

На правах рукописи

УДК 532.5, 534.6

Поздеева Ирина Геннадьевна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ И МЕХАНИЗМОВ
ГЕНЕРАЦИИ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В СЛОЖНЫХ
ВИХРЕВЫХ ТЕЧЕНИЯХ**

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Научный
руководитель

Митрофанова Ольга Викторовна

доктор технических наук

профессор федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Официальные
оппоненты

Мильман Олег Ошеревич

доктор технических наук, профессор

президент закрытого акционерного общества «Научно-производственное внедренческое предприятие «Турбокон»

Синкевич Олег Арсеньевич

доктор физико-математических наук, профессор

профессор кафедры Инженерной теплофизики (ИТФ) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Ведущая организация

Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского»

Защита состоится 02 октября 2019 года в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.141.08 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, Лефортовская наб., д. 1, ф-т «Энергомашиностроение», ауд. 202 «Э».

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д.5, стр.1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.08.

Автореферат разослан «___» _____ 2019 г.

Учёный секретарь диссертационного
совета Д 212.141.08
кандидат технических наук, доцент



Егоров К.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Исследование влияния эффектов вихреобразования на генерацию акустических колебаний в звуковом и инфразвуковом диапазонах имеет большое значение для разработки нового, более совершенного поколения различных двигательных и энергетических аппаратов, включая ядерные энергетические установки (ЯЭУ). Особую актуальность тема диссертационной работы приобретает в плане развития ядерной транспортной энергетики, неразрывно связанной со стоящими перед нашей страной проблемами освоения Арктики, и, в частности, для научно-технического обоснования оптимальных конструкторских решений, позволяющих повысить эксплуатационный ресурс ледокольных ядерных энергетических установок нового поколения.

Исследования, предпринятые в настоящей диссертационной работе, направлены на выявление механизмов возбуждения акустических колебаний, обусловленных влиянием гидродинамических процессов, и разработку метода диагностики вихревой структуры потоков теплоносителей и рабочих сред на основе детектирования амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) акустических колебаний. В качестве объекта исследований было выбрано импактное закрученное течение, которое имеет место в коллекторных системах ядерных реакторов, теплообменных аппаратах, турбонасосных системах и других элементах теплогидравлических трактов энергетических и двигательных установок.

Целью диссертационной работы является выявление механизмов переноса массы, импульса и энергии, обуславливающих взаимосвязь вихревой структуризации высокоскоростных течений с генерацией акустических колебаний, и разработка метода акустических резонансов для предотвращения опасных эксплуатационных режимов работы энергетических установок, а также совершенствования их конструкционных и рабочих параметров.

Задачи, решенные в ходе достижения поставленной цели:

1. Разработана общая методология экспериментальных исследований и методики определения полей давления, скоростей, температуры, регистрации амплитудно-частотных характеристик акустических сигналов и визуализации вихревой структуры течения.
2. Создана экспериментальная установка с целью изучения механизма генерации акустических колебаний в сложных закрученных течениях.
3. Предложена методика измерений, основанная на совместном использовании акустического метода с методами визуализации вихревой структуры потока, что дает возможность сопоставления амплитудно-частотных характеристик акустических колебаний с параметрами, определяющими вихревую структуризацию течения.
4. Выявлены топологические особенности закрученных импактных течений и исследовано влияние геометрических и режимных параметров гидромеханической системы на генерацию звуковых колебаний.

5. Проведены экспериментальные исследования для различных режимов истечения импактных закрученных струй: дозвукового, звукового дорезонансного и резонансного.
6. Экспериментально исследован режим критического истечения закрученного потока. Предложены подходы к физико-математическому моделированию явления вихревой структуризации в кризисном режиме течения закрученного потока.
7. Исследован эффект саморегулирования акустических колебаний в открытой гидромеханической системе.
8. Разработан и получил экспериментальное обоснование диагностический метод акустических резонансов, практическое применение которого продемонстрировано на примере определения критических условий истечения закрученного импактного потока.

На защиту выносятся:

1. Результаты исследований по выявлению соответствия между регистрируемыми амплитудно-частотными характеристиками акустических колебаний и детерминированной структурой потоков, обусловленной генерацией устойчивых вихреобразований или фазовыми переходами (кавитацией и конденсацией).
2. Экспериментальные данные, подтверждающие эффект вихревой структуризации течения при ограничении расхода в режиме критического истечения закрученного потока, сопровождаемом образованием устойчивых спирально-вихревых структур.
3. Условия появления резонансного эффекта, обусловленного механизмом возникновения звуковых колебаний в импактных закрученных течениях.
4. Результаты исследований эффекта саморегулирования, который заключается в резком возрастании амплитуды колебаний на собственных частотах гидромеханической системы при резонансе с акустическими колебаниями, генерируемыми вихревой структурой потока.
5. Результаты исследований трех режимов истечения импактного закрученного потока: дозвукового, звукового докритического и резонансного.
6. Условия перехода к резонансному режиму течения, которые дают возможность заранее диагностировать нарушение виброустойчивого состояния гидромеханической системы.
7. Результаты исследований, по выявлению критерия, характеризующего связь скорости диссипации механической энергии системы с коэффициентом затухания акустических колебаний в среде.
8. Разработка и обоснование нового акустического диагностического метода – метода акустических резонансов, позволяющего осуществлять контроль состояния потоков теплоносителя и рабочих сред в режиме реального времени для предотвращения развития вибрационных и резонансных эффектов.

Научная новизна

Результаты исследований по определению взаимосвязи акустических колебаний с вихревой структурой потока показали возможность детектирования крупномасштабных вихреобразований по амплитудно-частотным характеристикам звуковых колебаний, возникающих в текущих средах.

Сопоставление АЧХ и картин визуализации с результатами расчетно-теоретического моделирования позволило выявить топологические особенности импактного закрученного течения и установить связь между генерацией звуковых колебаний и геометрическими и режимными параметрами гидромеханической системы.

Для диагностики состояния потоков теплоносителей и рабочих сред предложен акустический метод, с помощью которого может быть выявлена степень неоднородности текущей среды, обусловленная генерацией устойчивых вихреобразований и наличием фазовых переходов в жидкости.

Проведены систематические измерения полей давления и АЧХ акустических колебаний, генерируемых импактными закрученными течениями. Подтвержден устойчивый эффект генерации резонансных звуковых колебаний при истечении импактных закрученных струй. Получены количественные данные по амплитудно-частотным характеристикам акустических резонансов в зависимости от расхода воздуха в потоке и геометрии области течения.

Выявлен эффект критического истечения, сопровождающийся появлением низкочастотных составляющих спектра акустических колебаний. Проведены экспериментальные исследования, подтверждающие эффект ограничения расхода при критическом истечении закрученного потока.

Обнаружен эффект резонансного саморегулирования. В результате проведенных исследований установлено, что эффект саморегулирования заключается в резонансном усилении колебаний на собственных частотах гидромеханической системы за счет поглощения составляющих спектра акустических колебаний, генерируемых вихревой структурой потока при достижении предельной расходной скорости закрученного течения.

Предложена физическая модель, объясняющая механизм перераспределения энергии в открытой системе при резонансе. Показано, что необходимым условием поддержания устойчивости вихревой структуры потока в открытой гидромеханической системе при достижении критического расхода является приток вещества из внешней среды.

Достоверность результатов, представленных в диссертации, обеспечивается согласованностью экспериментальных и расчетных данных, многократной воспроизводимостью выявленных физических эффектов, а также соответствием с результатами, полученными другими авторами.

