

На правах рукописи



**Храмцов Игорь Валерьевич**

**ИССЛЕДОВАНИЕ СРЕДНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТУРБУЛЕНТНЫХ  
ВИХРЕВЫХ КОЛЕЦ РАЗЛИЧНЫХ ДИАМЕТРОВ И ОСОБЕННОСТИ  
ИХ АКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Специальность 01.04.06 – Акустика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Пермь – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (ПНИПУ) на кафедре «Ракетно-космическая техника и энергетические системы».

Научный руководитель: Копьев Виктор Феликсович, доктор физико-математических наук, профессор, Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского (г. Москва)

Официальные оппоненты: Никулин Виктор Васильевич, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт гидродинамики имени Лаврентьева (г. Новосибирск)  
Миронов Михаил Арсеньевич, кандидат физико-математических наук, начальник Теоретического отдела, Акустический институт имени академика Н.Н. Андреева (г. Москва)

Ведущая организация: Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова (г. Москва)

Защита состоится «14» июня 2019 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета Д 005.017.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Тихоокеанский океанологический институт им. В.П. Ильичева» Дальневосточного отделения Российской академии наук по адресу: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <https://www.poi.dvo.ru/node/777> Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Тихоокеанский океанологический институт имени В.П. Ильичева» Дальневосточного отделения Российской академии наук.

Отзывы просим направлять по почте в двух экземплярах по адресу: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43, ТОИ ДВО РАН, приемная.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д005.017.01,  
кандидат технических наук, с.н.с

А.Е. Костив

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Существующая проблема ограничения авиационного шума связана, прежде всего, с его вредным воздействием на человека. Эта проблема особенно остро встала в конце 20-го века в связи с резким увеличением самолетного парка при одновременном росте мощности силовых установок. Ресурс дальнейшего снижения шума в рамках традиционных подходов связан с серьезными техническими трудностями в реализации различных способов его снижения, что ставит акустические характеристики современных самолетов в один ряд с важнейшими критериями их конкурентоспособности. Дальнейшие работы в этом направлении требуют выдвижения новых подходов и идей, основанных на более глубоком понимании физических процессов, ответственных за генерацию шума турбулентными потоками. Таким образом, актуальность темы определяется развитием современной гражданской авиации с новыми двигателями большой мощности и ролью аэроакустики в современной борьбе в сфере высоких технологий за создание экологически чистого и конкурентоспособного пассажирского самолета.

В дозвуковых турбулентных струях, представляющих собой один из основных источников шума современных авиационных силовых установок, шум генерируется турбулентными вихрями. Поскольку в турбулентных струях присутствуют вихри различных масштабов, взаимодействующие друг с другом, картина излучения оказывается очень сложной. Поэтому важной представляется возможность исследования фундаментальных вопросов излучения звука турбулентными потоками на примере отдельного изолированного вихря.

Таким элементарным вихрем может являться вихревое кольцо. Вихревое кольцо – это хорошо известный и в определенном смысле уникальный объект, поскольку: а) допускает теоретическое исследование в рамках основных уравнений механики сплошной среды; б) легко может быть создан на практике для экспериментального исследования; в) не подвержен влиянию внешних границ, что позволяет исследовать с его помощью многие проблемы динамики и акустики вихрей в чистом виде.

**Степень разработанности темы.** Вихревое кольцо является хорошо известным объектом газовой динамики. Исследования вихревых колец проводятся с конца XIX века (Kelvin, Thomson J.J., Helmholtz H., Hicks W.M.). Многочисленные экспериментальные исследования показали, что существуют два качественно различных режима течения – ламинарный и турбулентный (Луговцов Б.А., Johnson G.M., Maxworthy T.J., Тарасов В.Ф.).

С точки зрения исследования излучения шума отдельным вихрем представляют интерес турбулентные высокоскоростные кольца с числом Рейнольдса  $Re \sim 10^4 - 10^5$ , так как именно такие кольца подходят для экспериментального исследования. Единственная в мире установка для генерации таких вихрей была создана в Центральном аэрогидродинамическом институте имени Н.Е. Жуковского (ЦАГИ). Многочисленные работы,

проведенные с использованием данного генератора вихрей, показывают, что несмотря на то, что во всей атмосфере кольца происходит турбулентное движение частиц газа с большими амплитудами и в широком диапазоне частот, звуковое поле определяется малыми колебаниями ядра вихря, которые оказываются причиной не только турбулентности вихревого кольца, но и звукового излучения (Копьев В.Ф., Зайцев М.Ю., Чернышев С.А.).

**Целью работы** является исследование аэроакустических свойств вихревого кольца и разработка новых подходов к реализации данной задачи.

**Основная задача** диссертационной работы состояла в экспериментальном исследовании акустических и аэродинамических свойств вихревого кольца и их эволюция при движении вихря по траектории. Для ее решения были рассмотрены следующие научно-технические задачи:

1. Разработка генератора вихревых колец со сменными сопловыми насадками.
2. Параметрическое исследование аэроакустических свойств вихревых колец с различными начальными скоростями и размерами.
3. Разработка методики оценки размеров вихревого кольца на начальном участке траектории на основе численного моделирования формирования и динамики движения вихревого кольца.
4. Адаптация метода многомикрофонных антенн для исследования шума вихревых колец.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

1. Создан новый генератор вихревых колец со сменными сопловыми насадками, позволяющий создавать вихревые кольца с разными размерами и скоростями. Данный генератор является единственным штатным генератором вихрей заглушенной камеры. Впервые проведены исследования акустических свойств разномасштабных вихревых колец. Обнаружено, что кольца разных размеров и скоростей имеют одинаковый механизм генерации шума.

2. Разработана методика определения газодинамических характеристик вихревого кольца на начальном участке траектории на основе численного эксперимента с учетом конструктивных особенностей установки. На основе интеграции численного моделирования и автомодельной теории проведена оценка собственной частоты излучения шума свободно летящим турбулентным вихревым кольцом. Полученные в данной работе результаты подтверждают механизм излучения шума вихревого кольца, представляющий собой колебания тонкого ядра вихря.

3. Разработана методика многоканальной обработки данных эксперимента с использованием микрофонной антенны, позволяющая определять положение вихревого кольца бесконтактным акустическим способом. Впервые проведена локализация свободно летящего вихревого кольца на различных участках траектории с помощью измерений многомикрофонной антенной.

**Практическая значимость.** Создан уникальный комплекс для экспериментальных исследований акустических свойств вихревых колец.

Предложен метод определения размеров вихревых колец на основе численного моделирования. Создана база траекторных и акустических испытаний вихревых колец, которая может использоваться для валидации численных методов в задачах аэроакустики. Результаты, полученные в работе, показывают, что с помощью вихревого кольца можно ставить тонкие физические эксперименты с целью дальнейшего изучения сложных механизмов генерации звука турбулентностью в сдвиговых потоках.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. При близких параметрах запуска каждое созданное вихревое кольцо имеет индивидуальный характер движения. С уменьшением размера соплового насадка генератора при близких параметрах запуска растет нестабильность свойств вихревых колец. Накопленная база траекторных и акустических измерений позволяет подобрать необходимое количество близких временных реализаций для исследования аэроакустических свойств вихревых колец.

2. Турбулентные вихревые кольца, образованные с помощью поршневого генератора с ударным приводом с размерами сопловых насадков 30, 40 и 50 мм, излучают звук. Шум сосредоточен в узкой полосе частот для всех колец, образованных с помощью сопловых насадков разного размера. Основной пик при движении кольца смещается в низкочастотную область, а вихревые кольца большего диаметра излучают звук меньшей частоты и амплитуды в одинаковые моменты времени.

3. Вихревые кольца разных размеров и скоростей имеют одинаковый механизм генерации шума. При этом для всех вихревых колец число Струхалья, полученное по основной частоте в спектре, размеру сопла и скорости движения, сосредоточено в области значений 4-5.

4. С помощью метода многомикрофонных антенн (бимформинг) возможно по излучаемому шуму проводить бесконтактную диагностику положения свободно летящего нестационарного вихревого кольца на различных участках траектории.

**Методы исследования.** В экспериментальных исследованиях применялись такие известные методы многоканальных измерений шума как метод азимутальной декомпозиции (МАД) звукового поля и метод многомикрофонных антенн (плоский бимформинг). Моделирование процессов формирования и движения вихревого кольца выполнялось на основе численного решения уравнений газовой динамики методом конечных объемов.

