

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ПЕРМСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Храмцов Игорь Валерьевич

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

Специальность 01.04.06 – Акустика

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
д-р физ.-мат. наук, профессор  
Копьев Виктор Феликсович

Пермь – 2019

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

ОГЛАВЛЕНИЕ	2
Введение	4
ГЛАВА 1. Современное состояние исследований аэроакустических характеристик вихревого кольца	14
1.1. Экспериментальные и теоретические исследования вихревых колец	14
1.2. Способы создания вихревых колец	24
1.3. Численные исследования вихревых колец	26
Выводы к главе 1	27
ГЛАВА 2. Исследование характеристик движения вихревого кольца	28
2.1. Разработка базы для проведения экспериментальных исследований	28
2.2. Методика проведения траекторных исследований движения вихревого кольца и результаты ее реализации	33
2.3. Анализ статистических данных траекторных исследований движения вихревых колец	38
Выводы по главе 3	42
ГЛАВА 3. Параметрическое исследование акустических характеристик вихревых колец	44
3.1. Определение спектральных характеристик вихревых колец	44
3.2. Анализ смещения характерной частоты излучения и амплитуды в шуме вихревого кольца	52
3.3. Исследование шума одиночного вихревого кольца	57
Выводы по главе 3	61
ГЛАВА 4. Расчетно-экспериментальное исследование частоты пика в шуме турбулентного вихревого кольца	63
4.1. Экспериментальное определение зависимости движения кольца от движения поршня	63

4.2. Численное моделирование формирования вихревого кольца	67
4.3. Сопоставление полученных экспериментальных и расчетных результатов с теорией о излучении вихревого кольца	72
Выводы по главе 4	81
ГЛАВА 5. Локализация и модальный анализ источников шума вихревого кольца с помощью микрофонных решеток	82
5.1. Исследование пространственной структуры звукового поля турбулентного вихревого кольца методом азимутальной декомпозиции	82
5.2. Адаптация метода многоканальных микрофонных антенн (бимформинг) для исследования локализации источников в вихревом кольце	90
Заключение	99
Список литературы	101

## ВВЕДЕНИЕ

**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.

Исследование шума турбулентных потоков направлено на создание нового фундаментального знания применительно к прикладной задаче снижения шума пассажирских самолетов, находящейся в самом центре конкурентной борьбы развитых авиапроизводящих стран за рынки сбыта высокоинтеллектуальной техники. На протяжении последних трех десятилетий основное направление исследований в прикладной аэроакустике было связано с эмпирическими и полуэмпирическими методами, поэтому основные достижения в решении сложных проблем, связанных с шумом авиационных двигателей и, в первую очередь, турбулентных струй, были получены исходя из этих подходов.

Одна из причин, по которой акустические характеристики современных самолетов легли в основу современной конкурентной борьбы

между авиапроизводящими гигантами, связана с исключительной сложностью самой проблемы, поскольку задача описания излучения звука турбулентными течениями является одной из сложнейших задач современной физики. Это связано, прежде всего, с недостаточным пониманием самих турбулентных течений, а также с тем, что акустическое излучение составляет всего  $\sim 0.01\%$  кинетической энергии турбулентного потока, что делает малоэффективным моделирование основных энергонесущих вихрей в потоке как источников звука, и сводит задачу к анализу тонких эффектов динамики их взаимодействия или малоэнергетичных пульсаций.

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.

Работа направлена на исследование аэроакустических свойств фундаментального объекта механики жидкости и газа – турбулентного вихревого кольца. Уникальность этого течения состоит в том, что оно (а) легко может быть создано на опыте для экспериментального исследования, (б) допускает теоретическое описание как стационарных, так и колебательных режимов в рамках основных уравнений механики сплошной среды, и (в) не подвержено влиянию внешних границ, что позволяет исследовать с его помощью многие проблемы динамики и акустики вихрей в чистом виде, включая процессы зарождения возмущений, переход к турбулентности в окрестности ядра, связь колебаний ядра со звуковым полем. Поэтому вихревое кольцо можно рассматривать как эталонный

объект, своего рода «атом водорода» аэроакустики, позволяющий изучать основные механизмы генерации звука турбулентными потоками.

**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.

**Задачи работы:**

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 РНФ «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.

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 соплами и результаты измерения траекторий вихревых колец полученных с помощью сопел диаметрами 30, 40 и 50 мм. Показано, что созданный генератор может создавать вихревые кольца, подходящие для дальнейших акустических исследований.

В третьей главе представлено параметрическое исследование шума вихревых колец, имеющих различные скорости и размеры. Приводится методика акустических измерений и обработки результатов. Шум колец соответствует характерным проявлениям шума данных объектов: наличие одного пика в спектре шириной порядка 300 Гц, смещение пика в область низких частот с течением времени и т.д. Представлен анализ изменения амплитуды и основной частоты в спектре вихревых колец.

В четвертой главе представлено расчетно-экспериментальное исследование частоты пика в шуме турбулентного вихревого кольца.