Практическая ценность заключается в обосновании применения нового акустического метода онлайн диагностики, необходимого для своевременного предотвращения возникновения внештатных и аварийных ситуаций, связанных с влиянием сложной гидродинамики потоков теплоносителей первого и второго контуров на несанкционированные отказы работы оборудования судовых ЯЭУ.

Предлагаемый метод акустических резонансов не только предоставляет широкие возможности для осуществления контроля в целях поддержания работоспособности действующих ЯЭУ, но и может служить для решения задач повышения эффективности и безопасности их работы, а также для создания нового поколения ядерно-энергетических установок, работающих в автономном режиме и отличающихся безусловной безопасностью.

Работы в данной области были выполнены при поддержке Программы по развитию системы ведущих научных школ: НШ-7938.2010.8, Госконтракта 02.740.11.0221, грантов РФФИ 10-08-00294-а, 13-08-00020-а, 16-08-00687-а, 19-08-00223-а, Госконтрактов № П181 и №14.740.11.0157 ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России».

Личный вклад автора. Соискателем был выполнен анализ научных источников по теме исследования, разработаны методики регистрации амплитудно-частотных характеристик акустических сигналов, проведены эксперименты по исследованию влияния геометрических и режимных параметров на резонансные эффекты в гидромеханической системе, произведена обработка результатов измерений и разработана физическая модель, объясняющая механизм перераспределения энергии в открытой системе при резонансе. Личный вклад соискателя также состоял в участии в подготовке публикаций.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: Научных сессиях НИЯУ МИФИ (2010-2015, Москва), 5, 6 и 7-ой Российских национальных конференциях по теплообмену (2010, 2014, 2018, Москва), XIII Российской конференции по теплофизическим свойствам веществ (с международным участием) (2012 Новосибирск), XVIII-XXI Школах-семинарах молодых ученых и специалистов под руководством академика А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в новых энергетических технологиях» (2011 Звенигород, 2013 Орехово-Зуево, 2015 Звенигород, 2017 Санкт-Петербург), IV, V Международных конференциях «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках» (2015 Казань, 2017 Новосибирск), Научно-технических конференциях «Теплофизические экспериментальные и расчетно-теоретические исследования в обоснование характеристик и безопасности ядерных реакторов на быстрых нейтронах (Теплофизика-2011-2015, 2018, Обнинск)», XX, XXI Международных конференциях «Нелинейные задачи теории гидродинамической устойчивости и турбулентность» («Не-За-Те-Ги-Ус» - 2012, 2014, Звенигород), VIII, X Школах-семинарах молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова (2012, 2016, Казань), XV Минском международном форуме по тепло- и массообмену (2016, Минск), III Всероссийской научной конференции «Теплофизика и физическая гидродинамика» с элементами школы молодых ученых (2018, Ялта).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 28 работ в научных журналах и сборниках трудов Международных и Российских конференций, включая 5 статей, входящих в базы данных Web of Science и Scopus, 4 статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Она изложена на 117 страницах, содержит 50 рисунков, 6 таблиц и список использованной литературы из 91 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы ее цель и решаемые задачи, охарактеризованы научная новизна и практическая значимость диссертации, перечислены результаты, выносимые на защиту.

В первой главе рассматривается современное состояние исследований в области изучения условий генерации крупномасштабных вихреобразований в энергетических установках. Рассмотрены особенности акустических течений, а также незакрученного и закрученного импульсных течений. Описаны результаты предварительных исследований, направленных на изучение природы так называемого вихревого звука – явления генерации акустических колебаний в жидких и газообразных средах, обусловленного эффектами вихреобразования.

Во второй главе представлены результаты исследований, подтверждающие связь генерации акустических колебаний с вихревой структурой потока. Для исследования трансформации поля завихренности в потоке жидкости с переменной закруткой и изучения механизма генерации устойчивых крупномасштабных вихреобразований была разработана экспериментальная установка на базе гидродинамического стенда. Конструкция установки позволяла сочетать использование акустических и оптических методов измерения при различных расходах теплоносителя.

Целью физических экспериментов являлось изучение механизма генерации крупномасштабных вихревых структур в области течения при искусственном изменении уровня завихренности потока.

С помощью разработанного приборного комплекса для регистрации акустических сигналов и методов визуализации локальных вихреобразований были проведены эксперименты по выявлению собственных частот гидромеханической системы, исследованию изменения поля локальной завихренности в канале переменного сечения и по исследованию вихревой структуры винтового течения.

На Рис. 1 представлена визуализация течения в круглой трубе постоянного проходного сечения с завихрителем в виде шнека на начальном участке при расходе рабочего тела $G = 7,4 \div 8,04 \text{ м}^3/\text{ч}$. В этом случае в области после шнека наблюдалось формирование четкой вихревой структуры, воспроизводившей геометрию закручивающего устройства. Визуализация вихревой структуры становилась возможной из-за выделения воздуха, первоначально нагнетаемого на входе в рабочий участок, за счет перепада давления в центральной области спирального вихря.

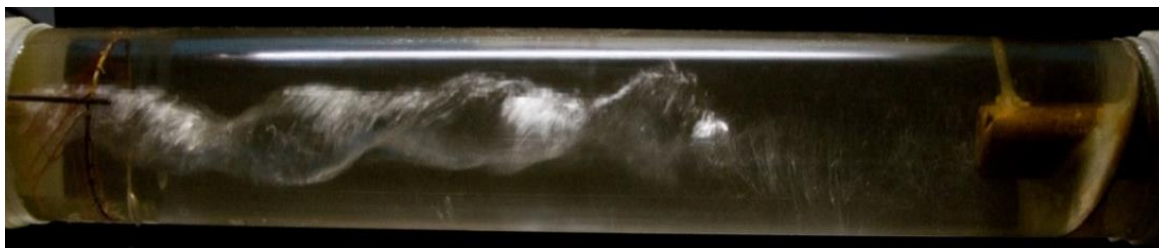


Рис. 1. Визуализация течения водо-воздушного потока при закрутке потока на входе с помощью шнека и расходе $G = 7,4 \div 8,04 \text{ м}^3/\text{ч}$

В процессе экспериментальных измерений было выявлено существенное влияние гидродинамики закрученного потока на перераспределение энергии в спектре акустических колебаний. Было замечено, что при организации

закрученного течения в канале, генерируемые за счет крупномасштабного вихреобразования низкочастотные колебания при определенном расходе подавляли основные частоты колебаний гидродинамического контура (Рис. 2 режим 1), усиливаясь за счет высокочастотных колебаний контура. На Рис. 2 (режим 2) видно, что при закрутке потока генерируемые крупномасштабным вихрем (Рис. 1) низкочастотные колебания на частоте 8 Гц имеют максимальную амплитуду, значительно превосходящую амплитуды собственных колебаний контура, включая колебания на характерной частоте в 300 Гц, обусловленной работой насоса.