**Степень достоверности.** При решении поставленных задач использовались известные методы многоканальных измерений шума в дальнем поле и вблизи траектории. Экспериментальные исследования проведены с использованием современного измерительного оборудования и программного обеспечения. Расчетные исследования проведены с помощью известных методов вычислительной газовой динамики.

**Апробация работы.** Основные результаты работы представлены на: 1-й международной конференции «Science of the Future» (г. Санкт-Петербург, 2014); XIV Международной конференции «Высокопроизводительные

параллельные вычисления на кластерных системах» (НПС 2014) (г. Пермь, 2014); международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы современного машиностроения» (г. Юрга, 2014); XIX и XX Зимней школе по механике сплошных сред (г. Пермь, 2015; г. Пермь 2016); международной конференции «Прикладная математика и механика» (г. Омск, 2015); 4-й и 5-й открытой всероссийской конференции по аэроакустике (г. Звенигород, 2015; г. Звенигород 2017); 16-й, 17-й, 18-й и 19-й всероссийских научно-технических конференциях «Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации» (г. Пермь, 2015; г. Пермь, 2016; г. Пермь, 2017; г. Пермь, 2018), 18-й и 19-й международных конференциях по методам аэрофизических исследований (ICMAR 2016, ICMAR 2018) (г. Пермь, 2016; г. Новосибирск, 2018), 6-ой и 7-ой Всероссийских конференциях «Вычислительный эксперимент в аэроакустике» (г. Светлогорск, 2016; г. Светлогорск, 2018); 2-ой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Акустика среды обитания» (г. Москва, 2017); 2-ой Всероссийской акустической конференции (г. Нижний-Новгород, 2017); Международном симпозиуме «Неравновесные процессы в сплошных средах» (г. Пермь, 2017); 5-ой Всероссийской конференции с международным участием «Пермские гидродинамические научные чтения» (г. Пермь, 2018). Имеются акты использования результатов диссертации в научных работах и учебном процессе ПНИПУ, научных работах ЦАГИ, а также в экспериментальных работах АО «ОДК-Авиадвигатель».

**Публикации.** По теме диссертации опубликованы 5 научных статей в изданиях, определённых в перечне ведущих рецензируемых научных журналов и изданий ВАК, из них 4 работы опубликованы в изданиях, индексируемых в базе данных Web of Science. Также в материалах конференций по теме диссертации опубликовано 2 работы в журналах, входящих в базу данных Scopus.

**Личный вклад соискателя.** Диссертация написана по результатам исследований, выполнявшихся в ПНИПУ и ЦАГИ в период с 2014 по 2018 гг.: грант Правительства РФ по постановлению № 220 «О мерах по привлечению ведущих ученых в российские образовательные учреждения высшего профессионального образования» по договору № 14.Z50.31.0032; грант РФ «Теоретическое и экспериментальное исследование развития возмущений в ядрах локализованных вихрей», проект № 17-11-01271; государственного задания «Научные сотрудники, обеспечивающие функционирование научных лабораторий, созданных в рамках правительственной программы «Мегагрантов», регистрационный номер 9.7942.2017/П220. Доля автора диссертации в представленных исследованиях составляет от 10% до 90%. Доля автора диссертации в статьях в соавторстве составляет от 10% до 80%.

**Структура и объем диссертации** Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка использованных источников из 117 наименований. Общий объем диссертации составляет 112 страниц, 52 рисунков, 16 формул и 9 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулирована цель работы, приведены задачи диссертации, сформулирована научная новизна, дана характеристика практической значимости работы, сформулированы положения, выносимые на защиту, описаны методы исследования, представлена краткая аннотация содержания глав диссертации.

**В первой главе** диссертации проведен обзор экспериментальных, теоретических и численных работ, направленных на исследование вихревых колец. Проведен обзор способов создания вихревых колец и представлены требования, которым должен удовлетворять новый генератор вихрей.

**Во второй главе** представлена конструкция нового генератора вихревых колец со сменными сопловыми насадками и результаты измерения траекторий вихревых колец, полученных с помощью сопел диаметрами 30, 40 и 50 мм. Для проведения исследований свойств вихревых колец был разработан специальный поршневой генератор со сменными сопловыми насадками, основные элементы конструкции которого представлены на рисунке 1. Данный генератор представляет собой полый стальной полированный цилиндр 1 диаметром 0,16 м, к которому крепится коническое сопло 3 с диаметром выходного отверстия 0,04 м. Внутри цилиндра свободно движется легкий фторопластовый поршень 2. Перед запуском вихря поршень выдвигается на фиксированное расстояние 0,06 м.

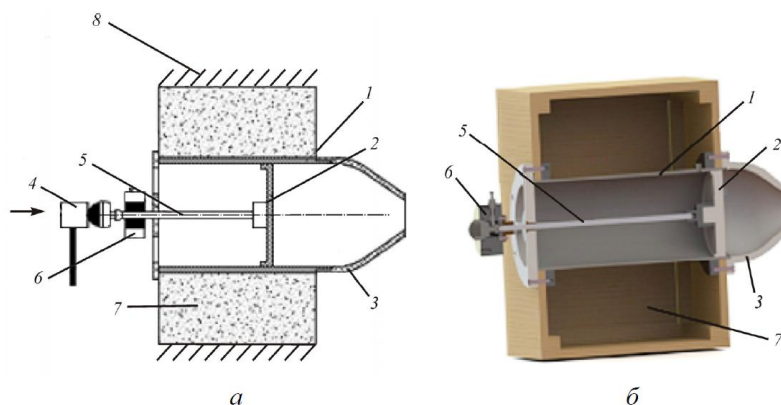


Рис. 1. Генератор вихревых колец: *а* – схема; *б* – 3D-модель; 1 – корпус; 2 – поршень; 3 – сопло; 4 – молот; 5 – шток; 6 – замок-ловушка штока; 7 – контейнер с звукопоглощающим материалом; 8 – стена

Вихревое кольцо создавалось путем импульсного выталкивания поршнем порции газа через сопло. Далее происходил отрыв образовавшейся вихревой структуры и ее перемещение в пространстве вдоль оси, совпадающей с осью поршня. Поршень приводился в движение ударом тяжелого молота 4 по штоку поршня 5. Для того чтобы избежать обратного движения поршня, генератор вихрей был оборудован специальным замком-ловушкой 6, фиксирующим шток при достижении поршнем крайнего положения.

Отличительной особенностью данного генератора от единственного генератора вихревых колец для исследования аэроакустических характеристик данных вихрей созданного в Центральном аэрогидродинамическом институте им. проф. Н.Е. Жуковского является вынос пускового механизма в отдельное помещение отделенного от заглушенной камеры толстой стеной, что позволяет существенно снизить влияние собственного структурного шума установки на полезный сигнал при проведении исследований. Также, для снижения вибраций и шума установки генератор крепился в фанерном кожухе на четыре виброопоры, оставшееся свободное пространство заполнялось специальным звукопоглощающим материалом типа «Изовер».

Шум вихревых колец удается выделить на фоне помех только в специальных заглушенных камерах. В 2014-2015 гг. в Пермском национальном исследовательском политехническом университете была разработана и построена заглушенная камера для аэроакустических исследований. Заглушенная камера представляет собой хорошо шумо- и виброизолированное помещение, облицованное изнутри звукопоглощающим материалом, который обеспечивает поглощение звуковых волн, падающих от источника шума, расположенного внутри камеры, на стены, пол и потолок. В результате в заглушенной камере можно проводить акустические измерения в условиях, весьма близких к условиям свободного поля.

Данная камера имеет следующие рабочие размеры: длина 10 м; ширина 6,8 м; высота 4,1 м. Камера облицована звукопоглощающими клиньями из базальтового супертонкого волокна с плотностью  $30 \text{ кг/м}^3$ . Клинь помещен в оболочку из акустически прозрачной ткани, его полная высота составляет 80 см, высота основания 10 см. Клинья собраны в блоки по 5 штук и вставлены в металлический каркас для сохранения формы. Камера была аттестована для измерений в диапазоне частот 150-20000 Гц.

С использованием данного генератора проведены траекторные измерения для вихревых колец, образованных с помощью сопел диаметром 30, 40 и 50 мм. Измерительная система основывалась на 13 микрофонах, расположенных вблизи оси движения вихревого кольца. Дополнительно для регистрации отклонения траектории полета вихря от оси генератора используется экран размером  $2 \times 1$  м с шелковыми стримерами. Этот экран был установлен на расстоянии 6,5 м от выходного сечения сопла, так что центр экрана находился на оси генератора. При прохождении вихревого кольца через экран шелковые стримеры отклонялись, что делало положение кольца видимым.