Приводится метод исследования размеров вихревого кольца на начальном участке на основе численного моделирования. Получены размеры вихревого кольца, которые в дальнейшем использовались в автотельных теориях для оценки свойств вихря на большом удалении от среза сопла. Приведены результаты сравнения теоретической частоты излучения вихревым кольцом с экспериментальными результатами.

В пятой главе описано применение микрофонных антенн для локализации и модального анализа шума вихревого кольца. Приводятся измерения и результаты обработки шума вихревого кольца методом азимутальной декомпозиции для разложения источников на отдельные составляющие. Представлена методика измерений и обработки шума вихревого кольца методом бимформинг.

Автор выражает глубокую благодарность:

– доктору физико-математических наук, профессору, начальнику НИО-9 МК ЦАГИ (г. Москва), научному руководителю лаборатории механизмов генерации шума и модального анализа ПНИПУ (г. Пермь) Копьеву В.Ф. за научное руководство диссертационной работой и организацию экспериментальных исследований;

– сотруднику НИО-9 МК ЦАГИ (г. Москва) Зайцеву М.Ю. за помощь в проведении экспериментальных исследований;

– доктору технических наук, профессору кафедры РКТиЭС ПНИПУ (г. Пермь) Бульбовичу Р.В. за консультации и ценные предложения;

– ведущему конструктору КО-293 АО «ОДК-Авиадвигатель» (г. Пермь) Берсенева Ю.В. за консультации и ценные предложения, а также за помощь в проведении экспериментальных исследований;

– заместителю начальника Отдела внешних характеристик АО «ОДК-Авиадвигатель» (г. Пермь) Синеру А.А. за консультации и ценные предложения, а также за помощь в постановке расчетных исследований;

– сотрудникам Лаборатории механизмов генерации шума и модального анализа ПНИПУ Пальчиковскому В.В., Кустову О.Ю, Ершову В.В., Черенковой Е.С. за помощь в создании экспериментальных установок и в подготовке к проведению экспериментальных исследований.

## ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ АЭРОАКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИХРЕВОГО КОЛЬЦА

Для начала исследования свойств вихревых колец требуется провести широкий комплекс подготовительных работ. Он включает в себя сбор и анализ информации о предшествующих теоретических и экспериментальных исследованиях вихревых колец, о способах создания данных вихрей и, с учетом развития компьютерной техники, о способах и подходах численного моделирования данных вихрей.

### 1.1. Экспериментальные и теоретические исследования вихревых колец

Вихревое кольцо представляет собой тороидальный объем завихренной жидкости, который движется в окружающей среде перпендикулярно плоскости кольца. Движение жидкости осесимметрично, вектор завихренности (ротор скорости) в торе направлен вдоль окружностей, соосных круговой оси тора. Поперечное сечение тонких вихревых колец по форме близко к кругу. Вместе с тороидальным вихревым кольцом движется некоторый объем жидкости, охватывающий кольцо и имеющий форму, близкую к форме сплюснутого в направлении движения кольца эллипсоида вращения (рис. 1). Этот замкнутый объем жидкости называется атмосферой вихря [1].

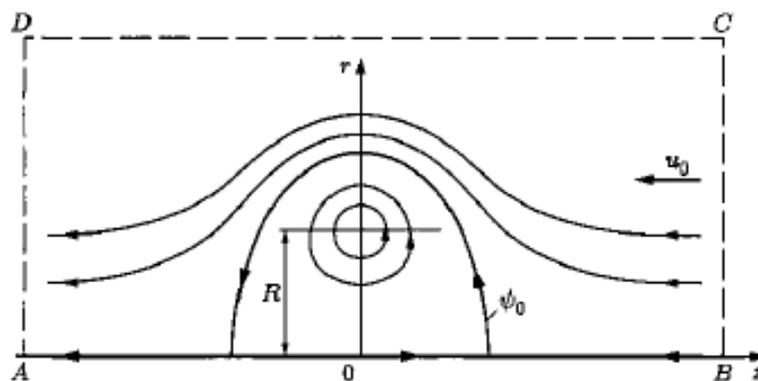


Рис. 1. Картина линий тока вихревого кольца [1] ( $\psi_0$  – линия тока, ограничивающая атмосферу вихря; ABCD – контур интегрирования для определения циркуляции вихревого кольца)

Вихревое кольцо является хорошо известным и очень популярным объектом динамики жидкости. Его исследования ведутся с прошлого века, когда кольцевой вихрь рассматривался в качестве модели в развивающейся вихревой теории атомов [2, 3]. И хотя квантовая теория свела на нет многие идеи, развиваемые в тот период, вихревое кольцо осталось, пожалуй, одним из самых интересных и удобных для исследования объектов в гидродинамике. Действительно, этот вихрь доступен для экспериментального исследования, в то же время его поведение удается описывать в рамках основных уравнений сплошной среды. Что особенно важно, будучи созданным, этот вихрь развивается только под действием своей динамики, не испытывая влияния твердых границ. Это позволяет исследовать с его помощью многие вопросы газовой динамики в чистом виде.