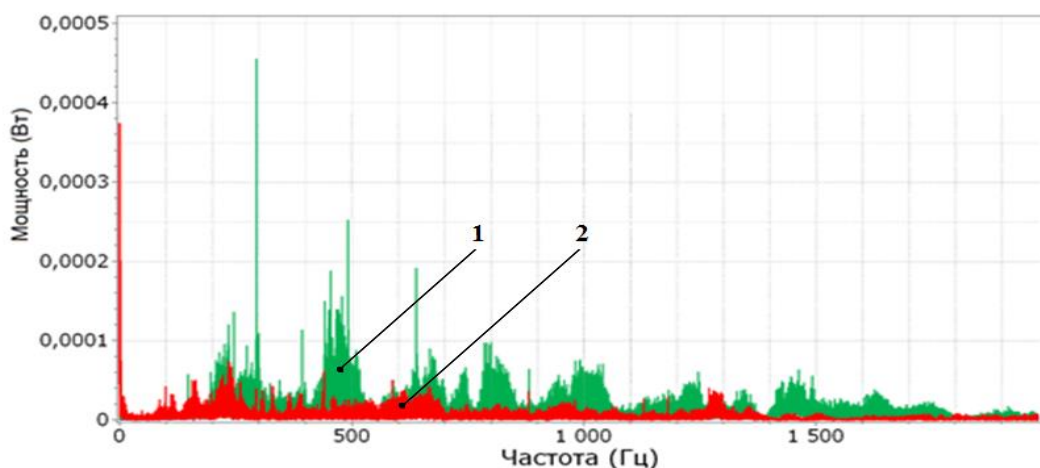
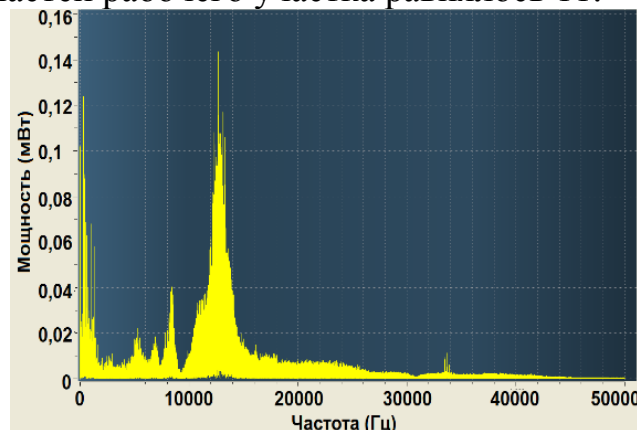


Рис. 2. Распределение мощности акустических колебаний по частоте: режим 1 – АЧХ, соответствующая спектру собственных колебаний гидродинамического стенда при нулевом расходе жидкости через рабочий участок; режим 2 – АЧХ при расходе $G=7,8 \text{ м}^3/\text{ч}$

Иллюстрация изменения структуры потока и поля локальной завихренности в канале переменного сечения представлена на Рис. 3. Отличие геометрии рабочего участка в этом случае заключалось в наличии перепускного участка с малым проходным сечением в центральной части канала на расстоянии 5 калибров от размещенного на входе в рабочий участок закручивающего устройства в виде шнека. Соотношение диаметров широкого и узкого сечений канала составляло 9,4, а отношение длин широкой и узкой частей рабочего участка равнялось 11.



а)



б)

Рис. 3. Регистрация кавитационного режима в канале переменного сечения: а) – картина течения; б) – АЧХ на выходе из узкой части канала

В ходе экспериментов при максимально достижимом расходе рабочего тела был зафиксирован режим течения с наличием оптической неоднородности на выходе из узкой части канала (Рис. 3, а). Расчетные оценки показали, что при заданном расходе достигалась пороговая скорость истечения струи, соответствующая развитию кавитационного режима в зоне резкого увеличения проходного сечения канала. Амплитудно-частотная характеристика, представленная на Рис. 3, б, демонстрирует, что в этом случае был зафиксирован спектр высокочастотных акустических колебаний в диапазоне от 10 до 20 кГц, с ярко выраженным пиком на частоте 13,8 кГц.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований по выявлению условий генерации акустических колебаний в импактных закрученных течениях. Экспериментальная установка была выполнена на базе газодинамического стенда (Рис. 4), обеспечивавшего суммарный объем запаса воздуха в ресивере до 700 л и сжатие до 10 атм.

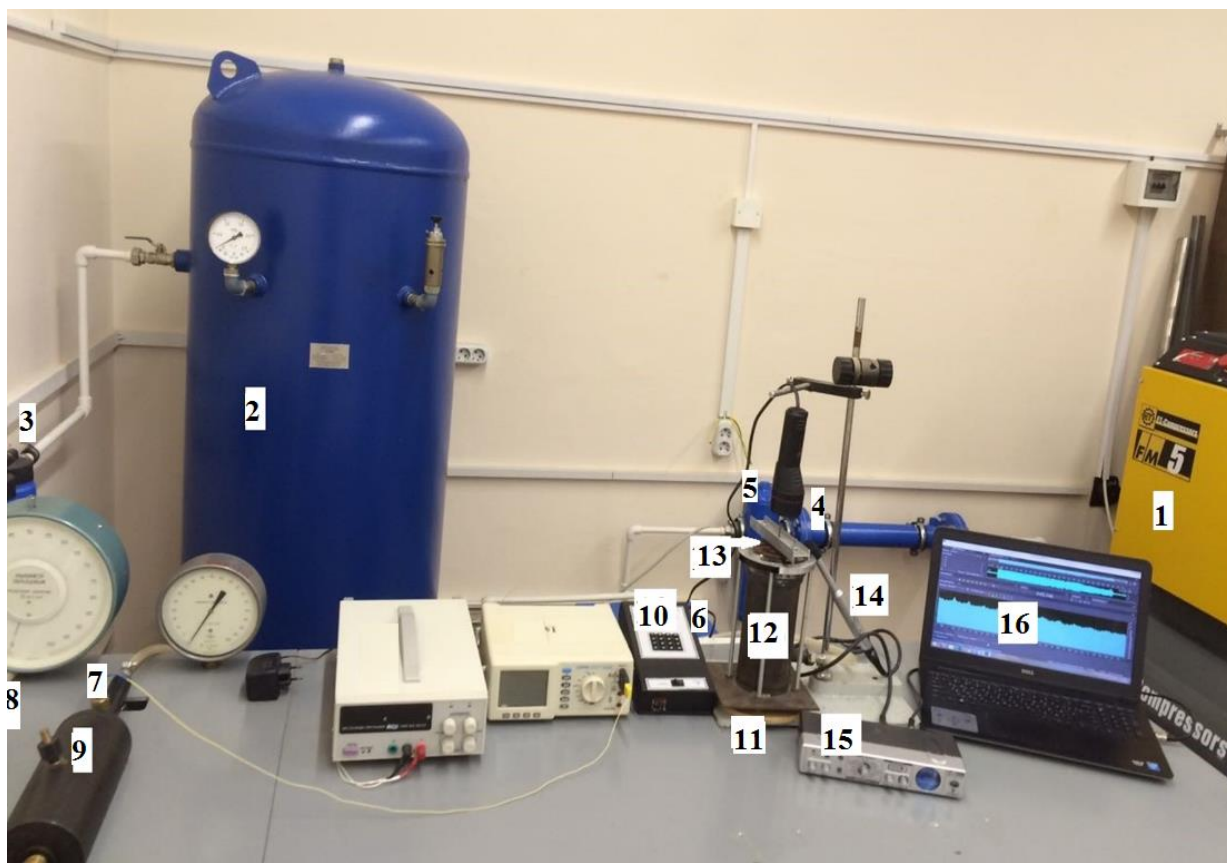


Рис. 4. Общий вид экспериментальной установки: 1– компрессор; 2 – баллон; 3 - система вентилей; 4 - фильтр предварительной очистки; 5,9 - успокоители потока; 6 - фильтр тонкой очистки; 7 – расходомер; 8 – разветвитель; 10 - цифровой стробоскоп; 11 - демпфирующая опора; 12 - вихревая камера; 13 – преграда; 14 – измерительный микрофон; 15 - микрофонный предусилитель; 16 – компьютер

