперечное сечение на 10%. Расчеты с использованием пакета ANSYS CFX выполнены на основе осредненных по Рейнольдсу нестационарных уравнений Навье-Стокса, замкнутых $k-\omega$ SST моделью турбулентности (URANS подход). Расчетные сетки составлены из гексаэдров с числом узлов 1,0 млн на один шаг оребрения (сегмент).

На входе в канал задавался развитый для гладкого канала профиль скорости. При моделировании теплообмена на всех стенках ставились граничные условия первого рода. Рассмотрены режимы течения в диапазоне чисел Рейнольдса от $0,5 \cdot 10^5$ до $2,0 \cdot 10^5$.

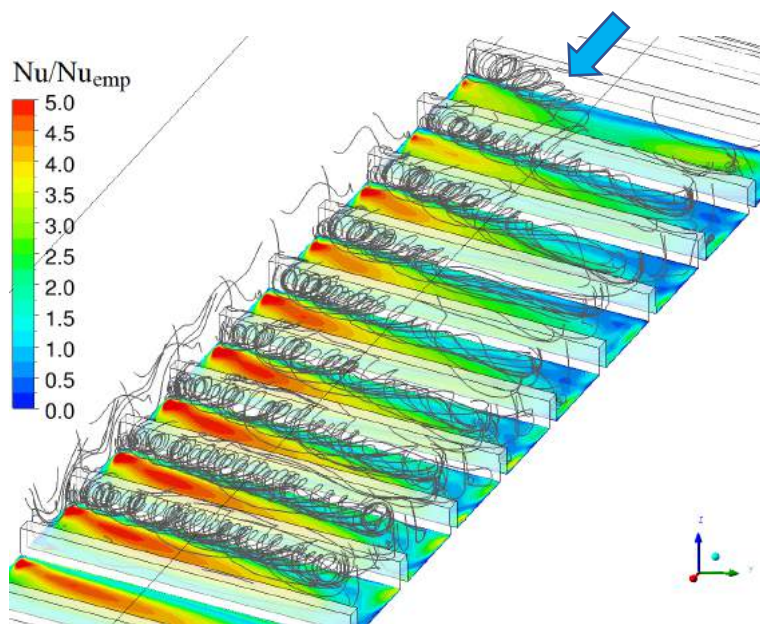


Рис. 1. Теплоотдача на оребренной стенке и линии тока пристенного течения, $Re=2 \cdot 10^5$

Рис. 1 для первых десяти сегментов иллюстрирует отношение осредненного во времени числа Нуссельта к эмпирическому значению для гладкого канала, вычисленному по формуле Б.С. Петухова, и развитие по мере движения вдоль канала сворачивающихся за каждым ребром локальных вихрей. При продвижении потока по каналу формируется сложное течение, являющееся результатом взаимодействия локальных вихрей и усиливающейся после каждого ребра глобальной окружной закрутки потока.

На рис. 2 представлено распределение интенсификации теплоотдачи в зависимости от номера сегмента. По оси ординат отложены значения осредненного по межреберному промежутку числа Нуссельта, отнесенного к эмпирическому значению для гладкого канала.

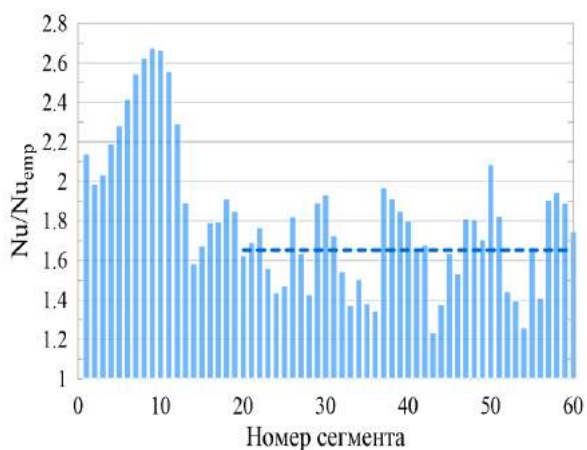


Рис. 2. Распределение интенсификации теплоотдачи вдоль оребренной стенки, $Re=2 \cdot 10^5$

Штриховой линией нанесено среднее для последних 40 сегментов значение.

Вследствие формирования сложной структуры течения теплоотдача оребренной стенки на первых десяти сегментах увеличивается, достигая максимума. После первых 15-20 сегментов наблюдаются сильные нерегулярные колебания теплоотдачи относительно постоянного значения $Nu/Nu_{emp}=1,65$.

Результаты работы получены с использованием вычислительных ресурсов суперкомпьютерного центра Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (www.spbstu.ru).

Библиографический список

1. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах, М., Машиностроение, 1972, 220 с.

2. Han J.-C., Dutta S., Ekkad S. Gas Turbine Heat Transfer and Cooling Technology. Publ. by CRC Press, 2013, 865 p.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 23-29-00094

Горелов Ю.Г.

ОКБ, производственный комплекс «Салют» АО «ОДК»,
Москва, 105118, пр. Буденного, 16

**ГИДРОДИНАМИКА, ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА
И ТРЕНИЯ В МОДЕРНИЗИРОВАННЫХ ВИХРЕВЫХ ТРАКТАХ,
КАНАЛАХ ОХЛАЖДЕНИЯ С КОМБИНАЦИЕЙ НАКЛОННЫХ РЕБЕР
И ОВАЛЬНО-ТРАНШЕЙНЫХ ЛУНОК**

В проведенном экспериментальном исследовании установлено, что интенсификация теплообмена в «вихревых» трактах с полуцилиндрическими выступами (ПЦВ) на ребрах более энергетически выгодна, чем интенсификация теплообмена с помощью «вихревых» трактов без ПЦВ, но несколько уступает по энергетической эффективности интенсификации теплообмена турбулизацией только пристенных слоев теплоносителя поперечными разнонаклонными полуребрами с углом наклона $\beta=45\dots60^\circ$ и малой относительной высотой (менее 2...6%).