В ходе эксперимента было осуществлено 719 запусков кольца. При предварительной обработке была проведена разбраковка временных сигналов, в ходе которой из анализа были исключены все запуски кольца, в которых кольцо не образовывалось, ударялось о микрофоны или отклонялось от центра мишени на экране с шелковинками на расстояние более 250 мм.



Таблица 1. Результаты предварительной разбраковки.

Название сопла	Число запусков	Достигло экрана	Отклонение <25 см	Центр	Процент удачных запусков
Сопло 30	413	63	35	10	8,5
Сопло 40	206	147	135	34	65
Сопло 50	100	98	98	18	98

Как можно увидеть в таблице 1, вихревые кольца, образованные с помощью соплового насадка с диаметром среза 50 мм являются наиболее стабильными и имеют наибольший процент удачных запусков. С уменьшением диаметра соплового насадка происходит увеличение разброса характеристик и отклонений траектории колец от идеальной.

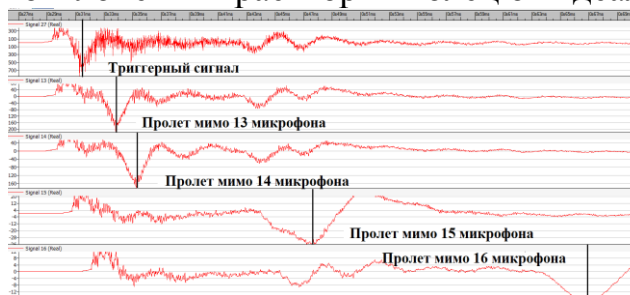


Рис. 2. Временная зависимость сигнала для для первых 5-ти траекторных микрофонов

Момент пролета кольца вблизи микрофона определялся по характерному пику разряжения давления на соответствующих временных реализациях. Точность определения времени пролета составляет около 0,2 мс, что связано с невозможностью точно определить минимум сигнала из-за малых колебаний давления (рис. 2)

На следующем этапе проводилась оценка начальной скорости вихревых колец. Для ее определения использовались микрофоны № 13-14 (рис. 2), расположенные на расстоянии  $\Delta x = 50 \pm 1$  мм друг от друга. Скорость оценивалась исходя из выражения

$$V_0 = \frac{\Delta x}{\Delta t}, \quad (1)$$

где  $\Delta t = t_{14} - t_{13}$  – разность времени прихода кольца на 14 и 13 микрофон соответственно.

Далее из анализа были исключены реализации с неестественно отклоняющимися параметрами от средних по начальной скорости и времени прилета кольца на экран. В результате, имея данные о начальной скорости и времени прихода кольца на экран с шелковинками, удалось разделить временные реализации так, чтобы отклонения начальной скорости и времени прихода кольца на экран были минимальными. Полученные результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2. Отобранные реализации

Название сопла	Количество реализаций	Средняя начальная скорость, м/с	Среднее время прилета кольца на экран, мс
Сопло 30	16	61,8	821,8
Сопло 40	40	37,25	803,97
Сопло 50	70	19	815,52

Для отобранных временных реализаций проводилась оценка среднего времени пролета мимо соответствующего микрофона  $\langle t(x_i) \rangle$  и величины среднеквадратической ошибки:

$$S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_1^N \{t(x_i) - t_j(x_i)\}^2}$$

где  $N$  – количество реализаций для анализа. Также проводилось сравнение средней траектории движения вихревых колец, полученных с использованием созданного генератора, и предыдущих работ, выполненных в ЦАГИ. Сравнение средних траекторий вихревых колец, образованных с помощью соплового насадка диаметром 40 мм, полученных в данной работе и предыдущих работах ЦАГИ, представлено на рисунке 3.

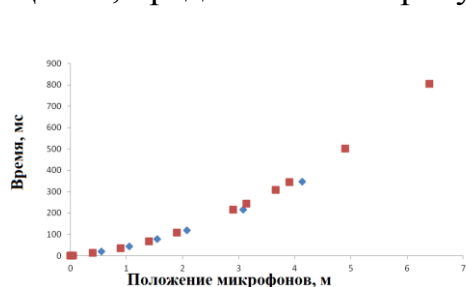


Рис. 3. Сравнение средних траекторий движения вихревых колец:  $\blacklozenge$  – результаты ЦАГИ;  $\blacksquare$  – результаты текущих экспериментов

Проводилось сравнение среднеквадратичного отклонения времени прихода на микрофон, установленный на расстоянии  $\approx 4$  м. Для всех сопловых насадок наблюдается меньший разброс времени прилета кольца на удаленные от среза сопла траекторные микрофоны по сравнению с результатами предыдущих работ. Это позволяет говорить о том, что предложенная методика разбраковки временных реализаций может надежно использоваться для отбора реализаций вихревых колец с целью дальнейшего исследования их акустических характеристик.

**В третьей главе** представлено параметрическое исследование шума вихревых колец, имеющих различные скорости и размеры. Целью проведения параметрических исследований являлись: регистрация излучения шума вихревыми кольцами, образованными с помощью сопловых насадков 30, 40 и 50 мм и выделение шума вихревого кольца на фоне помех. Для этого проводилось две серии экспериментов. В ходе первой серии экспериментов выполнялась запись шума летящего вихревого кольца. При этом совместно фиксировалась начальная скорость движения кольца, моменты пролета кольца на расстояниях 3,6 и 6,5 м. С помощью экрана с шелковинками по отклонению шелковинок в момент пролета кольца через экран фиксировалось место

попадания кольца в экран и отклонение траектории кольца от оси генератора. Вторая серия экспериментов полностью соответствовала первой, однако кольцо принудительно разрушалось на начальном участке траектории с помощью акустически прозрачной ловушки. В данной серии экспериментов фиксировался шум запуска и структурный шум в заглушенной камере.

Во время полета кольца происходит изменение его параметров, в частности, происходит изменение скорости полета, его размеров и т.д. Изменение скорости и размеров приводит к изменению завихренности в ядре, что напрямую связано с излучением шума данным вихрем, поскольку частота пика напрямую связана с величиной средней завихренности в ядре. Нестационарность исследуемого процесса приводит к смещению пика в низкочастотную область, в связи с этим удобным представляется исследовать звуковое поле на малом участке временной реализации длиной  $T = 31,2$  мс.

Спектральные характеристики вычислялись для всех временных реализаций, входящих в усредняемый ансамбль "с кольцом" и ансамбль фонового шума, для одного и того же времени задержки  $\tau$  от триггерного сигнала. Таким способом получены спектры шума, излучаемого турбулентным вихревым кольцом на различных участках его траектории. Были построены усредненные спектры на каждом малом участке временной реализации. Шум вихревого кольца на фоне помех удалось выделить, начиная с момента задержки от триггерного сигнала 120 мс. В качестве примера на рисунке 4 приведены спектры с временем задержки 210 и 420 мс