Рабочий участок был выполнен в виде вихревой камеры, представлявшей собой полый цилиндр с внутренним диаметром 100 мм и высотой 180 мм. Днище вихревой камеры было сплошным, а верхняя торцевая поверхность камеры, имевшая в центре выходное отверстие диаметром d_0 , являлась сменной, что

позволяло варьировать размер и форму кромок выходного отверстия. Воздух подавался в нижнюю часть камеры по тангенциальному подводу. Для создания радиально-расходящейся импактной струи над выходным отверстием камеры устанавливалась преграда в виде круглого плоского диска. Размеры и материалы, из которых выполнены преграда и торцевая поверхность вихревой камеры, также могли варьироваться. Звуковые сигналы, соответствовавшие возникновению акустических резонансов на фоне «белого» шума, фиксировались при помощи измерительного микрофона и записывались в режиме реального времени на компьютере. Диапазон чисел Рейнольдса Re , определяемых по расходной скорости потока в области выходного отверстия вихревой камеры, составлял $Re = 1,7 \cdot 10^4 \div 2,3 \cdot 10^4$.

Для исследования механизма генерации акустических колебаний, связанного с образованием устойчивой вихревой структуры потока, были проведены эксперименты по определению амплитудно-частотных характеристик колебаний, регистрируемых при истечении из вихревой камеры импактного закрученного потока воздуха. Появление поля стоячей звуковой волны, характеризующегося выделением резонансной частоты с четко выраженными обертонами на кратных частотах (Рис. 5), было зафиксировано при ширине зазора h , равной или превышающей 4 мм для диаметра выходного отверстия вихревой камеры d_0 равного 8 мм. При этом максимальная интенсивность звуковой волны регистрировалась именно при ширине щелевого зазора h , равной половине диаметра выходного отверстия ($h = d_0/2$), а с увеличением h интенсивность звуковой волны постепенно ослабевала. Значения $1 \text{ мм} \leq h < 4 \text{ мм}$ соответствовали режиму акустического белого шума.

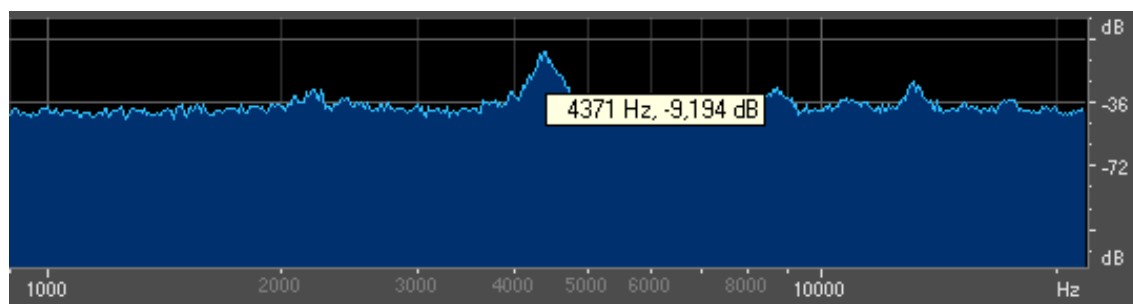


Рис. 5. АЧХ с резонансным пиком на частоте 4371 Гц и кратными ей обертонами

В результате систематических измерений полей давления на поверхности преграды при её фиксации для различных значений ширины зазора h был выявлен эффект, характерный для импактной закрученной струи. Как показывает Рис. 6, для всех экспериментов наблюдалось падение давления над отверстием, что могло свидетельствовать о наличии крупномасштабного вихря в центральной зоне преграды. Результаты визуализации подтвердили это предположение. На периферии отверстия при $r \geq d_0/2$ имело место резкое падение избыточного давления до нуля, дальнейшее падение давления уже в отрицательную область и выравнивание с внешним атмосферным давлением на выходе из-под преграды. Зона отрицательной области избыточного давления расширялась при увеличении ширины зазора h между поверхностью преграды и вихревой камерой.

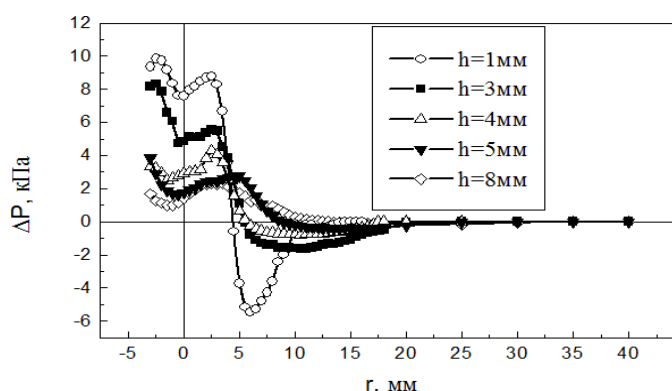


Рис. 6. Кривые распределения давления на поверхности преграды при различных значениях ширины зазора h для $d_0 = 8$ мм

максимальное разрежение на расстоянии от центра $r \approx 10 \div 12$ мм (при $d_0 = 8$ мм).

Таким образом, было выдвинуто предположение, что явление звукового резонанса возникало при обеспечении режима течения, соответствовавшего устойчивой топологической картине сосуществования тороидального и спирального крупномасштабных вихрей.

Данное предположение было проверено следующим образом. Был поставлен эксперимент: в центре преграды располагался вытеснитель конической формы, который исключал возможность образования центрального тороидального вихря. При проведении опытов обеспечивались идентичные условия с

ранее проведенными испытаниями, результаты которых отражены на рис. 5 (т.е. обеспечивался такой же расход воздуха $G = 0,0048$ м³/с, степень закрутки потока и геометрия области истечения при $h = 4$ мм и $d_0 = 8$ мм). Как и ожидалось, резонансный эффект, сопровождавшийся появлением звуковой волны, обнаружен не был, что подтвердила отвечающая этому случаю АЧХ, зафиксировавшая только режим белого шума без резонансных пиков.

Для оценки характерных параметров скоростного поля закрученного импактного потока и объяснения наблюдаемого явления звукового резонанса было получено приближенное аналитическое решение, основанное на использовании физической модели акустического течения, описанного в работе Л. Д. Ландау и Е.М. Лифшица (Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика: Т. VI. Гидродинамика. М.: Наука, 1986).

Была принята расчетная схема, представленная на Рис. 8, а. Область течения разбивалась на две основных зоны: А и В. В зоне А, расположенной над выходным отверстием вихревой камеры, струя ударяла в преграду и отклонялась в радиальном направлении. В зоне В (области радиального растекания струи) выделялись два пограничных слоя (1) и (3) вблизи каждой из поверхностей и область невязкого течения (2) между ними.