Экспериментально подтверждено также, что секционные вихревые матрицы с перегородками и прерывистыми ребрами имеют широкие возможности по управлению расходом охлаждающего воздуха. Получены обобщающие зависимости по теплообмену и гидравлическим сопротивлениям в ОБТ с перегородками и прерывистыми ребрами в исследованном диапазоне геометрических и режимных факторов. В дальнейшем актуальным является исследование с расширенным диапазоном по углу наклона ребер β в ОБТ с перегородками и прерывистыми ребрами. тепловой поток (КТП) в 2-3 раза по сравнению с гладкой поверхностью.

Введение внедренных друг в друга ребер корытной и спинной оболочек позволяет перераспределить расход воздуха и интенсивность охлаждения между корытной и спинной оболочками. При верификации 3D расчетных исследований теплообмена и гидродинамики осредненных характеристик теплоотдачи в ANSYS CFX с результатами, полученными в экспериментальных условиях цинкового термостата показано их удовлетворительное совпадение. Анализ результатов экспериментальных исследований и 3D исследования в ANSYS CFX для ОБТ с несимметричным по отношению к продольной оси наклоном корытных и спинных ребер показал, что в ОБТ $30^\circ\times45^\circ$ большую поверхность матрицы занимают каналы с минимальными температурами и максимальными скоростями, изучение 3D гидродинамической структуры воздуха указывает на то, что из всех

исследованных несимметричных матриц наилучшим сочетанием температур и скоростей воздуха обладает ОБТ $30^\circ \times 45^\circ$.

3D исследованиями в ANSYS CFX установлено, что в сужающихся матрицах наиболее низкие потери давления от входа в канал корытной оболочки до выхода из канала спинной оболочки получены в ОБТ $45^\circ \times 45^\circ$ для угла клиновидности $\gamma = 17^\circ$, наибольшие потери давления при $\gamma = 0^\circ$. Выполненные 3D расчетные исследования клиновидных ОБТ показали, что в начальных поперечных сечениях с 1 по 4 максимальная интенсификация теплообмена $\bar{Nu} = 3,26 - 3,57$ получена для $Re_d = 11853$ при угле клиновидности $\gamma = 4,5^\circ \dots 17^\circ$, в следующем сечении 5 - $\bar{Nu} = 3,08$ для $Re_d = 11853$ при угле клиновидности $\gamma = 0^\circ$, и в последующих сечениях 6, 7 - $\bar{Nu} = 3,51 \dots 4,07$ для $Re_d = 80000$ при угле клиновидности $\gamma = 10^\circ \dots 17^\circ$.

Выполненные в [1] 3D расчетные исследования в ANSYS CFX показали, что максимальная теплопроизводительность (η) сдвоенных V-образных лунок с полусферическими выступами между ними (CVЛПВ) превышает η лунок и исследуемых полусферических выпуклостей. Однако для CVЛПВ получено максимальное отношение коэффициентов трения (f/f_0). В связи с этим проведено изучение теплопроизводительности комбинаций наклонных ребер и овално-траншейных лунок, индуцирующих структуры вторичных течений и позволяющие получить относительно высокую теплопроизводительность каналов. В представленной работе была проведена валидация моделей турбулентности, коэффициентов трения и теплопроизводительности для моделей с исходными наклонными ребрами [1] и овално-траншейными лунками [2]. Показано, что минимальные отличия от экспериментальных значений получены при использовании модели турбулентности S-A.

3D исследованиями установлено, что интенсификация теплоотдачи для CVЛПВ уступает интенсификации теплоотдачи для овално-траншейных лунок с ребрами под углом 45° к потоку практически только в ламинарной области течения до $Re = 1,5 \times 10^4$, при этом коэффициенты гидравлического трения овално-траншейных лунок с ребрами превышают коэффициенты трения сдвоенных V-образных лунок с полусферическими выступами между ними во всем исследованном диапазоне Re . Теплопроизводительность овално-траншейных лунок с ребрами превышает теплопроизводительность сдвоенных V-образных лунок с полусферическими выступами между ними только для $Re = 10^4$, в остальной области по числу Re теплопроизводительность CVЛПВ выше на (20-40)%. Аналогичные отличия получены для комбинации V-образных ребер и V-образных лунок.

Библиографический список

1. Wright, L.M. and Gohardani, A.S., 2008, "Effect of Turbulator Width and Spacing on the Thermal Performance of Angled Ribs in a Rectangular Channel (AR = 3:1)," ASME Paper No. IMECE2008-66842.

2. Ю.Г. Горелов, А.А. Назаров. 3D сравнительные исследования теплообмена и трения в каналах с модифицированными V-образными лунками и выпуклостями. Сборник докладов XXII школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках». 20-24 мая 2019. С. 61-65.

Здитовец А.Г., Киселёв Н.А., Виноградов Ю.А., Попович С.С.

НИИ механики МГУ,
Москва, 119192, Мичуринский проспект д.1

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ОБТЕКАНИЯ ПАРЫ КРУГОВЫХ ЦИЛИНДРОВ НА ЭФФЕКТ ЭНЕРГОРАЗДЕЛЕНИЯ: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Процесс перераспределения полной энтальпии (температуры торможения) в потоках сжимаемого газа без обмена энергией с окружающей средой принято называть энергоразделением. На его основе созданы устройства для безмашинного разделения потока на холодный и горячий (с температурой торможения меньше и больше начальной), например: трубы Ранка-Хилша, Гартмана-Шпренгера, Леонтьева. Повышение эффективности существующих устройств, проектирование новых, и умелое использование эффекта энергоразделения в обычном теплообменном оборудовании, напрямую связано с пониманием причин энергоразделения, а также способов воздействия на его величину. В связи с этим актуальным является изучение процесса энергоразделения, возникающего при обтекании тел канонической формы (круговых цилиндров), так называемый эффект Эккерта-Вайса [1], который заключается в возникновении области пониженной температуры на подветренной стороне поперечно обтекаемого цилиндра. Величина эффекта может достигать существенных значений. Например, в работе [2] получено, что при числе Маха набегающего потока 0.65 и температуре торможения 25°C температура поверхности кругового цилиндра снижалась на 28°C градусов в окрестности задней критической точки и была ниже статической температуры набегающего потока.