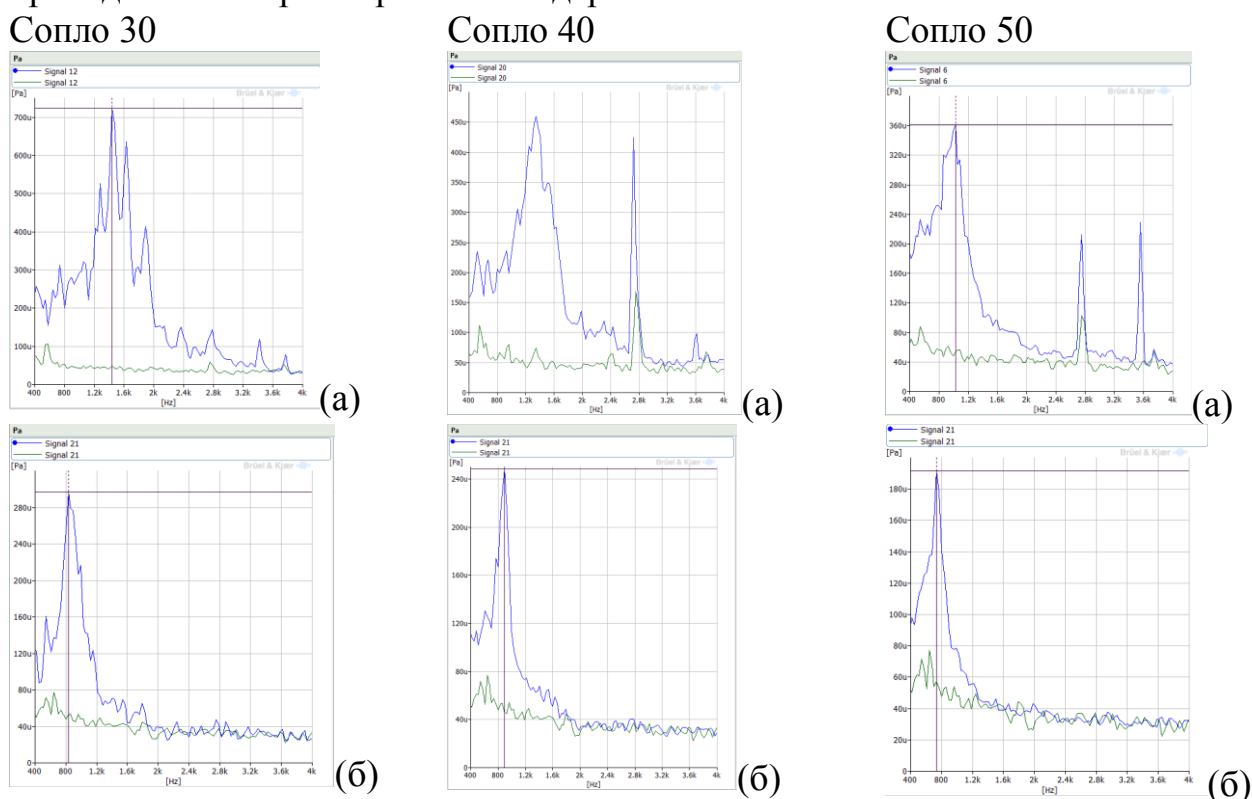


Рис. 4. Спектры шума вихревых «с кольцом» (синяя кривая) и фонового шума (зеленая кривая): а) задержка 210 мс; б) задержка 420 мс

Полученные результаты хорошо соответствовали теоретическим представлению о шуме вихревого кольца и предыдущим экспериментальным результатам. Шум сосредоточен в узкой полосе частот для всех колец, образованных с помощью сопловых насадок разного размера. При этом основной пик при движении кольца смещается в низкочастотную область, а вихревые кольца большего диаметра излучают звук меньшей частоты и амплитуды в одинаковые моменты времени.

Проведен анализ смещения основной частоты и амплитуды в спектре излучения вихревого кольца от времени для вихрей, полученных с помощью сопловых насадок разных размеров. Полученные частоты были приведены к безразмерному виду относительно числа Струхалия. Использовалось число Струхалия по начальной скорости движения вихревого кольца и диаметру среза сопла:

$$St = \frac{fd_c}{V_0}, \quad (2)$$

где  $f$  – частота излучения;  $d_c$  – диаметр среза сопла;  $V_0$  – начальная скорость движения кольца.

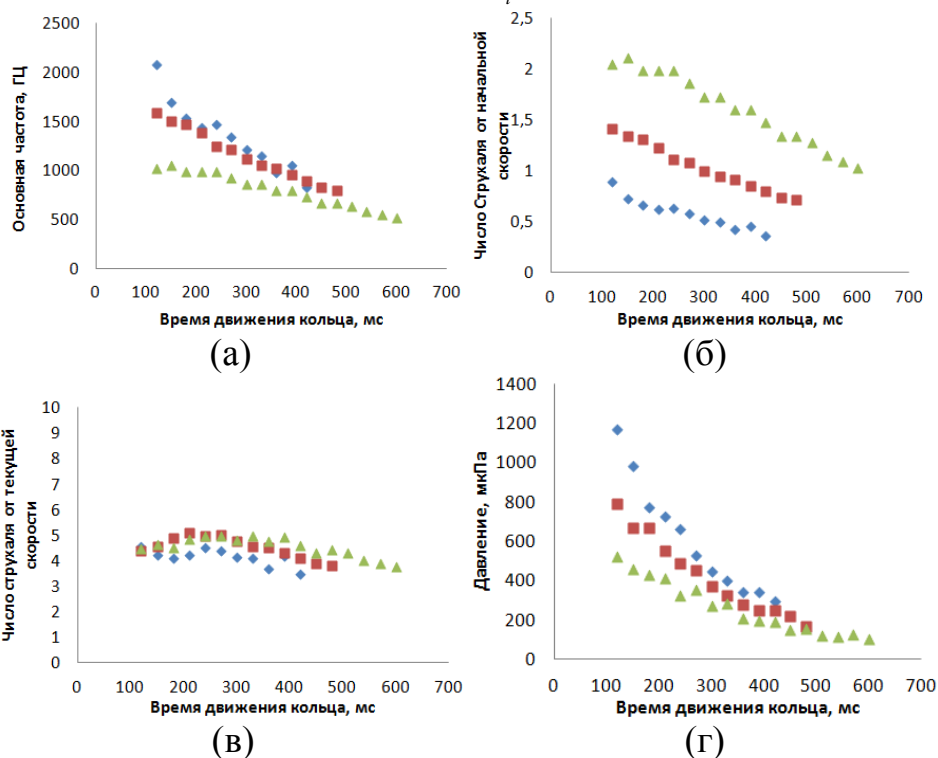
Также использовалось число Струхалия по текущей скорости движения вихревого кольца и диаметру среза сопла:

$$St = \frac{fd_c}{V_t}, \quad (3)$$

где  $V_m$  – текущая скорость движения кольца.

Проводилась нормировка амплитуды относительно диаметра среза сопла и текущей скорости движения вихря:

$$P_n = \frac{Pd_c}{V_t}, \quad (4)$$



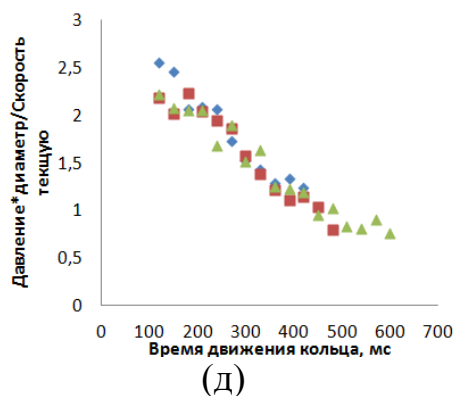


Рис. 5. Временная зависимость частоты (а), числа Струхаля от начальной скорости (б) и числа Струхаля от текущей скорости (в), (г) амплитуды излучения вихревого кольца, (д) нормированной амплитуды.

◆ – вихревые кольца, образованные с помощью соплового насадка диаметром 30 мм; ■ – 40 мм; ▲ – 50 мм

Из рисунка 5 (а) видно, что основная частота в спектре шума вихревых колец  $f$  смещается в низкочастотную область при движении вихрей каждого семейства. Рассматривая число Струхаля с использованием начальной скорости и диаметра среза сопла (рис. 5 (б)), можно увидеть, что зависимости безразмерной частоты от времени для различных вихрей становятся подобными друг другу, при этом кольца распадаются на три группы в соответствии с диаметром соплового насадка. Использование числа Струхаля по текущей скорости

(рис. 5. (в)) позволяет сблизить соответствующие кривые так, что для всех вихрей излучение шума оказывается сосредоточено в области одного числа Струхаля  $\sim 4 \dots 5$ . Полученные результаты позволяют заключить, что кольца разных размеров и скоростей имеют одинаковый механизм излучения шума. Амплитуда на пике излучения нелинейно убывает (рис. 5 (г)). Результаты, представленные на рис. 5 (д), позволяют говорить о линейной зависимости амплитуды излучения от отношения диаметра к скорости для всех исследованных вихревых колец.

Одной из основных проблем при исследовании свойств вихревых колец является необходимость проведения большого количества экспериментов для получения достаточного набора реализаций, чтобы провести разбраковку вихревых колец и построить усредненные по ансамблю спектры шума. В настоящей работе предложено использовать одну временную реализацию, и усреднять спектры, полученные для каждого из 6 микрофонов, расположенных на одинаковом расстоянии вокруг траектории движения вихревого кольца, используя для этого азимутальную решетку метода азимутальной декомпозиции. Данная решетка представляет собой два правильных шестиугольника радиусом 0,8 м, расположенных поперек траектории, через центр которых пролетает вихрь. разнесенных на расстояние 0,76 м.