Одной из особенностей наблюдаемых вихревых колец является их свойство почти стационарно двигаться в однородной среде в течение длительного времени. Проблема описания такого движения давно привлекала внимание многих теоретиков. Работа Кельвина [2] занимает наиболее выдающееся историческое положение: в 1867 г. в замечании к переводу Тейта статьи Гельмгольца [4] он представил без доказательств верный результат для скорости  $V$  движения вихревого кольца с однородной завихренностью внутри вихревого ядра:

$$V = \frac{\Gamma}{4\pi R} \left[ \ln \frac{8R}{a} - \frac{1}{4} \right],$$

где  $\Gamma$  – циркуляция скорости во внешнем потоке около кольца;  $R$ ,  $a$  – большой и малый радиусы тора. Применительно к тонкому однородному кольцу результат Кельвина позднее подтвердил Хикс [5], который также вывел формулу скорости движения полого вихревого кольца.

В 1970 г. три исследователя независимо получили решения для скорости распространения вихревого кольца малого поперечного сечения с произвольным распределением завихренности внутри вихревого ядра:

Сэффмен [6], который для нахождения решения использовал теоремы об энергии и импульсе вихря, Френкель [7], который нашел для незакрученного вихревого кольца асимптотическое решение, используя интегральное выражение для функции тока, и Блисс [8], который получил решение методом сращивания асимптотических разложений. В частности, Сэффменом была получена следующая формула для скорости вихревого кольца:

$$V = \frac{\Gamma}{4\pi R} \left[ \ln \frac{8R}{a} - \frac{1}{2} + 2\pi^2 \frac{\overline{a^2 v_{\sigma}^2}}{\Gamma^2} - 4\pi^2 \frac{a^2 v_g^2}{\Gamma^2} \right].$$

Черта сверху обозначает усреднение по сечению ядра вихревой нити;  $v_{\sigma}$ ,  $v_g$  – полоидальная скорость и скорость закрутки. Видно, что закрутка замедляет движение кольца, и, в принципе, при достаточно больших ее значениях движение может изменить направление движения.

Вместе с тем к началу 70-х годов стало совершенно ясно, что идеальная модель даже при учете вязкости не учитывает принципиальные моменты в эволюции вихревого кольца. Многочисленные экспериментальные исследования [9-14] показали, что существуют два качественно различных режима течения – ламинарный и турбулентный (рис. 2). Характер режима определяет критическое число Рейнольдса  $Re_0$ , построенное по начальному радиусу и скорости вихревого кольца, и равное около  $10^3$ . При малых числах Рейнольдса образуется вихрь, с характерной и четко просматриваемой спиральной структурой [15, 16]. При числах  $Re$ , превышающих  $Re_0$ , характер течения принципиально меняется – течение становится турбулентным. Главные особенности такого течения состоят в том, что структура потока оказывается близкой к универсальной и не зависит от особенностей формирования вихря. При этом течение разделяется на две области – ламинарное ядро, где сосредоточена завихренность, и область атмосферы, где частицы жидкости совершают хаотическое движение. Что особенно важно и интересно, граница между турбулентной и ламинарной зоной остается резкой, несмотря на то, что кольцо успевает пройти большие расстояния [17-19].

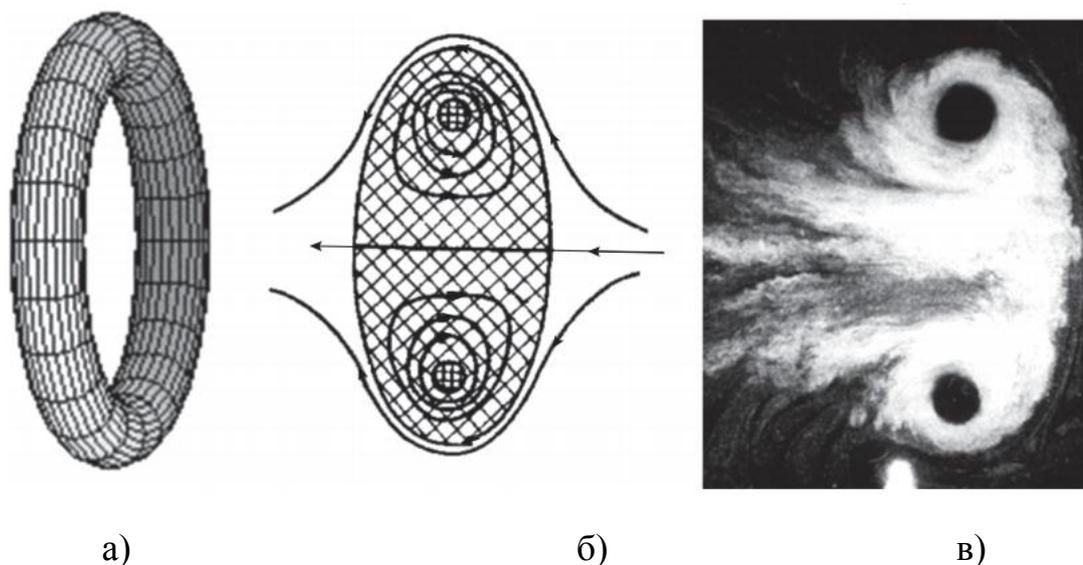


Рис. 2. Идеальная модель вихревого кольца (а, б), турбулентное вихревое кольцо (в)