Полученные картины визуализации вихревого следа показали, что в кольцевом зазоре при $h \geq d_0/2$ образовывались крупномасштабные вихревые структуры (Рис. 7): над отверстием в центре преграды возникал устойчивый тороидальный вихрь, максимальный радиус которого не превышал $d_0/2$, а в области поворота потока за отверстием формировался крупномасштабный спиральный вихрь, обуславливающий

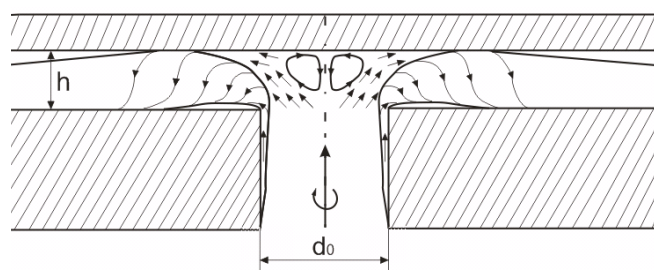


Рис. 7. Гидродинамическая схема течения импактного закрученного потока

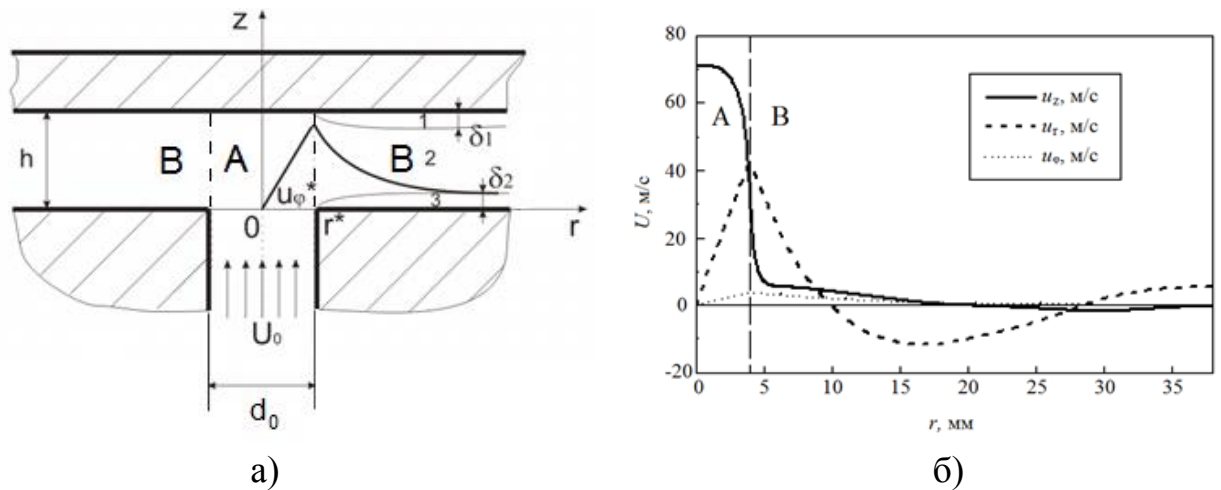


Рис. 8. Использование модели акустического течения: а) – расчетная схема для постановки задачи; б) – результаты аналитического решения: распределения u_ϕ , u_r и u_z компонент скорости в импактном закрученном течении при $h = 4$ мм и $d_0 = 8$ мм в зоне невязкого течения на расстоянии $z = 2$ мм от преграды

Возможность использования данной модели обусловлена тем, что свойства акустического течения проявляются в условиях, когда характерные размеры области движения h малы по сравнению с длиной звуковой волны λ , но в то же время велики по сравнению с глубиной проникновения вязких волн δ : $\delta \ll h \ll \lambda$. Глубина проникновения вязких волн δ зависит от кинематической вязкости ν и частоты колебательного процесса ω , связанного с возмущением жидкости, $\delta \cong \sqrt{2\nu/\omega}$ и характеризует узкий акустический пограничный слой, в котором происходит падение скорости от ее значения в звуковой волне до нуля на твердой поверхности.

В области вязкого течения задача решалась в приближении акустического пограничного слоя, с учетом того, что $\delta_{1,2} \ll r$. Это дало возможность пренебречь эффектами кривизны и рассматривать стационарное несжимаемое осесимметричное течение. Постановка задачи включала в себя решение уравнения неразрывности и уравнений Навье-Стокса, упрощенных согласно сделанным приближениям модели акустического пограничного слоя в пристенных слоях (1) и (3) зоны В и использование уравнений Эйлера в зонах квазитвердого вращения в области А и квазипотенциального движения в области В (2).

В качестве условий однозначности использовались граничные условия, соответствующие условиям прилипания и постоянства расхода. Полученные аналитические решения для всех трех компонент скорости в каждой из выделенных областей удовлетворяют физическим условиям сшивки и уравнению неразрывности. Ввиду громоздкости, формулы, соответствующие постановке и решению задачи, в автореферате не приводятся.

Характерные распределения полей скоростей для зоны невязкого течения, полученные в результате расчетов, показаны на Рис. 8, б. Представленная графическая иллюстрация показывает, что в области целевого зазора В при радиальном растекании импактной закрученной струи вертикальная компонента

скорости u_z на 2-3 порядка меньше величины радиальной u_r и тангенциальной u_ϕ компонент скорости.

Сравнение с данными, полученными экспериментально, показало, что, несмотря на сделанные упрощения в постановке задачи, полученные решения для поля скорости во всей области течения довольно точно отражают физическую картину течения, а также указывают на образование в щелевом зазоре крупномасштабной устойчивой трехмерной вихревой структуры в форме спирального вихря. С помощью полученных аналитических зависимостей удалось оценить неравномерность распределения скорости по ширине кольцевого зазора и получить количественную оценку величины вихреобразующей скорости в зоне формирования тороидального центрального вихря, показанного на Рис. 7, на границе областей А и В.

Результаты систематических измерений частоты акустических колебаний, соответствующей появлению резонансного эффекта при различных расходах воздуха и изменении диаметра выходного отверстия вихревой камеры d_0 , показали, что зависимость частоты резонансного пика от расхода воздуха на выходе из вихревой камеры для двух серий измерений с различными диаметрами выходного отверстия является линейной.

Теоретическая оценка частот вращения в тороидальном вихре, проведенная с использованием полученных аналитических решений для компонент скорости, совпадает с значениями частот акустических колебаний, измеренных экспериментально. Так, например, для расхода $G = 3,55 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ экспериментально измеренное значение частоты было равно 4618 Гц, а полученное в расчёте составило 4379 Гц. Погрешность не превысила 5 %.

В четвертой главе подробно рассмотрен эффект саморегулирования акустических колебаний. Представлены результаты исследований дорезонансного и резонансного режимов истечения импактного закрученного потока. Рассмотрено влияние геометрии и материалов рабочего участка.

Во всех экспериментах с незакрепленной преградой при различных диаметрах преграды был выявлен эффект саморегулирования акустических колебаний, выражающийся в резком усилении амплитуды собственных колебаний гидромеханической системы вследствие резонанса с акустическими колебаниями, излучаемыми вихревой структурой потока. На Рис. 9, а представлены амплитудно-частотные характеристики акустических колебаний, иллюстрирующие эффект саморегулирования, связанный с достижением предельного расхода закрученного потока.

На Рис. 9, б показана временная развертка, соответствующая акустической волне в дорезонансном режиме. Характер изменения амплитуды акустических колебаний во времени указывает на то, что полученная осциллограмма является результатом сложения двух колебаний, частоты которых характеризуются максимальной амплитудой. Для выбранной преграды $D = 70 \text{ мм}$ это десятый (с частотой $f_1 = 2796 \text{ Гц}$) и первый (с частотой $f_2 = 273 \text{ Гц}$) пики соответственно (режим 1 на Рис. 9, а). На Рис. 9, в представлена расчетная кривая, полученная при сложении двух гармонических колебаний с частотами $f_1 = 2796 \text{ Гц}$ и $f_2 = 273 \text{ Гц}$, амплитуды которых являются наибольшими для дорезонансного режима.