Проблема энергоразделения при поперечном обтекании изолированного цилиндра исследовалась во многих, в основном, экспериментальных работах. Предложенная в [2] связь эффекта Эккерта-Вайса с процессом схода вихрей была неявно подтверждена в работах Куросаки и Томанна. В работе Куросаки [3] было показано, что при возникновении резонанса между частотой стоячих акустических волн в аэродинамической трубе и частотой схода вихрей наблюдается существенное снижение донного давления и температуры поверхности в задней критической точке цилиндра, что косвенно свидетельствовало о связи эф-

фекта с интенсификацией вихрей. При внесении разделительной пластины в область формирования вихрей наблюдалось подавление их интенсивности, резкий рост давления и температуры поверхности в донной области (Томанн).

В работе [4] на основе прямого численного моделирования было показано, что эффект Эккерта-Вайса зависит от режима обтекания пары круговых цилиндров поперечным потоком и может быть как больше, так и меньше значений, достигаемых на одиночном цилиндре при идентичных параметрах набегающего потока.

В настоящем докладе приведены данные экспериментального исследования эффекта Эккерта-Вайса при поперечном обтекании пары одинаковых круговых цилиндров при числах Маха набегающего потока $M > 0.3$. Оси цилиндров расположены в плоскости, перпендикулярной направлению потока. Относительное расстояние между осями цилиндров изменялось в диапазоне, позволяющем охватить режимы интерференции, характерные для данного типа (side-by-side) расположения цилиндров: одиночная вихревая дорожка, бистабильный режим, спаренная вихревая дорожка.

В итоге по измерениям температуры и давления получены распределения коэффициента давления и коэффициента восстановления температуры (характеризующего энергоразделение) на поверхности цилиндра. Проведено сравнение результатов, полученных для одиночного цилиндра, с известными экспериментальными данными.

Библиографический список

1. E. Eckert, W. Weise, Messungen der Temperaturverteilung auf der Oberflache schnell angestromter unbeheizter Korper, Forsch. Geb. Ing. Wesen. 13 (1942) 246–254.
2. L.F. Ryan, Experiments on Aerodynamic Cooling, Swiss Federal Institute of Technology, 1951.
3. M. Kurosaka, J.B. Gertz, J.E. Graham, J.R. Goodman, P. Sundaram, W.C. Riner, H. Kuroda, H. W.L., Energy separation in vortex street, J. Fluid Mech. 178 (1987) 1–29.
4. A.I. Aleksyuk, The Eckert–Weise effect and energy separation under the flow interference behind side-by-side cylinders, J. Fluid Mech. 915 (2021) A95. <https://doi.org/10.1017/jfm.2021.128>.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00443, <https://rscf.ru/project/22-29-00443/>

Каримов К.Ф. , Тарасевич С.Э., Ермаков А.М.

Казанский Национальный Исследовательский Технический Университет
им. А. Н. Туполева - КАИ, г. Казань

ВЛИЯНИЕ ВХОДНЫХ И ВЫХОДНЫХ УСЛОВИЙ НА СТРУКТУРУ ПОТОКА ПРИ РАДИАЛЬНОМ ВХОДЕ В КАНАЛ СО СКРУЧЕННОЙ ЛЕНТОЙ

Конструктивные особенности различных теплообменников и устройств предполагают разные условия входа теплоносителя, в том числе радиальный. Такой подвод теплоносителя существенно влияет на теплогидравлические характеристики потока, а в конечном итоге на работу устройства, поэтому важным является установление закономерностей их поведения.

На данный момент малоисследованными остаются вопросы влияния входных и выходных условий на теплообмен и гидродинамику в каналах с закруткой. В данной работе рассмотрены результаты численного моделирования движения однофазной жидкости с изменением направления потока и его закруткой. Отработка методики численного моделирования потока в колене на базе коммерческого пакета Ansys Fluent 20.0 позволяет разработать рекомендации по расчету гидросопротивления и теплоотдачи колен со вставками в виде скрученных лент, необходимых для создания эффективных теплообменных аппаратов.

Для вычислений использовалась двухпараметрическая RNG k-ε модель турбулентности. Версия модели k-ε–RNG получена на основе теоретического анализа уравнений Навье-Стокса (Renormalization Group (RNG) Method). Опыт применения данной модели показал улучшенное (по сравнению со стандартной версией k-ε модели) согласование расчётных и экспериментальных данных, для некоторых типов течений, в частности, большой кривизне линий тока и в областях больших деформаций поля скорости, более подробная информация которых указана в [4-6]. Результаты вычислений, проведённые с данной моделью, при расчёте в случае гладкой трубы дали хорошее согласование с известными работами [1-3, 7].

В работе представлены результаты численного исследования гидравлических характеристик потока жидкости при течении в канале с установленной скрученной лентой и различными условиями входа. Выполнены расчеты при радиальном входе в канал со скрученной лентой с относительным шагом 2,5; 3; 4, при числе $Re=10000-50000$. Вход потока в канал радиальный под углом в 90^0 с острой кромкой, диаметр условного прохода канала 10 мм, с входным участком длиной 100 мм и выходным участком длиной 600 мм.