Обнаруженные в эксперименте особенности турбулентного режима течения позволили сформулировать полуэмпирическую автомодельную теорию [10, 20-22], описывающую эволюцию средних параметров (радиуса, скорости, завихренности и т.д.) в предположении, что распределение завихренности в ядре близко к константе.

Например, в работе [20] представлен следующий закон движения вихревого кольца:

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

где  $R_0$ ,  $V_0$  – начальный радиус и скорость вихревого кольца соответственно;  $\alpha$  – коэффициент учитывающий скорость расширения вихревого кольца. Проведенные исследования показывают хорошее совпадение расчетных величин и измеренных в эксперименте. Отклонение при больших  $t$  объясняется тем, что турбулентная вязкость со временем уменьшается и с некоторого момента становится сравнима с кинематической, после чего пренебрежение кинематической вязкостью становится неправомерным.

После того как кинематическая вязкость становится существенной, вихрь останавливается.

Проведенные измерения поступательной скорости и геометрических параметров кольца подтвердили автомодельный характер развития вихря. Вместе с тем прямых надежных измерений завихренности в ядре вихря практически не проводилось.

Отметим работы [23, 24], данные которых носят предварительный характер. В работе [24] исследовались поле скоростей и гидродинамическая структура реального воздушного вихревого кольца, образующегося при истечении затопленной струи конечной длины из круглого сопла. Осесимметричное поле скоростей ламинарного вихревого кольца измерялось с помощью двух термоанемометрических датчиков, установленных на пути вихря на некотором расстоянии от выходного сечения сопла, где процесс формирования вихря можно считать закончившимся. Поступательная скорость вихревого кольца определена путем фоторегистрации движения вихря в зависимости от времени. При этом вихревое кольцо визуализировалось дымом, подаваемым в сопло генератора вихрей. В результате экспериментов получены геометрические и кинематические характеристики вихревого кольца, найдена структура линий тока и распределения завихренности. Аналогичные результаты получены в [25-26].

В работах [13, 22] представлены зависимости характеристик формирования вихревых колец от параметров, определяющих условия их формирования. Однако в них основное внимание уделяется оценке только легко определяемых характеристик вихревого кольца – радиуса кольца и его поступательной скорости.

В работах [27-29] изложены результаты экспериментальных исследований свойств вихревых колец в зависимости от параметров струи воздуха, выталкиваемой из круглого сопла специальным устройством. Рассматривалось влияние как характерных параметров: радиус сопла, длина цилиндрического участка сопла, скорость струи; время истечения струи, так

и некоторых специфических: угол конусности внешней поверхности сопла, плотности и вязкости среды. Характеристики вихревого кольца определялись по полю скоростей измеренному с помощью термоанемометрических датчиков на некотором расстоянии от среза сопла, где процесс образования можно считать закончившимся. Предложена математическая модель формирования вихревого кольца, основанная на законах сохранения вихревого импульса и циркуляции. По данной модели получены формулы для определения радиуса и циркуляции вихревого кольца в зависимости от условий его образования.

В работах [30, 31] проведено исследование переноса «пассивной» примеси вихревым кольцом при моделировании в воздухе и воде. Сделана попытка объяснить различие в потерях при динамике вихревого кольца подавлением турбулентных пульсаций скорости в ядрах вихрей. Замечена особенность переноса примеси в области переходного режима – перестройка внутреннего течения в ядре вихревого кольца, переводящая его из квазиламинарного («толстого») в более компактное квазитурбулентное и сопровождающаяся интенсификацией потерь на этом этапе.

Более подробную информацию о структуре завихренности в ядре могут дать измерения с помощью техники PIV (Particle Image Velocimetry – измерение скорости частиц по их изображениям). Большая часть работ, относящаяся к PIV измерениям вихревых колец, относится к малоскоростным вихрям [32-37]. Стоит отметить работы [38, 39], где рассматриваются сверхзвуковые вихревые кольца. Турбулентные вихревые кольца с высокой начальной скоростью рассматриваются в работе [40].

Ограниченность экспериментальных данных о структуре средней завихренности в ядре, а тем более по нестационарным процессам в вихре, с одной стороны, сопровождается ограниченностью теоретических исследований вопроса устойчивости вихревого кольца – с другой стороны.