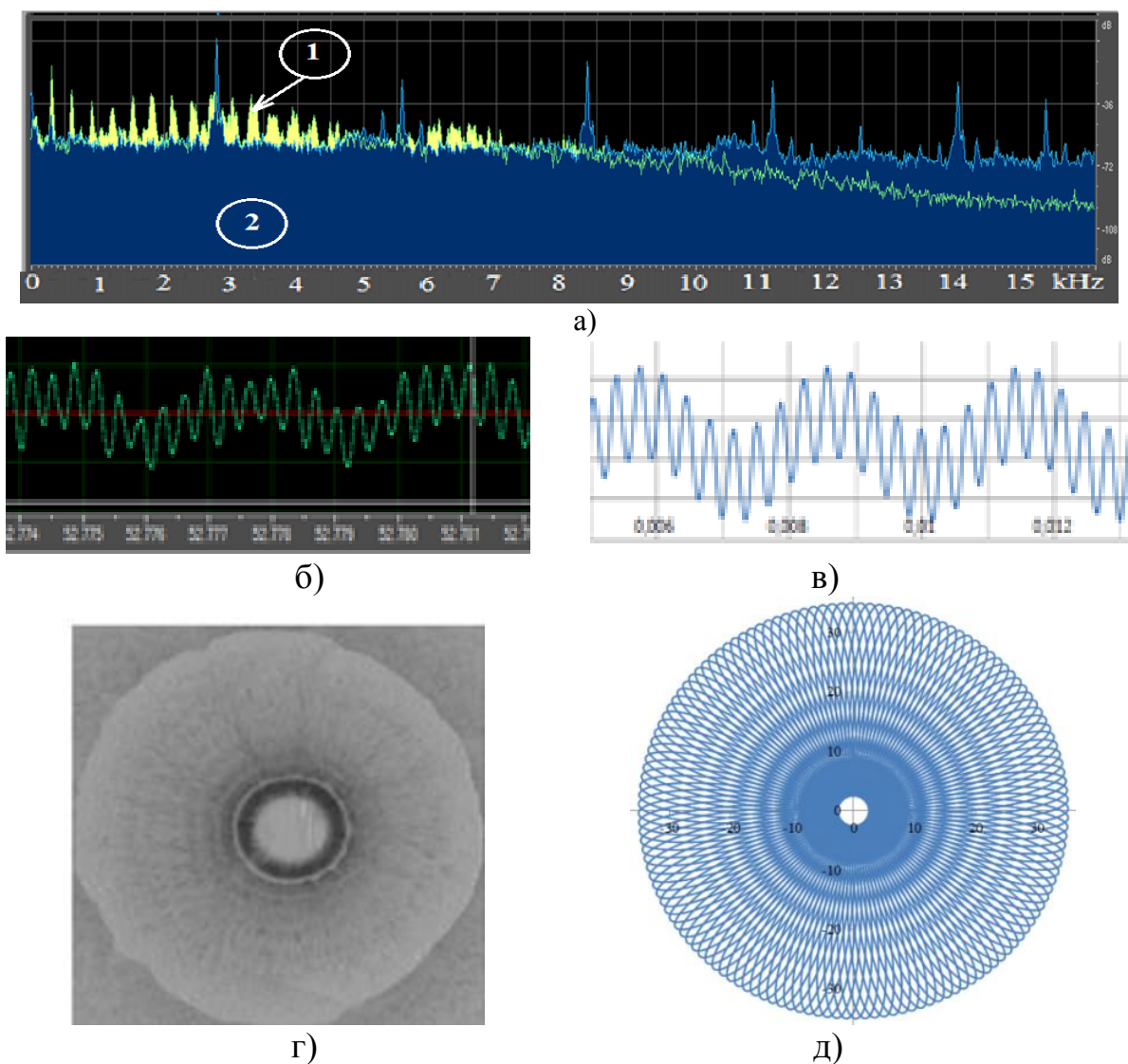


Рис. 9. Переход от дорезонансного к резонансному режиму истечения импактного закрученного потока: а) – эффект саморегулирования: амплитудно-частотные характеристики акустических колебаний 1 – в дорезонансном, 2 – в резонансном (критическом) режимах истечения; б) – экспериментальная временная развертка акустической волны в дорезонансном режиме; в) – результат сложения гармонических колебаний с частотами $f_1 = 2796$ Гц и $f_2 = 273$ Гц; г) – картина вихревого следа на верхней поверхности выходной щели; д) - фигура Лиссажу с частотами $f_1 = 2796$ Гц и $f_2 = 273$ Гц в цилиндрической системе координат (r, φ, z)

В цилиндрических координатах, определяющих геометрию рабочего участка, картина сложения колебаний в двух взаимно перпендикулярных направлениях r и φ представляет собой сложную кривую, соответствующую фигуре Лиссажу (Рис. 9, д) с частотами $f_1 = 2796$ Гц и $f_2 = 273$ Гц. Именно такая картина линий тока хорошо согласуется с полученной в результате эксперимента картиной визуализации вихревого следа на поверхности преграды (Рис. 9, г).

Как показывает визуализация картины течения (Рис. 9, г), полученная с помощью нанесения вязкой суспензии на нижнюю поверхность преграды, при истечении импактного закрученного потока из кольцевой щели на поверхности

преграды остается вихревой след в виде системы концентрических колец, повторяющих конфигурацию пересекающихся линий тока в фигуре Лиссажу (Рис. 9, д).

Анализ результатов экспериментов показал, что при переходе к резонансному режиму (режим 2 на Рис. 9, а) в процессе истечения закрученного потока воздуха верхняя торцевая поверхность камеры подвергалась асимметричному силовому воздействию, приводившему к изгибным колебаниям на частоте f_{11} , соответствовавшей случаю собственных колебаний круглой мембраны с одной неподвижной окружностью и одним неподвижным диаметром. В данном случае неподвижной окружностью являлся закрепленный край круглой пластины, а узловым диаметром – линия, соединявшая области, где в текущий момент времени происходила компенсация расхода, втекающего под преграду, и истекающего из-под нее потока воздуха. Рассчитанная частота изгибных колебаний плексигласовой пластины радиусом $R = 45$ мм и толщиной $b = 5$ мм при значениях $E = 41 \cdot 10^8$ Па, $\nu = 0,394$, $\rho = 1,18 \cdot 10^3$ кг/м³ составляла $f_{11} = 2824$ Гц.