По 6 микрофонам были построены усредненные спектры шума одиночного вихревого кольца, образованного с помощью соплового насадка 50 мм для

выбранной временной реализации. Полученные при этом спектры хорошо соотносятся с типичными спектрами шума вихревого кольца. Для рассмотренной временной реализации была определена частота максимума в спектре и амплитуда излучения в различные моменты времени и проведена обработка данных результатов в соответствии с выражениями (2-4). Как можно увидеть на рисунке 6, результаты для единичной временной реализации хорошо соотносятся с результатами при усреднении по ансамблю реализаций.

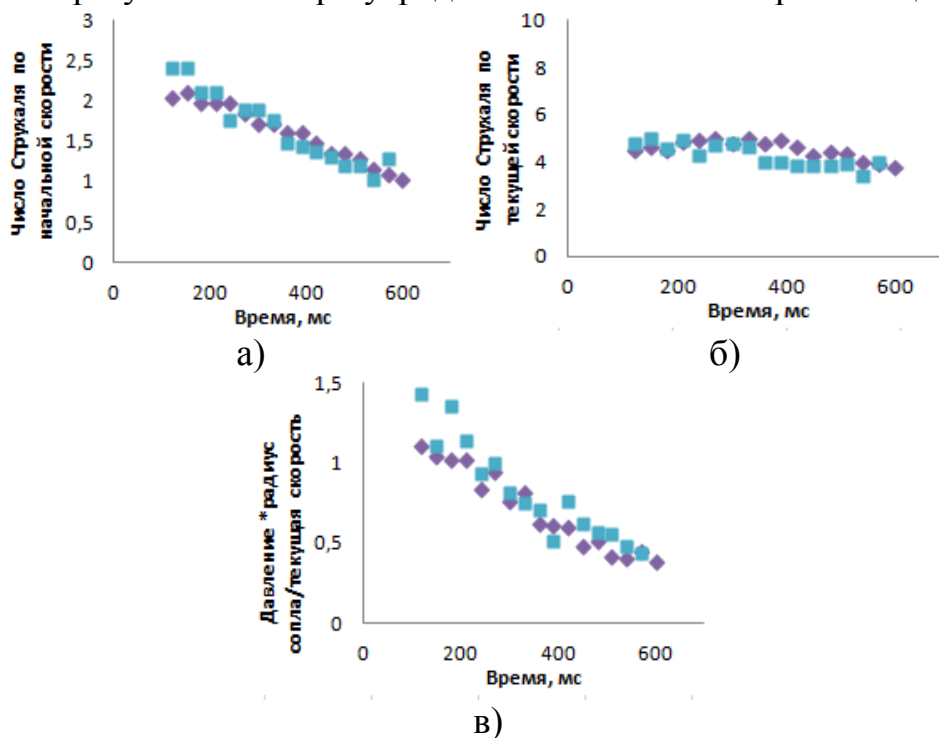


Рис. 6. Зависимости от времени а) числа Струхала, посчитанного по начальной скорости, б) числа Струхала, посчитанного по текущей скорости, в) нормированной амплитуды пика. ■ – одиночное вихревое кольцо; ♦ – усредненные значения по ансамблю реализаций

В итоге можно заключить, что шум вихревого кольца сосредоточен в узкой полосе частот для всех колец, при этом его частота смещается в низкочастотную область и происходит уменьшение его амплитуды. Основная частота излучения в спектре вихревого кольца сосредоточена в области числа Струхала 4-5. Результаты параметрических исследований позволяют говорить о том, что различные по скорости и размерам вихревые кольца имеют одинаковый механизм генерации шума.

В четвертой главе представлено расчетно-экспериментальное исследование частоты пика в спектре вихревого кольца. Для исследуемых тонких вихревых колец ( $\mu = a/R \approx 0,12$ ) звукообразующими пульсациями являются колебания ядра с частотами, лежащими вблизи значения:

$$\omega_m = \frac{\Omega_0}{2}, \quad (5)$$

где  $m$  – номер моды;  $\Omega_0$  – значение завихренности в ядре.

Если выразить собственную частоту таких колебаний через измеряемые в эксперименте величины  $V$  – скорость движения кольца,  $R$  – радиус кольца и безразмерный размер ядра вихря  $\mu = a/a$ , где  $a$  – радиус ядра вихревого кольца, то используя известное выражение для скорости кольца (6):

$$V = \frac{\Omega_0 a \mu}{4} \left( \ln \frac{8}{\mu} - \frac{1}{4} \right), \quad (6)$$

выражение (5) приводим к виду (7):

$$\omega_m = \frac{2}{\mu^2 c(\mu)} \frac{V}{R}, \quad (7)$$

где  $c(\mu) = \ln \frac{8}{\mu} - \frac{1}{4}$ .

В работе проводится сравнение частоты излучения звука свободно летящим турбулентным вихревым кольцом с рассмотренной теоретической моделью на значительном участке траектории. При этом, для определения параметров вихревого кольца, входящих в (7), предлагается использовать численное моделирование.

Свойства вихревого кольца существенно зависят от условий его создания, в частности от интенсивности перемещения поршня генератора. В связи с этим, в эксперименте проводилась совместная регистрация перемещения поршня генератора вихревых колец, перемещения самого вихревого кольца и шума в дальнем поле, излучаемого данным вихрем. Рассматривались вихревые кольца, образованные с помощью сопловых насадок с диаметрами среза 40, 50 и 60 мм.

Была выбрана одна временная реализация для каждого соплового насадка, где вихревое кольцо попадало в центр экрана и параметры движения были близки к средним. Сигналы от акселерометра были проинтегрированы, чтобы получить скорость и перемещение поршня. Это позволило использовать в численном моделировании реальный закон движения поршня

Численное моделирование формирования вихревого кольца на начальном участке его траектории выполнялось в программном пакете ANSYS Fluent. Процесс формирования вихревого кольца проводилось непосредственно по аналогии с экспериментом, в котором воздушный поток выталкивается из сопла подвижным поршнем. При численном моделировании этот процесс был реализован путем перестроения вычислительной сетки в области смещения стенки поршня. Перестроение сетки выполнялось в соответствии с экспериментально определенной зависимостью перемещения поршня.

Формирование и динамика вихревого кольца характеризуются сложными нестационарными турбулентными течениями. Моделирование данных процессов основано на прямом численном решении нестационарных уравнений Навье-Стокса с учетом сжимаемости в осесимметричной постановке.

На первом этапе проведено сравнение перемещения вихревого кольца по результатам численного моделирования и расчета в Ansys Fleunt. Верификация расчетов проводилась по значению начальной скорости. Начальную скорость

вихревого кольца определяли по выражению (1) на основании разности положений кольца на участках с координатами  $x_2 = 0,122$  м и  $x_3 = 0,172$  м, где были установлены микрофоны. Сравнение начальной скорости вихревого кольца, полученное в расчете и эксперименте, представлено в таблице 3.

Таблица 3. Сравнение начальной скорости

	Сопло 40	Сопло 50	Сопло 60
$V_{0расч},$ м/с	32,7	28,11	17,62
$V_{0эсп},$ м/с	33,33	27,77	17,85

На рисунке 7 представлено распределение завихренности в момент времени, соответствующий прохождению вихревым кольцом точки с координатой  $X/D_c=3$ , где  $X$  – положение кольца,  $D_c$  – диаметр среза сопла.