В канале с закруткой потока и радиальным входом установленная лента существенно меняет картину течения. Значительно уменьшается протяженность вихревых зон. Сокращается длина участка стабилизации. Результаты численного исследования позволили получить поля скоростей и давлений, рассчитать коэффициент гидравлического сопротивления, коэффициент теплоотдачи. Данная методика позволяет рассчитать гидравлические характеристики в поворотных

устройствах технических систем при проектировании с целью наиболее эффективной организации процесса.

Библиографический список

1. Повх И. Л. Аэродинамический эксперимент в машиностроении. Л.: Машиностроение, 1974. 480 с.
3. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение. 1992. 672 с.
4. Гиргидов А. Д. Механика жидкости и газа (гидравлика): Учебник для вузов. 3-е изд., испр. и доп. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 545 с.
5. Снегирёв А. Ю. Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. — 143 с.
6. Белов И. А, Исаев С. А. Моделирование турбулентных течений: Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2001. 108 с.
7. Морозов И.И., Ляскин А.С. Теоретические основы вычислительной газовой динамики: учеб. пособие. Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2010. – 64 с.
8. Каримов К. Ф., Дегтярёв Л. В., Тарасевич С.Э. Численное исследование течения однофазной среды в поворотах при наличии входного и выходного участков // Тепловые процессы в технике. 2022. Т. 14. № 7. С. 318–324. DOI: 10.34759/tpt-2022-14-7-318-324

Исследование выполнено за счёт гранта Российского Национального Фонда № 22-19-00373

Панкратов Е.В.

Северный (Арктический) федеральный университет
им. М.В. Ломоносова,
163002, Архангельск, набережная Северной Двины, 17

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ВТОРИЧНЫХ ВИХРЕЙ В ЗАКРУЧЕННОМ ПОТОКЕ С НЕПОДВИЖНЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ

В большинстве работ, посвященных исследованию вторичных течений по типу вихрей Тейлора, которые образуются в кольцевых каналах, изучаются различные случаи вращающихся цилиндрических поверхностей [5]. В том числе достаточно изучена устойчивость осевого течения в кольцевом пространстве с вращающимся внутренним цилиндром [1, 3, 4]. Кроме того, рядом авторов широко рассмотрено влияние осевого потока на интенсификацию теплообмена в кольцевых каналах с вращающимися поверхностями [2]. Данная работа показывает, что возникновение тороидальных вторичных вихрей с противоположным враще-

нием, подобных вихрям Тейлора, может происходить с неподвижными поверхностями кольцевого канала при начальной закрутке потока в аксиально-лопаточном завихрителе.

Исследуемый кольцевой канал образован внутренней поверхностью с диаметром $d_1 = 130$ мм внешней с диаметром $d_2 = 172$ мм. Закрутка потока осуществляется лопаточным завихрителем с 24 поворотными лопастями. Длина канала L равна 1000 мм. Численное моделирование осуществлялось в трехмерной постановке с использованием программного комплекса ANSYS Fluent 15.0 с моделью турбулентности Shear Stress Transport $k-\omega$ и поправкой на кривизну линий тока. Верификация результатов численного моделирования аэродинамики и теплоотдачи осуществлялась на опытных данных, полученных на физической модели прямого кольцевого канала с аналогичными геометрическими размерами.

Для случая, когда движение жидкости в кольцевом канале создается только вращением потока жидкости при неподвижных поверхностях кольцевого канала число Тейлора можно записать в следующем виде:

$$Ta = \frac{\overline{w_\phi}^2 \cdot (D_r/2)^3}{v^2 \cdot R_1} = \frac{\overline{w_z}^2 \cdot \tan^2(\phi) \cdot (D_r/2)^3}{v^2 \cdot R_1} \quad (1),$$

где $\overline{w_\phi}, \overline{w_z}$ – среднее значение тангенциальной и осевой составляющей скорости соответственно, м/с.

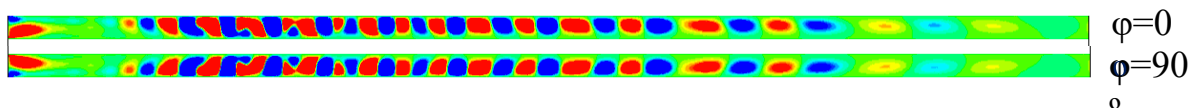


Рис. 1. Распределение радиальной составляющей скорости при $Re_{вх}=1629$, $Ta_{вх}=2 \cdot 10^5$, $\alpha=75^\circ$

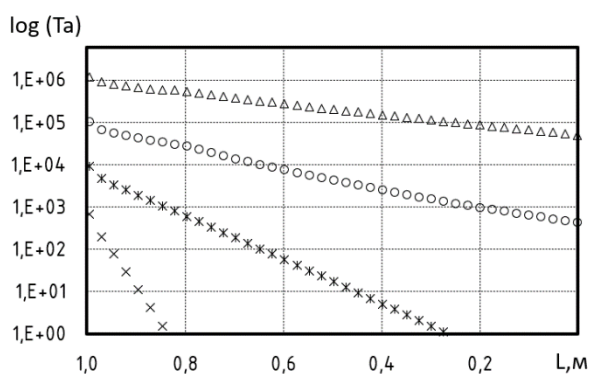


Рис. 2. Распределение числа Тейлора по длине кольцевого канала

На рис.1 представлено продольное распределение радиальной составляющей скорости по длине кольцевого канала. На рис. 2 представлено распределение числа Тейлора по длине кольцевого канала при различных начальных условиях. Исходя из сказанного можно отметить, что образование вторичных вихрей на типу вихрей Тейлора в закрученном потоке с неподвижными поверхностями возможно и может быть использовано для дальнейшего изучения влияния на процесс интенсификации теплообмена.