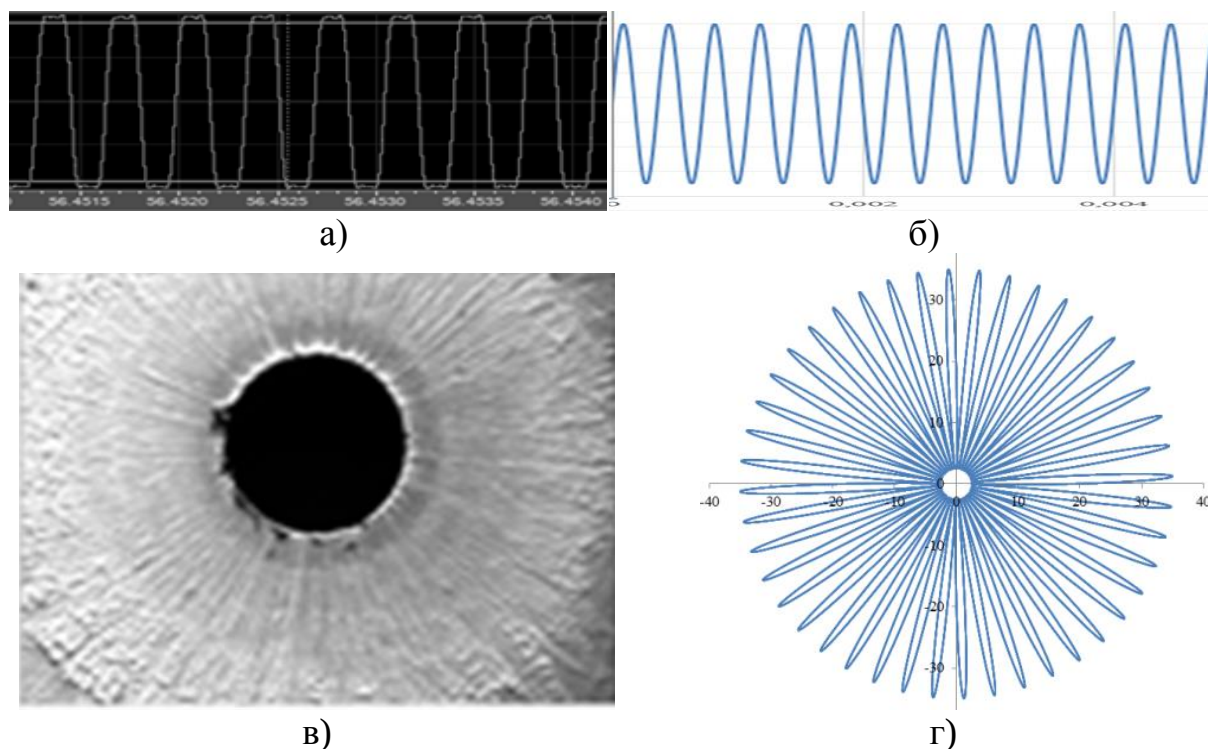


Рис. 10. Сравнение экспериментальных данных и результатов расчета в резонансном режиме: а) – экспериментальная временная развертка акустической волны; б) – результат сложения гармонических колебаний с частотами $f_1 = 2796$ Гц и $f_2 = 27$ Гц; в) – картина вихревого следа на нижней поверхности выходной щели, г) - фигура Лиссажу с частотами $f_1 = 27$ Гц и $f_2 = 2796$ Гц в цилиндрической системе координат (r, φ, z)

Сделанные оценки позволяют заключить, что обладающий большой кинетической энергией поток воздуха возбуждал колебания упругой поверхности верхней крышки вихревой камеры. Это приводило к колебаниям объема воздуха под преградой, в результате чего при совпадении частоты вращения в спиральном вихре f_1 с собственной частотой колебаний упругой верхней торцевой

поверхности камеры f_{11} возникал резонанс, при котором вытекающий поток покидал пространство под преградой за один цикл колебаний. На Рис. 10, а представлена соответствующая экспериментальная зависимость звукового давления от времени, указывающая на баланс между накоплением и сбросом энергии при резонансном режиме истечения.

Соответствующая резонансному режиму истечения картина визуализации потока, выявляющая наличие устойчивой вихревой структуры течения, сформированной идентичными продольными спиральными вихрями, представлена на Рис. 10, в. Фигура Лиссажу, соответствующая устойчивому резонансному режиму истечения при сложении акустических колебаний с частотами $f_1 = 27$ Гц и $f_2 = 2796$ Гц, представлена на Рис. 10 г.

Рис. 10 показывает, что результаты теоретического моделирования распространения акустической волны в резонансном режиме во времени (Рис. 10, б) и пространстве (Рис 10, г) хорошо согласуются с экспериментальными данными (Рис. 10 а, в).

В пятой главе проводилась оценка энергетического баланса при переходе гидромеханической системы к резонансному режиму. Описаны результаты тепловизионных измерений. Рассмотрен механизм формирования двойной вихревой структуры спиральных вихрей при переходе к резонансному режиму. Дан количественный анализ экспериментальных результатов, полученных для трех характерных режимов истечения импактной закрученной струи: дозвукового, звукового дорезонансного и резонансного.

При экспериментальном исследовании трех режимов истечения импактной закрученной струи (дозвукового, звукового докритического и резонансного) удалось показать, что акустическое давление звуковых колебаний, излучаемых при образовании устойчивой вихревой системы в области критического перехода, возрастает на 2-3 порядка.

На Рис. 11 в качестве примера представлены диаграммы интенсивности акустических колебаний, генерируемых при истечении импактной закрученной струи в трех исследованных режимах для преграды диаметром 60 мм.

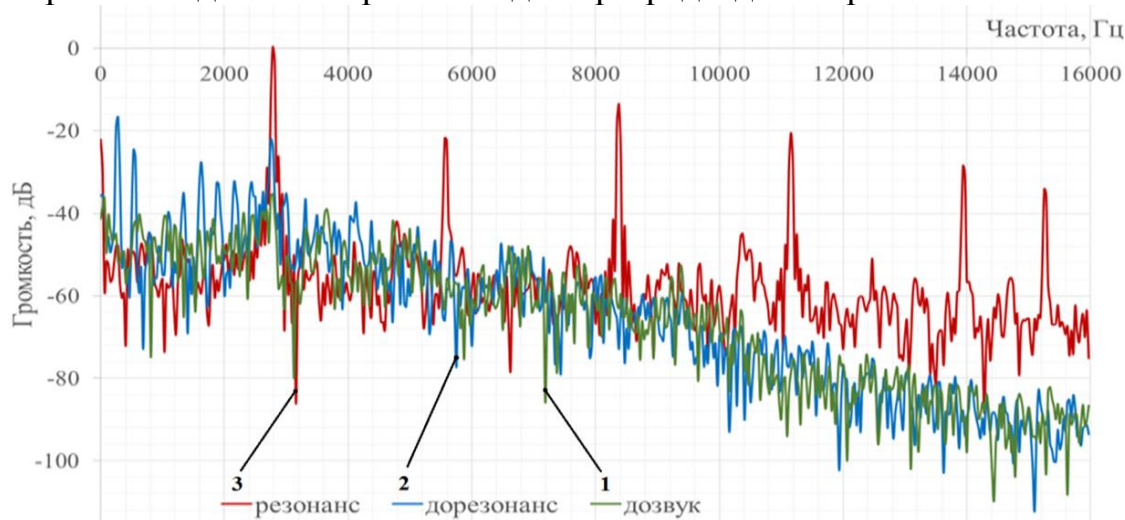


Рис. 11. Зависимости интенсивности звуковой волны от частоты для преграды диаметром $D = 60$ мм при $d_0 = 5$ мм, $G = 1,15 \cdot 10^{-3}$ м³/с для трех режимов течения: 1 – дозвуковой режим, 2- звуковой дорезонансный и 3 – резонансный

Первый из рассматриваемых режимов наблюдается при малых значениях расходов через рабочий участок и характеризуется сплошным шумовым спектром на амплитудно-частотной диаграмме, что свидетельствует об отсутствии выраженных акустических колебаний (линия 1 на Рис. 11), поэтому данный режим был назван дозвуковым.

Звуковой докритический режим (линия 2 на Рис. 11) характеризуется достижением предельного расхода воздуха через рабочий участок. В этом случае фиксируется звуковой эффект с несколькими выраженными частотами колебаний. В дорезонансном режиме истечения, как было показано выше, вытекающий поток движется под преградой по сложной замкнутой траектории, образующей фигуру Лиссажу.