Долгое время было принято считать, по-видимому, отталкиваясь от работы Кельвина [41] по устойчивости вихревого столба (вихря Ранкина),

что большинство мод, соответствующих деформациям сечения вихревого кольца, являются устойчивыми. В литературе рассматривалась неустойчивость только одной изгибной моды [25, 42-44], применяемые при этом методы используют дополнительные упрощающие предположения [45], а сравнение с экспериментом носит качественный характер.

Сложившаяся в настоящее время концепция о структуре турбулентности вихревого кольца основана на представлении об «упругости» закрученных потоков, качественных представлениях о подавлении турбулентности в ядрах локализованных вихрей [46-47] и аналогии между эффектами стратификации и вращения. Понятно, что для существенного продвижения в понимании реализующегося режима турбулентного течения требуются не только качественные рассуждения, но и динамическое описание колебательных режимов, механизмов неустойчивости, делающих возможной подкачку энергии в отдельные моды. А также, конечно, развитие методов диагностики тонких и сложных процессов в ядре вихревого кольца, по возможности основанных на бесконтактных методиках, поскольку речь идет об очень чувствительных к любым возмущениям процессах. Поэтому можно с уверенностью сказать, что описание турбулентного вихревого кольца относится к интенсивной и важной проблеме турбулентности и изучение его потребует еще значительных усилий.

В работе [48] было впервые проведено экспериментальное исследование по регистрации шума, создаваемого турбулентным вихревым кольцом. Было показано, что отдельное вихревое кольцо действительно излучает звук, а звуковое поле кольца сосредоточено в узкой полосе частот. В работе [49] в рамках уравнений Эйлера была построена динамическая модель излучения звука вихревым кольцом, объясняющая основные экспериментальные характеристики звукового излучения: наличие единственного пика в спектре излучения, значение максимума и ширину пика, природу случайной структуры сигнала. Основные особенности излучения удастся понять из рассмотрения собственных колебаний

вихревого кольца. Эти колебания характеризуются тремя целыми числами  $(l, n, j)$ , называемыми соответственно: частотным (все частоты лежат вблизи точек сгущения  $\omega = \frac{\Omega_0 l}{2}$ ,  $\Omega_0$  – значение завихренности в ядре); азимутальным (колебания с зависимостью от азимутального угла вида  $\exp(in\theta)$ ); радиальным (ответственным за неоднородную пространственную структуру колебаний в сечении). Спектр колебаний вихревого кольца представлен на рисунке 3. Теория предсказывает, что излучение звука порождается только тремя семействами его собственных колебаний вида  $\exp(in\theta)$ ,  $n = 0, 1$  и  $2$  (рис. 3). Показано, что все собственные частоты излучающих мод лежат вблизи общей точки сгущения  $\omega = \frac{\Omega_0}{2}$ . Эти частоты определяются одинаковым частотным числом  $l=1$ , соответствующим значению частоты точки сгущения излучающих мод. Несмотря на близость частот всех излучающих мод, направленность излучения для каждого семейства колебаний различна, как в азимутальном, так и в продольном направлении [53]. На рисунке 4 представлены формы колебаний излучающих мод.