Библиографический список

1. Andereck, C.D. Flow regimes in a circular Couette system with independently rotating cylinders / C.D. Andereck, S.S. Liu, H.L. Swinney // *Journal of Fluid Mechanics*. – Cambridge University Press, 1986. – Vol. 164 – P. 155–183 – doi:10.1017/S0022112086002513.
2. Fénot, M. A review of heat transfer between concentric rotating cylinders with or without axial flow / M. Fénot, Y. Bertin, E. Dorignac, G. Lalizel // *International Journal of Thermal Sciences - INT J THERM SCI*. – 2011. – Т. 50 – С. 1138–1155 – doi:10.1016/j.ijthermalsci.2011.02.013.
3. Kaye, J. Modes of adiabatic and diabatic fluid flow in an annulus with an inner rotating cylinder / J. Kaye, E.C. Elgar // *Transactions of the ASME*. – 1958. – С. 753–765.
4. Lueptow, R.M. Stability of axial flow in an annulus with a rotating inner cylinder / R.M. Lueptow, A. Docter, K. Min // *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*. – 1992. – Vol. 4 – № 11 – P. 2446–2455 – doi:10.1063/1.858485.
5. Wimmer, M. Taylor vortices at different geometries [Электронный ресурс] / M. Wimmer // *Physics of Rotating Fluids: Lecture Notes in Physics* / под ред. С. Egbers, G. Pfister. – Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2000. – Т. 549 – С. 194–212 – doi:10.1007/3-540-45549-3_12.

Пахомов М.А., Терехов В.И.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 1

ЭЙЛЕРОВО И ЛАГРАНЖЕВО ОПИСАНИЯ ТУРБУЛЕНТНОГО ГАЗОКАПЕЛЬНОГО ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА ЗА ВНЕЗАПНЫМ РАСШИРЕНИЕМ ТРУБЫ

Закрутка двухфазного потока является эффективным методом управления структурой потока и интенсификацией теплопереноса [1–3], в том числе после внезапного расширения трубы. Наличие рециркуляционного течения, вызванного внезапным расширением, оказывает заметное влияние на интенсивность процессов переноса и распространение дисперсной фазы и в значительной мере определяет структуру отрывного двухфазного течения. Целью данной работы было выполнение численного моделирования влияния закрутки потока на распределение дисперсной фазы, структуру течения и интенсификацию теплопереноса в газокапельном течении за внезапным расширением трубы.

Рассмотрена задача о динамике двухфазного закрученного турбулентного газокапельного потока при наличии теплообмена со стенками канала. Газовая фаза описывается системой 3D RANS уравнений с учетом обратного влияния частиц на процессы переноса в газе. Турбулентность газовой фазы рассчитывается по модели переноса рейнольдсовых напряжений [4] с учетом влияния дисперсной фазы на турбулентные характеристики. Объемная концентрация дисперсной

фазы мала ($\Phi_1 < 2 \times 10^{-4}$ и капли достаточно мелкие ($d_1 < 100$ мкм), поэтому можно пренебречь эффектами их столкновений друг с другом. Для описания двухфазного потока используются: эйлеров континуальный (так называемые двухжидкостные модели) и лагранжев (траекторный) подходы [2]. Оба эти метода имеют свои плюсы и минусы, и они дополняют друг друга.

Изменение диаметра капель на входе приводит к значительным различиям в распределении объемной концентрации капель вдоль оси закрученного двухфазного потока. Для мелких частиц ($d_1 = 10\text{--}30$ мкм) наблюдается увеличение концентрации дисперсной фазы в начальных сечениях на оси трубы из-за ее накопления в зоне рециркуляции под действием обратного течения. Неравномерность профиля турбулентной кинетической энергии газовой и дисперсной фаз по радиусу трубы приводит к турбулентной миграции капель (сила турбофореза) к оси трубы. Это также вызывает наличие максимальной объемной доли твердых частиц на оси трубы в случае мелких частиц. Для наиболее инерционных капель ($d_1 = 100$ мкм) характерным является быстрое рассеяние по сечению трубы под действием центробежных сил, турбулентной диффузии и турбулентной миграции. Эти выводы качественно согласуются с данными известных измерений [5] и LES моделирования [1] для изотермических закрученных потоков твердых частиц за внезапным расширением трубы. Этот эффект становится более выраженным с увеличением начального диаметра капель. Можно отметить, что эйлерово и лагранжево описания дают качественно и количественно близкие результаты как для небольших размеров капель (до $d_1 = 10$ мкм), так и для самых крупных исследованных в данной работе частиц $d_1 = 100$ мкм (отличие в результатах расчетов не превышает 15%). Для капель $d_1 = 30$ мкм отличие в профиле концентрации достигает 20%.

Тогда как в газочапельном потоке за внезапным расширением трубы при отсутствии закрутки наблюдается быстрая дисперсия капель по сечению трубы. В закрученном потоке происходит значительное сокращение длины отрывной области (почти в 2 раза в сравнении с незакрученным течением). Закрутка двухфазного потока с испаряющимися каплями жидкости приводит к увеличению уровня турбулентности, для всех трех типов исследованных жидкостей. Показано, что добавление капель приводит к существенному росту теплообмена (более 1.75 раз) в сравнении с однофазным закрученным течением.

Библиографический список

1. M. Sanjose, J.M. Senoner, Jaegle F., B. Cuenot, S. Moreau, T. Poinsot Fuel injection model for Euler–Euler and Euler–Lagrange large-eddy simulations of an evaporating spray inside an aeronautical combustor // *Int. J. Multiphase Flow*. 2011. V. 37. P. 514–529.
2. Пахомов М.А., Терехов В.И. Распределение концентрации частиц в газочапельном ограниченном закрученном потоке. Эйлеров и лагранжев подходы // *ТВТ*. 2020. Т. 58, № 6. С. 896–900.
3. Pakhomov M.A., Terekhov V.I. The effect of droplets thermophysical properties on turbulent heat transfer in a swirling separated mist flow // *Int. J. Thermal Sci.* 2020. V. 149. Paper 106180.