Резонансный режим определяется по резкому возрастанию амплитуды звуковых колебаний на частоте, совпадающей с частотой собственных колебаний вихревой камеры (линия 3 на Рис. 11). Рисунок 11 показывает, что при переходе системы к резонансному режиму истечения (линия 3 на Рис. 11) громкость резонансных колебаний возросла на 20-30 дБ. Дополнительным источником энергии в резонирующей системе выступает энергия собственных колебаний упругой крышки вихревой камеры, возбуждающихся за счет внешнего силового воздействия со стороны вихревой структуры вытекающего потока воздуха. Проведенные вычисления для преграды диаметром $D = 60$ мм показали, что в дорезонансном режиме суммарная мощность всего спектра акустических колебаний, генерируемых детерминированной вихревой структурой потока, составила 0,56 Вт, в то время как при резонансном режиме мощность акустических колебаний возросла до 6,46 Вт за счет резкого увеличения амплитуды собственных колебаний гидромеханической системы.

С помощью тепловизионных измерений было установлено, что генерация устойчивой спирально-вихревой структуры в виде тора с двойным вращением в области истечения импактной закрученной струи происходит при существенно неравномерном распределении температурного поля. Экспериментальные данные указывают на значительное падение температуры в области формирования тороидального вихря, образующегося над краем выходного отверстия вихревой камеры (темное кольцо на Рис. 9, г). Проведенные тепловизионные измерения показали, что падение температуры между периферией и центром преграды при расходе воздуха $1,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ составляло $5 \div 20$ °С в зависимости от размеров преграды.

Предпринятые экспериментально-теоретические исследования позволили предложить физическую модель, объясняющую механизм поддержания устойчивости вихревой структуры потока в открытой гидромеханической системе при достижении критического расхода. Специально проведенные эксперименты показали, что процесс генерации устойчивой «тонкой» спирально-вихревой структуры в открытой системе при переходе закрученного потока в критический режим сопровождается притоком воздуха из окружающей среды. Существование встречного движения воздушной среды, вовлекаемой под преграду, было доказано визуализацией с помощью дымовых струй. Косвенным подтверждением данного факта и предложенной модели двухслойной спирально-вихревой

структуры течения явились данные фотосъемки, указывающие на конденсацию влаги на поверхности преграды при резком отключении расхода. Характерно, что расположение сконденсированных водяных капель во всех экспериментах наблюдалось именно в области образования спиральных вихрей, которые обеспечивали вынос рабочего тела из системы при работе установки.

Проведенный количественный анализ полученных экспериментальных результатов позволил оценить энергетический баланс при трех характерных режимах истечения импактного закрученного потока с учетом вклада процессов движения, теплообмена, вихреобразования и излучения звука. Было установлено, что в резонансном режиме диссипативные потери энергии, рассчитанные с использованием принятой схемы течения (Рис. 7), за период затухания акустических колебаний не зависят от размеров преграды и равны константе.

Поэтому отношение диссипативных потерь к коэффициенту затухания по аналогии с адиабатическим инвариантом может рассматриваться как диссипативный инвариант резонансных колебаний. Наличие подобной закономерности указывает на адекватность выбранной физической модели течения и доказывает справедливость ее использования при обработке экспериментальных результатов.

Заключение

Итогом выполнения диссертационной работы являются следующие результаты.

1. На основе проведенных экспериментально-теоретических исследований и полученных обобщений выявлены параметры, определяющие взаимосвязь акустических колебаний с вихревой структурой потока.

2. Обоснована возможность детектирования крупномасштабных вихреобразований по амплитудно-частотным характеристикам звуковых колебаний, возникающих в текущих средах.

3. Экспериментально подтверждено и исследовано явление ограничения расхода при критическом истечении закрученного потока, сопровождаемом образованием устойчивых спирально-вихревых структур.

4. Выявлены условия, определяющие существование устойчивого резонансного эффекта. Показано, что механизм возникновения звуковых резонансов в импактных закрученных течениях обусловлен генерацией крупномасштабной вихревой структуры потока.

5. Проведены экспериментально-теоретические исследования трех режимов течения импактного закрученного потока: дозвукового, звукового докритического и резонансного.

6. В результате исследований трех режимов течения установлено, что в области критического перехода, соответствующей частотному диапазону акустических колебаний, генерируемых при образовании системы устойчивых когерентных спирально-вихревых структур, звуковое давление возрастает на 2-3 порядка.

7. Показано, что перераспределение энергии в спектре акустических колебаний может приводить к резонансному возбуждению и усилению вибрационных процессов.

8. Выявлен и исследован эффект саморегулирования гидромеханической системы, заключающийся в резонансном усилении амплитуды собственных частот гидромеханической системы за счет поглощения составляющих спектра акустических колебаний, генерируемых вихревой структурой потока.

9. На основании проведенных исследований может быть предложен новый акустический диагностический метод – метод акустических резонансов, позволяющий осуществлять контроль состояния потоков теплоносителя и рабочих сред в режиме реального времени для предотвращения развития вибрационных и резонансных эффектов.

Основные публикации по теме диссертации

1. Mitrofanova O.V., Podzorov G.D., Pozdeeva I.G. Vortex structure of swirl flows // International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, Vol. 65, P. 225-234. (0,625 п.л./0,33)
2. Mitrofanova O. V., Pozdeeva I. G. Investigation of the acoustic oscillation self-adjustment mechanism in impinging swirling flows // Fluid Dynamics, September 2015, Vol. 50, Issue 5, P. 646–654 (0,5625 п.л./ 0,5)
3. Pozdeeva I G and Mitrofanova O V Acoustic relaxation of the hydro-mechanical system under critical expiration of swirl flow // Journal of Physics: Conference Series, 2018 Vol. 980, No. 1 <https://doi.org/10.1088/1742-6596/980/1/012044> (0,375 п.л./ 0,5)
4. Mitrofanova Olga and Pozdeeva Irina Studying the thermal effect in a swirled acoustic flow // MATEC Web of Conferences 115, 09002 (2017) <https://doi.org/10.1051/matecconf/201711509002> (0,375 п.л./ 0,5)
5. Mitrofanova OV, Ivlev OA, Pozdeeva IG and Urtenov DS Development of the Technology of Vortex Diagnostics to Improve the Safety of Operation of Nuclear Reactors // Journal of Physics: Conference Series, Vol. 891, conference 1. 2017 by IOP Publishing [doi:10.1088/1742-6596/891/1/012173](https://doi.org/10.1088/1742-6596/891/1/012173) (0,375 п.л./ 0,4)
6. Митрофанова О.В., Круглов А.Б., Круглов В.Б., Поздеева И.Г. Исследование топологических особенностей импактных закрученных течений // Тепловые процессы в технике. 2010. № 10. С. 434 – 441. (0,5 п.л./ 0,25)
7. Митрофанова О.В., Поздеева И.Г., Круглов А.Б., Круглов В.Б. Комплексные исследования эффектов генерации крупномасштабных вихреобразований в теплоносителях ядерных реакторов. Часть II. Экспериментальные исследования импактных закрученных течений // Ядерная физика и инжиниринг, 2012, Т. 3, № 2, С. 112 – 119 (0,5 п.л./ 0,3)
8. Поздеева И.Г., Митрофанова О.В. К оценке энергетического баланса при переходе гидромеханической системы к режиму резонансной неустойчивости // Тепловые процессы в технике. 2017. Т. 9. № 6. С. 247-251. (0,25 п.л./ 0,5)
9. Митрофанова О. В., Поздеева И. Г. «Использование акустического метода измерений для регистрации вихревой структуры потоков в каналах сложной геометрии» // Тепловые процессы в технике. 2019. Т. 11. №2. С. 50–60. (0,625 п.л./ 0,5)