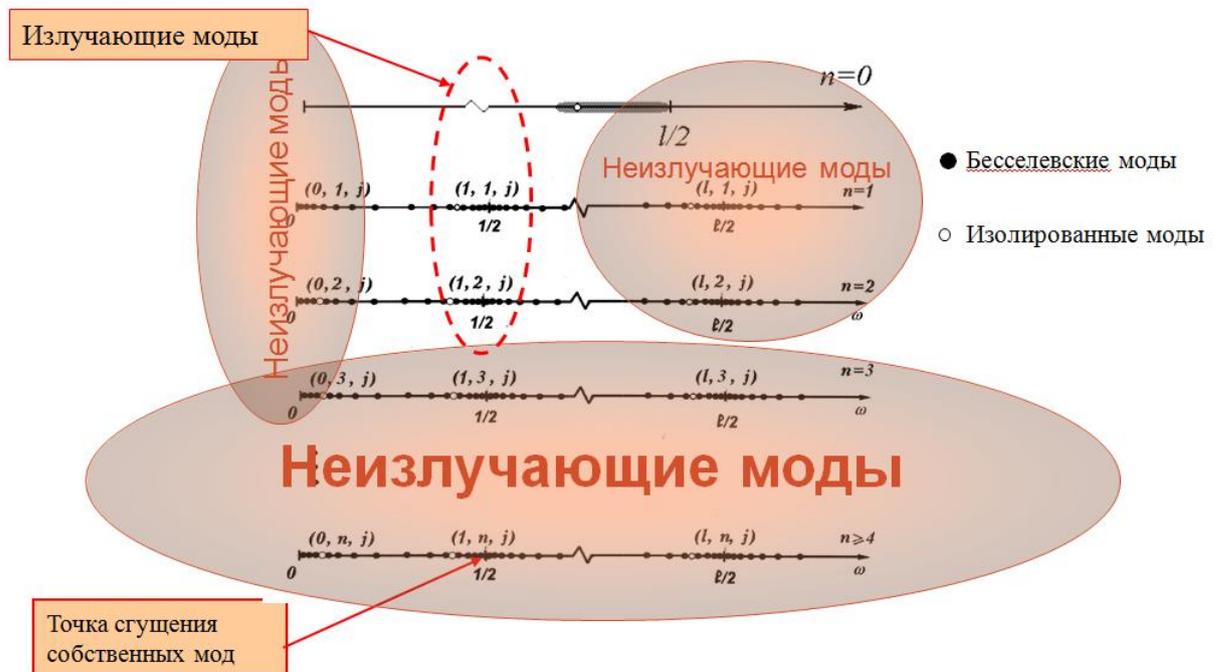


Рис. 3. Спектр трехмерных колебаний вихревого кольца

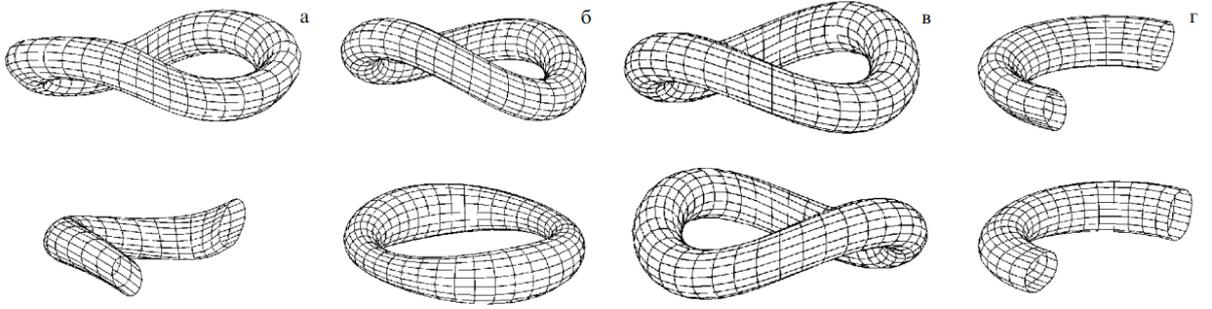


Рис. 4. Форма возмущений границы вихревого ядра [45]: бesselевские моды  $l=1, n=2, j \geq 1$  (а); бочкообразные моды (две фазы колебаний)  $l=0, n=2, j \geq 1$  (б); изгибная мода  $l=0, n=2, j=0$  (две фазы колебаний) (в); изолированная мода  $l=1, n=1, j=0$  (г) в сравнении с осесимметричной

Акустические измерения, проведенные на участке траектории, и измерение основных параметров вихревого кольца позволили сопоставить характерную частоту излучения со средними газодинамическими свойствами вихря [49-51]. Для исследуемых тонких вихревых колец ( $\mu = R/a \approx 0,12$ ) согласно [50] звукообразующими пульсациями являются колебания ядра с частотами, лежащими вблизи значения:

$$\omega_n = \Omega_0 \left( \frac{1}{2} \pm \frac{\mu \cdot n}{a_j} \right), \quad J_1(a_j) = 0, \quad j = 1, 2, 3, \dots, \quad (1)$$

где  $n = 0, 1, 2$  – три азимутальных волновых числа излучающих мод (осесимметричному излучению соответствует  $n=0$ );  $\Omega_0$  – значение средней завихренности в ядре;  $a_j$  – нули функции Бесселя  $J_1(z)$ . Излучающие колебания в соответствии с (1) для всех  $n$  расположены справа и слева от точки сгущения  $\Omega_0/2$  и занимают область  $\sim \mu$ , сгущаясь к центральному значению  $\Omega_0/2$  при увеличении  $j$ .

Если выразить собственную частоту таких колебаний  $\Omega_0/2$  через измеряемые в эксперименте величины  $V$  – скорость движения кольца,  $R$  – радиус кольца и безразмерный размер ядра вихря  $\mu=R/a$ , где  $a$  – радиус ядра вихревого кольца, то используя известное выражение для скорости кольца (2) [52]

$$V = \frac{\Omega_0 \alpha \mu}{4} \left( \ln \frac{8}{\mu} - \frac{1}{4} \right) \quad (2)$$

выражение (1) приходит к виду (3) [50]:

$$\omega_m = \frac{2}{\mu^2 c(\mu)} \frac{V}{R}, \quad (3)$$

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

В работах [53, 54] на основе метода азимутальной декомпозиции показано, что шум вихревого кольца состоит из 5 квадрупольей, каждый из которых излучает независимо от других.

Результаты акустического эксперимента показывают, что несмотря на то, что во всей атмосфере кольца происходит турбулентное движение частиц жидкости 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 [45].

## 1.2. Способы создания вихревых колец

Основная проблема экспериментального исследования вихревых колец как объекта аэроакустики заключается в достоверном определении шума, создаваемого самим вихревым кольцом на фоне помех, шума сопутствующих процессов, внешнего шума и т.д. В связи с этим возникают два основных требования к установкам генерации вихревых колец:

- установка должна иметь достаточно низкий уровень собственного структурного шума, для выделения полезного сигнала на фоне помех;

- турбулентные вихревые кольца должны быть достаточно интенсивными для того, чтобы излучаемый ими звук мог быть зарегистрирован.