4. A. Fadai-Ghotbi, R. Manceau, J. Boree. Revisiting URANS computations of the backward-facing step flow using second moment closures. Influence of the numerics // Flow, Turbulence Combust. 2008. V. 81. P. 395–410.

5. Sommerfeld M., Qiu H.-H. Detailed measurements in a swirling particulate two-phase flow by a phase-doppler anemometer // Int. J. Heat Fluid Flow. 1991. V. 12. P. 20–28.

Печенегов Ю.Я., Косов В.А., Косов М.А.

Саратовский государственный технический университет
им. Гагарина Ю.А.

Саратов, 410054, ул. Политехническая, 77

СРАВНЕНИЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛООБМЕНА ПОТОКА В ТРУБЕ БЕЗ И ПРИ НАЛИЧИИ ВСТАВЛЕННОЙ СКРУЧЕННОЙ ЛЕНТЫ

Наличие вторичных течений и смещение максимальной скорости от центра к периферии в закрученных потоках являются причиной их повышенной интенсивности теплообмена по отношению к прямым течениям без закручивания. При этом увеличиваются и затраты мощности на прокачивание закрученных потоков теплоносителей по каналам теплообменных устройств, что связано с наличием названных причинных явлений, а в случае закручивания потоков с помощью вставляемых в трубы в диаметральной их плоскости скрученных лент появляются еще и дополнительные затраты энергии потока на преодоление сил трения на поверхностях лент. Представляет интерес сравнить теплогидравлическую эффективность теплообмена прямого потока теплоносителя в пустой трубе и потока, закрученного с помощью вставленной в трубу скрученной ленты. В настоящей работе такое сравнение проведено для условий равного передаваемого теплового потока при течении теплоносителя с одинаковыми скоростями в трубе без и при наличии вставленной скрученной ленты.

При проведении анализа в качестве параметра для сравнения использовали энергетический коэффициент М.В. Кирпичева

$$E = Q/N, \quad (1)$$

где Q – передаваемый тепловой поток; N – мощность, затраченная на прокачку теплоносителя через канал.

Расчеты N проводили с использованием полученного в работе [1] обобщенного уравнения для коэффициента гидравлического сопротивления ξ потока теплоносителя, закрученного с помощью вставленной в трубу скрученной ленты. Соответствующие величины Q определяли с использованием уравнения для числа Нуссельта [2]

$$Nu = Nu_o(\xi/\xi_o)^{0.64}, \quad (2)$$

справедливого для области ламинарного течения с макровихрями (при числах Рейнольдса до $Re = Re_{cr} \approx (8...10) \cdot 10^4$). Здесь индекс «о» показывает, что параметры для потока в пустой трубе без ленты (определялись с использованием данных [3]). При выполнении расчетов в качестве теплоносителя принимался воздух при средней температуре $t_{cp} = 50$ °С в трубе, диаметр которой был принят $d = 0,02$ м. Разность температур Δt между стенкой трубы и потоком теплоносителя и перепад температур потока на входе t' и выходе t'' трубы $\delta t = |t' - t''|$ принимались постоянными и равными $\Delta t = \delta t = 50$ °С.

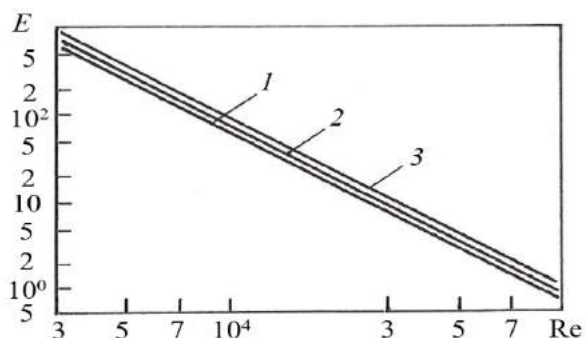


Рис. 1. Зависимость E от Re :

- 1 – $s/d = 10$;
- 2 – $s/d = 30$;
- 3 – труба без ленты

максимальном s/d снижение величины E по отношению к варианту пустой трубы без ленты составляет 17,6 %, для $s/d = 10$ снижение составляет 30 %, для $s/d = \infty$ (прямая лента) равно 23,5 %. Положительный эффект состоит в уменьшении площади F поверхности теплообмена трубы с лентой за счет повышения интенсивности теплообмена закрученного потока по отношению к площади F_o пустой трубы, который для названных выше вариантов составляет соответственно 28,6 %, 48 % и 37,5 %.

Полученные результаты важны для выбора и технико-экономического обоснования наилучшего варианта трубчатых поверхностей нагрева теплообменных устройств.

Библиографический список

1. Ю.Я. Печенегов. Гидравлическое сопротивление потоков в трубах с вставленными прямой и скрученной лентами // ХНГМ, № 8, 2020. С. 7-10.
2. Ю.Я. Печенегов. Снижение температуры теплопередающей стенки путем интенсификации теплообмена при нагревании вязких жидкостей // ХНГМ, № 11, 2017. С. 3-5.
3. М.А. Михеев, И.М. Михеева. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1973. 320 с.

ПОВЫШЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ КОРОТКИХ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ ПУТЕМ ЗАКРУЧИВАНИЯ ПАРОВОГО ПОТОКА

Увеличение коэффициента теплопередачи коротких линейных тепловых труб (ТТ) – это сложная научная и технологическая задача, несколько вариантов решения которой были предложены ранее [1-2].