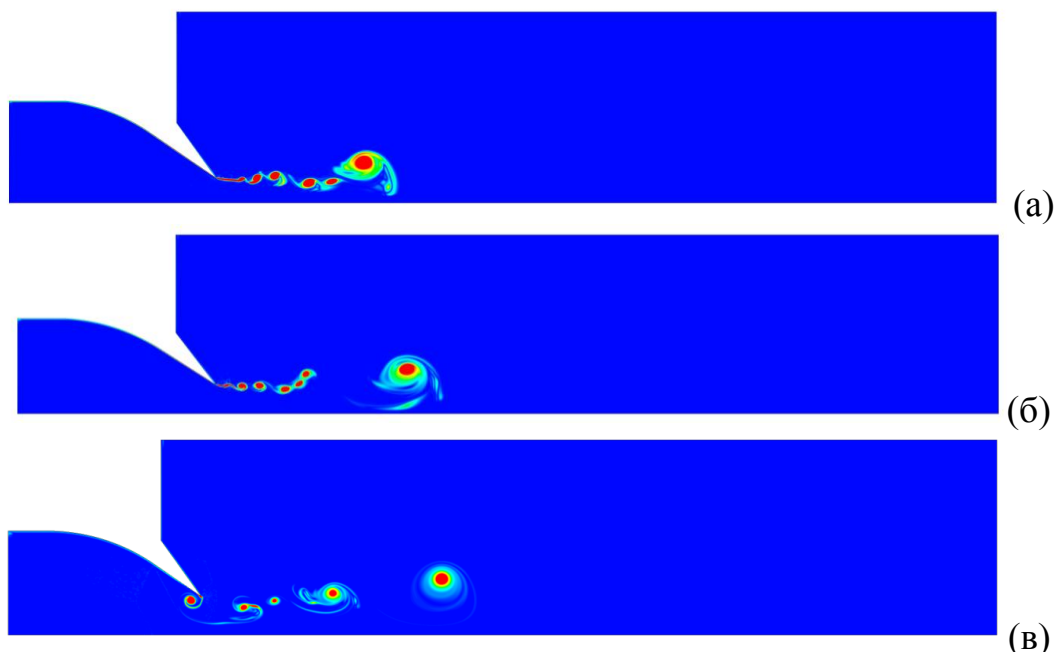


Рис. 7. Распределение завихренности при прохождении вихревым кольцом точки с координатами  $X/D_c=3$ : (а) сопло 40; (б) сопло 50; (в) сопло 60.

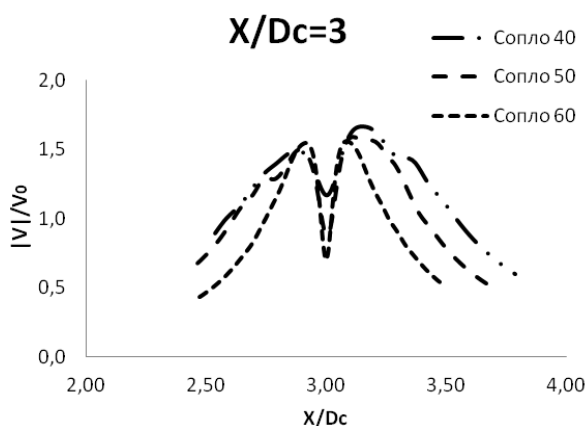


Рис. 8. Распределение модуля скорости в вихревом кольце

В данной точке проводилась оценка размеров вихревого кольца. Радиус вихревого кольца определялся положением максимума завихренности в основном вихре. Для оценки размеров ядра вихревого кольца происходил анализ профиля модуля скорости вдоль линии, проходящей через центр вихря и параллельной оси движения кольца. Диаметр ядра определялся по положению максимальных значений в распределении модулей скорости внутри вихревого кольца (рис. 8).



После выполнения процедуры обработки результатов численного моделирования получены свойства вихревого кольца на начальном участке, когда кольцо только сформировалось. Оценить значения поступательной скорости и радиуса вихря на большом удалении от среза сопла можно с помощью автомодельного закона движения вихревого кольца (8):

$$L(t) = \frac{R_0}{\alpha} \left[ \left( 1 + \frac{4\alpha V_0 t}{R_0} \right)^{\frac{1}{4}} - 1 \right],$$

$$V(t) = V_0 \left( \alpha \frac{L(t)}{R_0} + 1 \right)^{-3},$$

$$R(t) = R_0 + \alpha L(t).$$
(8)

Здесь  $R_0$ ,  $V_0$  – начальный радиус и начальная скорость вихревого кольца соответственно;  $\alpha$  – коэффициент скорости расширения вихревого кольца. Коэффициент  $\alpha$  подбирался так, чтобы зависимость перемещения и скорости вихревого кольца, полученные по выражениям (8), хорошо соотносились с результатами эксперимента. Для всех вихревых колец  $\alpha \approx 0,004$ .

На основе совместного использования результатов натуральных экспериментов и численного моделирования были найдены все параметры, входящие в выражение (8), что позволило провести сравнение значений основной частоты. Установленные свойства вихревых колец, используемые в автомодельных теориях для движения вихревого кольца и смещения частоты, представлены в таблице 4.

Таблица 4. Свойства вихревых колец

	$V_0$	$R_0$	$\mu$
Сопло 40	33,33	0,032	0,145
Сопло 50	27,77	0,0365	0,135
Сопло 60	17,85	0,042	0,12

Как можно увидеть на рисунке 9, значение основной частоты, полученное в эксперименте, для всех вихрей качественно соотносится с результатами, полученными с помощью выражения (7). Ранее во второй главе экспериментально был отмечен факт увеличения неустойчивости свойств вихревого кольца с уменьшением диаметра соплового насадка, что может объяснить увеличение количественного рассогласования результатов для вихревого кольца, образованного с помощью сопла диаметром 40 мм.

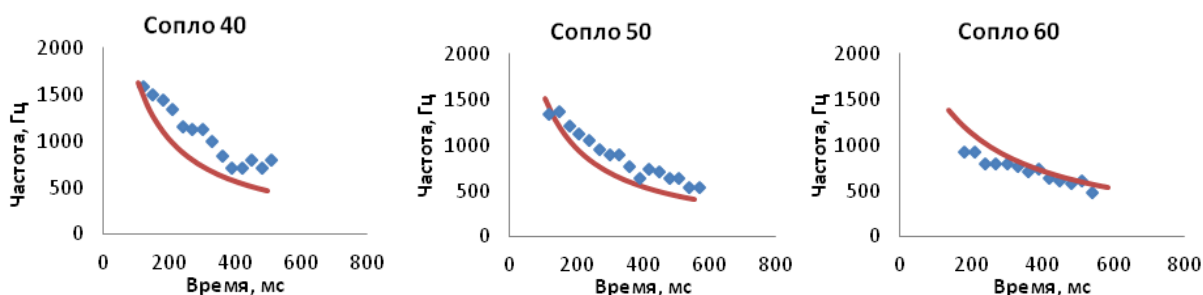


Рис. 9. Сравнение основной частоты излучения вихревых колец:

♦ – результаты эксперимента; — — значение частоты по выражению (7)

Для движущегося вихревого кольца, подставляя в (5) выражение (6) для поступательной скорости, можно получить для безразмерного числа Струхала  $Sh_1 = f \cdot D/V$  выражение

$$Sh_1 = \frac{2}{\pi \cdot \mu^2 c(\mu)} \quad (9)$$

Используя предположение, что свойства среднего течения в вихревом кольце на протяжении всей траектории подчиняются автомодельной теории с постоянным  $\mu$ , получим, что число Струхала должно оставаться постоянным при движении кольца.

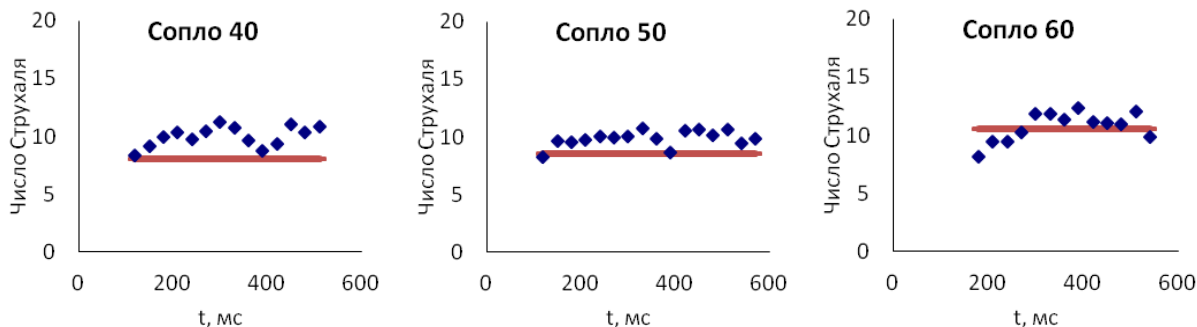


Рисунок 10. Сравнение числа Струхала (9) частоты излучения вихревых колец: ◆ эксперимент; — теория

На рисунке 10 приводится сравнение экспериментального значения числа Струхала  $Sh = f \cdot D/V$ , где значения  $f$  взяты из эксперимента, а величина  $D$  и  $V$  из автомодельной теории, с теоретическим выражением (9) на различных расстояниях от генератора, которое показывает удовлетворительное согласие с экспериментом для всех размеров сопла.