До некоторой степени эти два требования являются взаимоисключающими, поэтому успех эксперимента во многом зависит от того, насколько данное противоречие может быть устранено.

Для создания интенсивных вихревых колец существует несколько возможностей. Наиболее интенсивные и хорошо различимые на слух кольца можно создать с помощью взрыва на полигоне. Такой способ применяется, например, в метеорологии для определения скорости ветра вблизи земли. Однако для проведения тонких физических экспериментов данный способ не подходит [51]. Также существует способ, основанный на использовании ударных труб с открытым кольцом [55, 38]. В этом случае контактная поверхность, образующаяся в момент разрыва диафрагмы, играет роль поршня, выталкивая из трубы порцию газа, заключенную между этой поверхностью и движущейся с большой скоростью ударной волной. Основным недостатком данного способа является плохая повторяемость экспериментов в связи с высокой чувствительностью вихревых колец к параметрам запуска. Одним из способов получения вихревых колец является использование установок, в которых воздух из области внутри генератора выталкивается струей, выходящей из ресивера с большим давлением. Данный способ использовался для изучения формирования вихревых колец в

работе [24, 27-28]. Полученные вихревые кольца обладают устойчивой структурой, тонким ядром и возможно получение вихревых колец с высокой начальной скоростью. Однако данные генераторы не подходят для проведения акустических экспериментов в связи с повышенным уровнем собственного структурного шума, образующегося вследствие турбулентных течений внутри самого генератора.

В работах [56-58] представлен способ создания вихревых колец с помощью поршневого генератора, поршень которого выталкивается с помощью сжатого воздуха. Проведенные эксперименты подтверждают хорошее качество создаваемых колец, однако, вихри создавались в воде. При этом система привода поршня является достаточно сложной из-за большого количества клапанов и диафрагмы, что, вероятнее всего, приведет к повышенному уровню структурного шума.

В работах [11-13, 33] представлены поршневые генераторы с механическим приводом, однако, скорость движения поршня при этом достаточно низкие, чтобы была возможность создавать вихревые кольца, которые можно услышать в эксперименте.

В лабораторных условиях для акустических экспериментов наиболее удобно использовать поршневые генераторы, в которых перемещение поршня осуществляется с помощью ударного механизма [48, 50-51]. Создаваемые таким способом вихревые кольца имеют достаточно тонкое ядро и большое число Рейнольдса, что сближает их с известными теоретическими моделями. Кроме того, поршневые генераторы обеспечивают хорошую повторяемость параметров вихрей от запуска к запуску. Однако ударный привод данной установки является источником собственного структурного шума, который в дальнейшем приходится снижать за счет использования резинок и прокладок в местах соударений.

### 1.3. Численные исследования вихревых колец

Широкое развитие компьютерной техники в настоящее время привело к возможности расчета шума турбулентных течений. В результате вычислительная аэроакустика выделилась в отдельное активно развивающееся направление. Наиболее распространенным является расчет шума струйных течений [59-66], обтекания тел [67-71], шум вентилятора [72-76], течения в ячейках звукопоглощающих конструкций [77-81] и т.д.

Применение численного моделирования для расчета аэроакустических задач имеет ряд существенных проблем: необходимость моделирования нестационарного движения среды; малый размер элементов расчетной сетки; повышенная точность численных алгоритмов и т.д.

Обзор по численному моделированию вихревого кольца приведен в работах [82-83]. Большинство работ, касающихся численного моделирования нестационарных процессов, протекающих в вихревом кольце, связаны с более или менее точным моделированием различных типов неустойчивости безотносительно к излучаемому кольцом звуковому полю [84-85, 38], т.к. моделируется главным образом крупномасштабная динамика кольца. В работах другого типа решаются задачи об образовании кольца или взаимодействии его с преградами [82, 86-87], т.е. опять же моделируется нестационарность макропараметров.

В работах [88-90] на основе уравнений Навье-Стокса с использованием разложения искомых функций в ряд по степеням малого параметра, характеризующего начальную завихренность, определена частота излучения цилиндрического вихря, вихревого кольца и ансамбля вихревых колец в случае малой начальной завихренности.

Полное моделирование собственных колебаний турбулентного вихревого кольца и излучение шума данным вихрем находится на пределе мощности современных суперкомпьютеров [91] и представляет серьезную вычислительную задачу, которая должна решаться путем последовательного рассмотрения иерархически выстроенных модельных задач.

Одной из таких задач может являться исследование формирования и движения турбулентного вихревого кольца с высокой начальной скоростью, соответствующей скорости при проведении аэроакустических экспериментов. В большинстве работ, связанных с данной задачей, рассматриваются малоинтенсивные вихревые кольца с низким числом Рейнольдса [93-97]. Стоит, однако, выделить работу [38] в которой представлены результаты численного моделирования в осесимметричной постановке для сверхзвукового вихревого кольца. При этом совпадение с экспериментом траектории и размеров на начальном участке движения вихревого кольца достигается даже в осесимметричной постановке [38, 88, 96-97], что позволяет существенно снизить расчетные ресурсы.