Закручивание парового потока в выполненном в виде сопла Лавалья паровом канале коротких ТТ, при больших температурных напорах на испаритель, приводит к интенсификации конденсации пара на плоской поверхности верхней крышки ТТ, и увеличению коэффициента теплопередачи $K_{ТТ}$.

Закручивание струйного потока пара над плоским испарителем создается наклонными инжекторными каналами диаметром 1 мм, с углом наклона φ в диапазоне $0^\circ < \varphi < 60^\circ$. Инжекторные каналы выполнены на диаметре критического сечения сопла парового канала ТТ, пронизывают всю толщину испарителя 3.5 мм, и их продольные оси наклонены под углом φ° к продольной оси ТТ в тангенциальном направлении. Проведенное численное моделирование с помощью программы ANSYS коэффициента гидравлического сопротивления ξ_φ выполненного в виде закрытого сопла Лавалья парового канала, при течении в нем закрученного струйного потока влажного пара $\gamma_{др} = 0.2$, показало близость значений $(\xi_\varphi - \xi_0) / \xi_0 \leq 2\%$ в диапазоне скоростей $1 \text{ м/с} < w \leq 100 \text{ м/с}$ и в интервале углов закрутки $0^\circ < \varphi < 30^\circ$. При $\varphi > 30^\circ$ начинается резкий рост сопротивления ξ_φ .

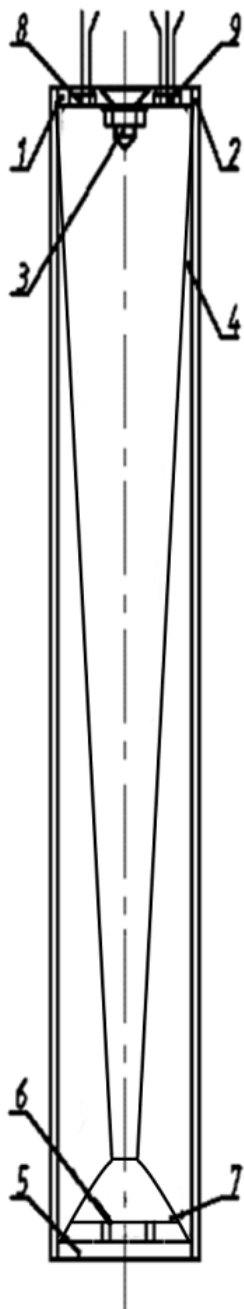


Рис. 1. Схема ТТ:

1 – верхняя крышка; 2 – цилиндрический корпус; 3 – запорный узел; 4 – многослойная сетчатая вставка с большим количеством рабочей жидкости – диэтилового эфира $C_4H_{10}O$ в порах; 5 – нижняя крышка; 6 – инжекторные капиллярные каналы диаметром 1 мм, наклоненные к продольной оси под углом $\varphi = 0 - 60^\circ$; 7 – многослойный плоский сетчатый испаритель. Внутри верхней крышки установлены емкостные датчики 8–9 для измерения толщины, температуры и частоты вращательных пульсаций пленки конденсата диэтилового эфира. Длина ТТ 100 мм, диаметр 20 мм

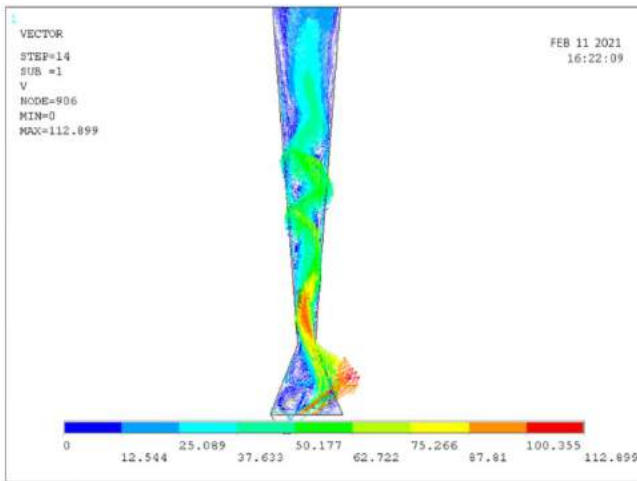


Рис. 2. Схема движения закрученных струй сжимаемого парового потока диэтилового эфира $C_4H_{10}O$ в выполненном в виде сопла Лавалья паровом канале ТТ при наклоне инжекторных каналов в испарителе $\varphi=30^\circ$ и при температурном напоре на испаритель $\delta T = T - T_B = 20K$, полученная с помощью программы ANSYS

Был создан набор тождественных ТТ с одинаковой массой заправки диэтиловым эфиром, с испарителями, оснащенными инжекторными каналами с различным углом наклона φ° , и проведены сопоставления их коэффициентов теплопередачи K_{TT} . На рисунке 3 показаны результаты сопоставления.