Таким образом, на основе интеграции численного моделирования и автомодельной теории проведена оценка собственной частоты излучения шума свободно летящим турбулентным вихревым кольцом. Полученные в данной работе результаты подтверждают механизм излучения шума вихревого кольца, представляющий собой колебания тонкого ядра.

**В пятой главе** представлены результаты локализации и модального анализа источников шума вихревого кольца с помощью многомикрофонных решеток.

Шум вихревого кольца состоит из 5 квадрупольей, каждый из которых излучает шум независимо от других. Кроме того, в излучении имеются высшие мультиполи существенно меньшей амплитуды. Для определения направленности квадрупольного излучения был проведен эксперимент, результаты которого в дальнейшем были обработаны по методу азимутальной декомпозиции.

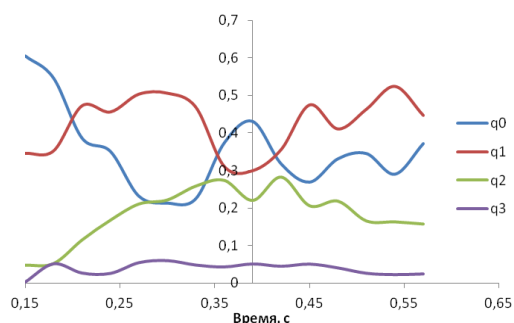


Рис. 11. Направленность шума вихревого кольца

В ходе эксперимента регистрировался шум вихревого кольца с помощью шестиугольной микрофонной решетки радиусом 1 м, установленной на расстоянии 4 м от среза сопла. Полученная направленность излучения вихревого кольца представлена на рисунке 11.

Вклад каждой квадрупольной составляющей можно оценить исходя из выражений:

$$p_{0r}^2 = \frac{q_0(\cos^2 \chi - 1/3)^2 + 2q^2}{s^2},$$

$$p_{1r}^2 = \frac{q_1 \sin^2 2\chi + 2q^2}{s^2},$$

$$p_{2r}^2 = \frac{q_2 \sin^4 \chi + 2q^2}{s^2},$$

$$p_{3r}^2 = \frac{q^2}{s^2},$$

$$s^2 = q_0(\cos^2 \chi - 1/3)^2 + q_1 \sin^2 2\chi + q_2 \sin^4 \chi + 7q^2,$$

$$\tan \chi = \frac{R}{x(t) - L_0},$$

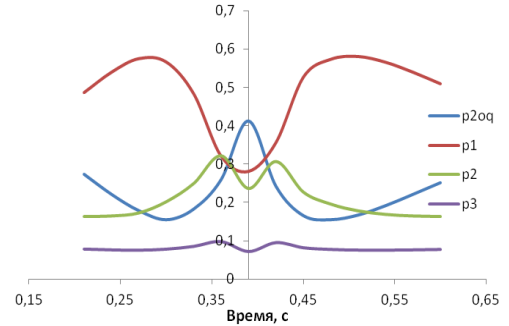


Рис. 12. Вклад различных азимутальных составляющих в суммарное квадрупольное излучение

где  $q_0$ ,  $q_1$ ,  $q_2$  — заданные амплитуды нулевой, первой и второй азимутальной моды;  $L_0$  — координата центра решетки,  $x(t)$  — координата источника на траектории, соответствующей траектории кольца, осредненной по многим реализациям. Полученная эволюция относительного вклада данных квадрупольных составляющих при  $q_0 = 0,6$ ,  $q_1 = 0,4$ ,  $q_2 = 0,1$ ,  $q = 0,07$  представлена на рисунке 12.

Прямое сравнение результатов, представленных на рисунках 11 и 12 невозможно, вследствие неизвестности амплитуд  $q_0$ ,  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $q$ . Однако, стоит отметить качественное соответствие рассмотренных мод. Можно сделать вывод о том, что шум вихревого кольца состоит из пяти квадрупольей, имеющих близкую частоту, локализованную вблизи одного значения.

Для локализации источников шума вихревого кольца при его движении предложено использовать многомикрофонную антенну, с использованием адаптации алгоритма метода бимформинга для рассматриваемой задачи. С помощью данного метода можно получить информацию о распределении акустических источников в пространстве, определить уровень звукового давления данных источников на представляющих интерес частотах.

Для измерения шума вихревого кольца в дальнем поле применялась 9-лучевая 54-микрофонная антенна Bruel & Kjaer типа WA-1676-W-003 с неполным числом микрофонов. Использовались 26 четвертьдюймовых микрофонов Bruel & Kjaer типа 4958, расположенных на внешних контурах антенны. Проведенный анализ диаграммы направленности и функции максимального бокового лепестка для данной конфигурации установки позволил установить, что на представляющих интерес частотах (2000 Гц) динамический диапазон будет составлять 6,1 дБ.

Измерения проводились для соплового насадка 50 мм. Зная участок времени, на котором кольцо излучает шум, строились спектры шума кольца в каждый момент времени на участках протяженностью  $T = 31,2$  мс для каждого из микрофонов антенны с различной задержкой от момента создания вихря. Полученные спектры на каждом микрофоне усреднялись по всем микрофонам антенны. В результате были построены спектры в каждый момент времени для данной реализации и определена основная частота излучения.

Обработка методом бимформинг производилась методом Beamforming Delay and Sum на участках длиной  $T=31,2$  мс, соответствующих участкам, на которых были подготовлены спектры шума для выбранной временной реализации. При построении карты локализации источник определялся в полосе частот 256 Гц вблизи основной частоты излучения ( $\pm 128$  Гц от основной частоты), полученной по спектрам, подготовленным для каждой реализации.

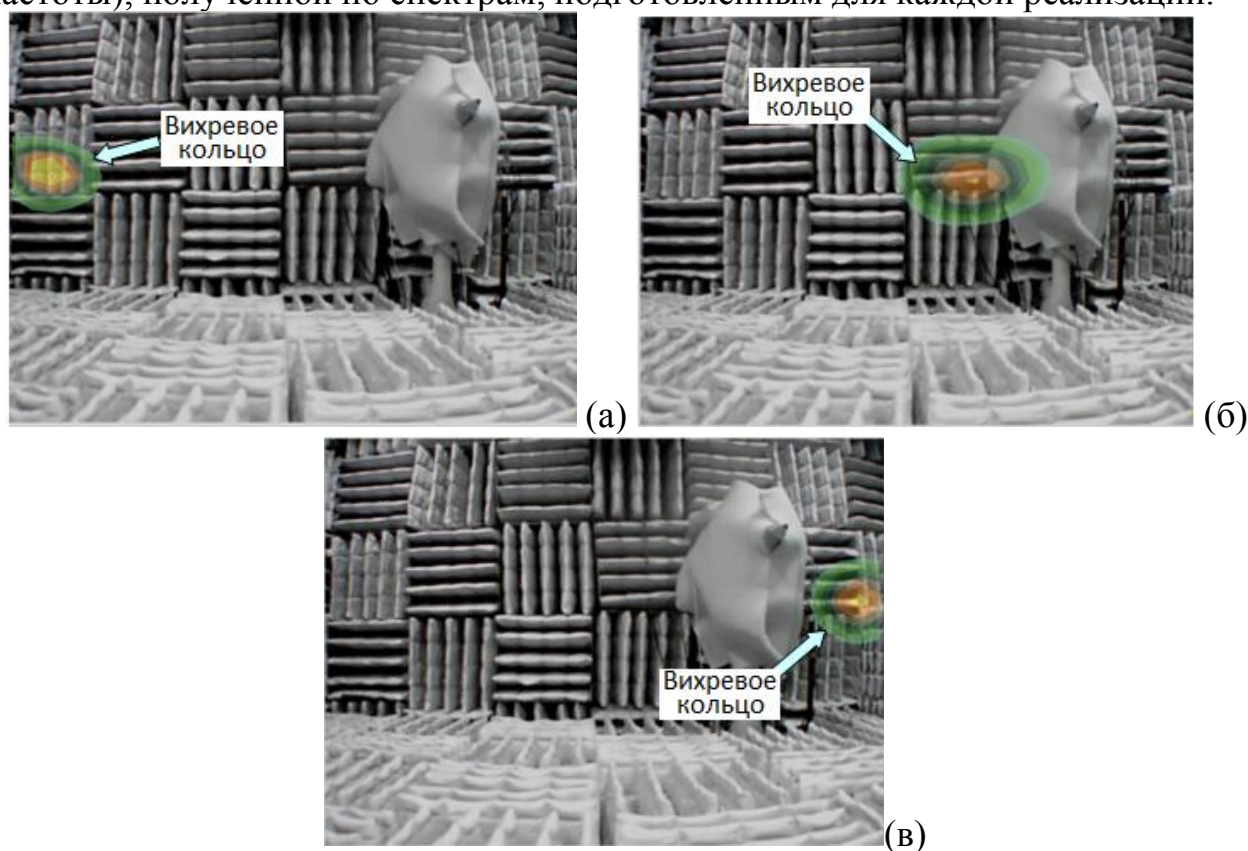


Рис. 13. Карта локализации источников шума в моменты времени: (а) – задержка 150 мс; (б) – задержка 240 мс; (в) – задержка 300 мс.

Как можно увидеть на рисунке 13, положение источника перемещается вдоль оси с течением времени, источник, как и следует ожидать, находится на оси движения кольца, перемещается вместе с кольцом и в каждый момент времени на карте локализации остается единственным.

Проведено сравнение положения источника шума, полученного методом бимформинг с результатами траекторных экспериментов. Для этого в базе траекторных экспериментов выбиралась похожая временная реализация, в

которой время удара вихревого кольца о экран с шелковинками совпадало со временем исследуемой реализации.

На рисунке 14, представлено положение источника шума, полученное методом бимформинг, которое соответствует результатам траекторных экспериментов. В соответствии с этим можно сделать вывод, что источник, видимый на картах локализации, действительно соответствует вихревому кольцу, и разработанная методика позволяет определять положение источника шума вихревого кольца в различные моменты времени.

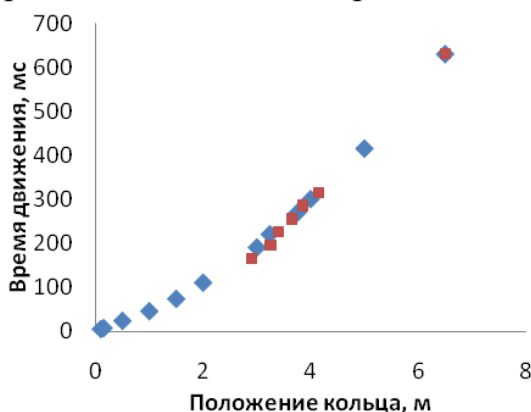


Рис. 14. Сравнение положения вихревого кольца.  $\blacklozenge$  – положение вихревого кольца по результатам траекторных экспериментов;  $\blacksquare$  – положение вихревого кольца, полученное с помощью метода бимформинг.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с поставленными задачами в диссертационной работе создан генератор вихревых колец со сменными сопловыми насадками, проведено параметрическое исследование перемещения и излучения шума вихрей с различными начальными скоростями и размерами с помощью различных методов.

Отличительными особенностями созданного генератора вихревых колец являются: 1) изолирование места проведения ударного запуска установки от места измерений шума вихревого кольца, что позволило увеличить длительность полезного сигнала, регистрируемого в эксперименте; 2) возможность использования сменных сопловых насадок, что позволило провести исследование шума вихрей в широком диапазоне начальных скоростей от 17 до 60 м/с.

Разработана методика траекторных измерений вихревых колец, основанная на исследовании временных сигналов с микрофонов установленных вблизи траектории движения вихревого кольца. Накоплена база траекторий движения вихревых колец, образованных с помощью сопловых насадок 30, 40 и 50 мм.

Получены усредненные по ансамблю реализаций спектры на различных участках траектории движения вихревых колец для сопловых насадок 30, 40 и 50 мм. Для всех вихревых колец шум сосредоточен в узкой полосе частот,

основной пик при движении кольца смещается в низкочастотную область и уменьшается его амплитуда.

Важным результатом выполненной работы является подтверждение того, что вихревые кольца с различными начальными скоростями и размерами имеют одинаковый механизм излучения шума, представляющий собой колебания тонкого ядра. Для всех вихревых колец число Струхала, полученное по основной частоте в спектре, размеру сопла и скорости движения, сосредоточено в области значений 4-5.

Разработана методика исследования акустических и траекторных измерений на основе единичной временной реализации вихревого кольца. Методика основана на усреднении спектров на микрофонах, находящихся вокруг траектории движения вихревого кольца. Шум единичного вихревого кольца хорошо соответствует результатам, полученным при усреднении по ансамблю реализаций.

По результатам численного моделирования получены размеры вихревых колец, которые затем использовались в автомобильных теориях для оценки свойств вихрей на участке траектории, где регистрировался шум. В результате проведена оценка собственной частоты излучения шума свободно летящим турбулентным вихревым кольцом. Полученные значения собственной частоты излучения хорошо совпадают с результатами экспериментов для вихревых колец разных размеров. В результате подтверждается механизм излучения шума вихревыми кольцами, представляющий собой колебания тонкого ядра.

Для локализации источников шума вихревого кольца при его движении предложено использовать многомикрофонную антенну, с использованием адаптации алгоритма метода бимформинга для рассматриваемой задачи. Положение источников шума на карте локализации хорошо согласуется с траекторными измерениями вихревого кольца. С помощью антенны для бимформинга получены осредненные по сигналам микрофонов антенны спектры однократных реализаций, соответствующие локализации источников при различных задержках от момента запуска.

В совокупности все использованные методы исследования вихревых колец оказываются согласованными и дают близкие качественные и количественные результаты.

Созданный генератор вихревых колец является штатным оборудованием уникальной научной установки «Акустическая заглушенная камера с аэродинамическими источниками шума», регистрационный номер 500617.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

### **Публикации в изданиях перечня ВАК**

1. Копьев В.Ф., Зайцев М.Ю., Пальчиковский В.В., Храмцов И.В., Берсенев Ю.В. Экспериментальные исследования шума вихревого кольца в

заглушенной камере // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2016. – № 45. – С. 133-151.

2.\*\*\* Копьев В.Ф., Пальчиковский В.В., Беляев И.В., Берсенев Ю.В., Макашов С.Ю., Храмов И.В., Корин И.А., Сорокин Е.В., Кустов О.Ю. Создание заглушенной установки для аэроакустических экспериментов и исследование ее акустических характеристик // Акустический журнал. – 2017. – Т. 63, № 1. – С. 114-126.

3.\*\*\* Копьев В.Ф., Храмов И.В., Зайцев М.Ю., Черенкова Е.С., Кустов О.Ю., Пальчиковский В.В. Параметрическое исследование шума вихревых колец различного диаметра // Акустический журнал. – 2018. – Т. 64, № 4. – С. 499-507.

4.\*\*\* Храмов И.В., Кустов О.Ю., Федотов Е.С., Синер А.А. О численном моделировании механизмов гашения звука в ячейке звукопоглощающей конструкции // Акустический журнал. – 2018. – Т. 64, № 4. – С. 508-514.

5.\*\*\* Копьев В.Ф., Храмов И.В., Ершов В.В., Пальчиковский В.В. О возможности использования единичной временной реализации для исследования шума вихревых колец // Акустический журнал. – 2019. – Т. 65, № 1. С.48-57

#### **Публикации в журналах и сборниках научных конференций**

6. Храмов И.В., Писарев П.В., Пальчиковский В.В., Бульбович Р.В. Моделирование формирования и динамики вихревого кольца // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2014. – № 39. – С. 127-144.

7. Храмов И.В., Писарев П.В., Пальчиковский В.В. Выбор модели турбулентности для исследования газодинамических характеристик вихревого кольца // Прикладная математика и фундаментальная информатика. – 2015. – № 2. – С. 204-209.

8.\*\*\* Khramtsov I.V., Palchikovskiy V.V., Siner A.A., Bersenev Y.V. Investigation of vortex ring formation with account of generator piston motion // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 208, No. 012045.

9. Копьев В.Ф., Зайцев М.Ю., Храмов И.В., Черенкова Е.С., Пальчиковский В.В., Берсенев Ю.В. Параметрическое исследование шума вихревых колец различного диаметра // 5-я Открытая Всероссийская конференция по аэроакустике: сборник тезисов (г. Звенигород, 25-29 сентября 2017 г.). – М.: ЦАГИ, 2017. – С. 155.

10.\*\*\* Kopiev V.F., Khramtsov I.V. Parametric research of the vortex ring noise // AIP Conference Proceedings. – 2018. – Vol. 2027, No. 040038.

\* журнал включен в Web of Science

\*\* журнал включен в Scopus