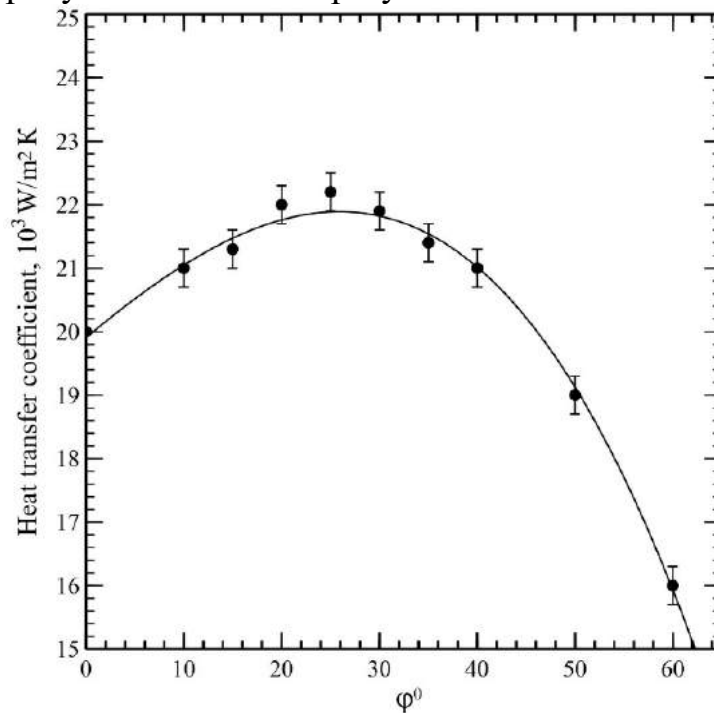


Рис. 3. Зависимость опытных значений коэффициентов теплопередачи K_{TT} коротких ТТ с различными углами наклона инжекторных каналов 1мм в плоском испарителе $\varphi=0-60^\circ$, при температурном напоре на испаритель $\delta T = T - T_B = 20K$

Все ТТ идентичны по габаритным размерам и с отклонением масс заправки диэтиловым эфиром $\delta M/M < 0.1\%$. Максимум K_{TT} определен нами при угле закрутки потока пара $\varphi = 26^\circ \pm 2^\circ$.

Библиографический список

1. Seryakov A.V. Computer modeling of the vapour vortex orientation changes in the short low-temperature heat pipes // International Journal of Heat and Mass Transfer 2019, v.140, pp.243-259.

2. Seryakov A.V. Resonant vibration heat transfer coefficient increase of short low-temperature heat pipes //International Journal of Heat and Mass Transfer 2020. v. 158. pp. 1-22.

Филиппов М.В., Чохар И.А., Терехов В.В., Терехов В.И.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия,
Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 1

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА В ЗАКРУЧЕННЫХ КОЛЬЦЕВЫХ ИМПАКТНЫХ СТРУЯХ С ОБРАТНЫМ ЦЕНТРАЛЬНЫМ ВДУВОМ

Становящиеся объектом исследования кольцевые сопла с использованием закрутки выходящего потока довольно эффективно решают проблемы неоднородности теплоотдачи. При этом возникает сложность при построении связи между характеристиками выходящего потока и динамикой течения, и, более того, теплопередачей кольцевых импактных струй. В частности, в ряде режимов наблюдаются явления асимметрии течения. В некоторых работах [1-3] показано, что в кольцевой закрученной струе создаются спиралевидные рециркуляционные зоны, притом направление спирали противоположно направлению закрутки. Более того, эта структура наблюдается как в турбулентном, так и в ламинарном режимах. Также стоит отметить, что закрученные кольцевые струи несмотря на высокие характеристики теплоотдачи имеют свои недостатки: более низкие значения характеристик теплопередачи в области точки торможения, а также довольно резкое ухудшение их с увеличением расстояния до импактной поверхности. Для решения этих проблем в работа была исследована аэродинамика и теплообмен кольцевой закрученной импактной струи с добавлением центрального отсоса и угловых насадок.

Для измерения аэродинамики использовался измерительный комплекс PIV, который включает в себя источник излучения, в качестве которого используется импульсный лазер Beamtech Vlite-200 с длительностью импульса 6-8нс и максимальной энергией излучения 200 мДж, синхронизатор, для регистрации изображений применяются 2 цифровых камеры ImperX GEV-B2020M-TF000 с матрицей 2048x2048 пикселей, изображения записываются на жёсткий диск компьютера. Для получения поля скоростей изображения разбиваются на расчетные области $dx \cdot dy$ и каждая область рассчитывается отдельно. Для обработки изображений и нахождения скорости в расчетной области используется кросскорреляционный метод. Для более точного нахождения перемещения применяется подпиксельная интерполяция для каждого вектора скорости, фильтрация векторов по отношению сигнал/шум и медианным фильтром и интерполяции векторного поля.

Для тепловых измерений использовался тепловизор testo с разрешением 1280x800 пикселей. Обработка данных происходила с помощью собственных программ, написанных на C++ и Python.

Экспериментальный участок представлял собой кольцевую закрученную струю, бьющую в поверхность. Ширина щели $b = 3$ мм, внешний диаметр кольцевой струи $D = 48$ мм. Степень закрутки $S = 0.67$. В дополнении к этому центральная часть, диаметром 40 мм была способна удалять воздух. На края кольцевой закрученной струи также ставились насадки (скругления на 0-180 градусов).

Были проведены 3d измерения методом PIV на осевом срезе струи. Измерялись на осевом разрезе струи 3 компоненты скорости и пульсаций, также были посчитаны осредненные λ и Q критерии.

В результате было получено, что при варьировании высоты струи можно получать различные режимы течения кольцевой импактной закрученной струи. Угол насадки влияет на размер центрального вытяжного потока. Угол насадки 45 градусов оказывается наиболее перспективным. Центральный отсос позволяет увеличить локальные и интегральные параметры теплоотдачи, а также сделать их более равномерными.

Библиографический список

1. Yang, H. Q., Kim, T., Lu, T. J., & Ichimiya, K. (2010). Flow structure, wall pressure and heat transfer characteristics of impinging annular jet with/without steady swirling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(19-20), 4092–4100.
2. Vanierschot, M., & Ogus, G. (2019). Experimental investigation of the precessing vortex core in annular swirling jet flows in the transitional regime. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 106, 148–158.
3. García-Villalba, M., Fröhlich, J., & Rodi, W. (2006). Identification and analysis of coherent structures in the near field of a turbulent unconfined annular swirling jet using large eddy simulation. *Physics of Fluids*, 18(5), 055103. doi:10.1063/1.2202648

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2021-575)



swirlflow.ntu.ru

ISBN: 978-5-50201-732-9