### **Выводы к главе 1**

1. Турбулентное вихревое кольцо излучает шум, который имеет узкополосный характер. При этом частота излучения со временем смещается в область низких частот, что связано с изменением средних параметров вихря (поступательной скорости, геометрических размеров, завихренности в ядре).

2. Основным механизмом генерации шума в вихревом кольце являются малые колебания тонкого ядра вихря.

3. Для экспериментального исследования подходят только турбулентные вихревые кольца с высокой начальной скоростью. При этом способ создания вихревых колец должен быть сравнительно тихим. Этого можно достичь, используя поршневые генераторы с ударным приводом, установленные в заглушенной камере.

4. Прямое численное исследование излучения звука вихревым кольцом на настоящем этапе развития вычислительной техники практически невозможно. Однако в качестве модельной предложена задача о формировании и движении на начальном участке вихревого кольца.

## ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИЖЕНИЯ ВИХРЕВОГО КОЛЬЦА

Вихревые кольца, подходящие для исследования, должны обладать характеристиками, рассмотренными в Главе 1. В первой части текущей главы описано создание экспериментальной установки для генерации вихревых колец разных размеров и скоростей. Далее представлены исследования движения турбулентных вихревых колец с различными размерами и скоростями.

### 2.1. Разработка базы для проведения экспериментальных исследований

При экспериментальном исследовании шума вихревого кольца важнейшим требованием является выделение собственно шума вихревого кольца на фоне шума помех, таких как структурный шум установки генерации вихрей, отражение звука от твердых поверхностей и т.д. Для этого вихревое кольцо должно быть достаточно интенсивным, чтобы излучаемый им звук можно было различить на фоне помех, а способ его создания должен быть, наоборот, более тихим. Для этого в ПНИПУ был спроектирован и создан поршневой генератор вихревых колец [98, 99], представленный на рисунке 5. 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.

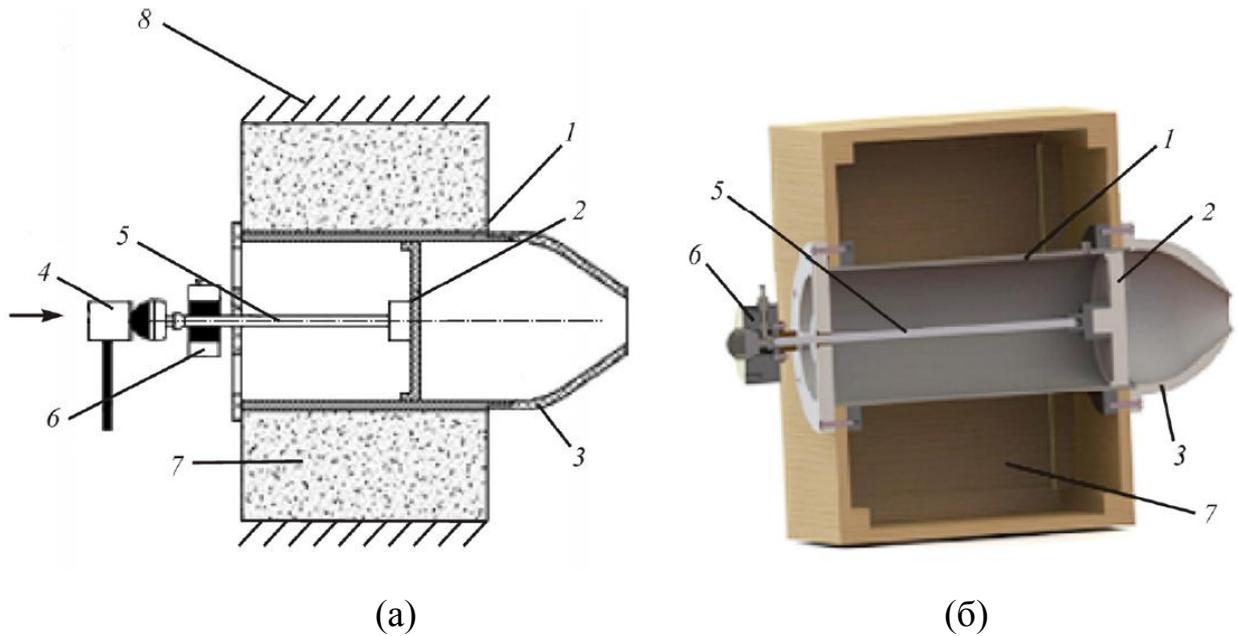


Рис. 5. Генератор вихревых колец: (а) схема; (б) 3D-модель; 1 – корпус; 2 – поршень; 3 – сопло; 4 – молот; 5 – шток; 6 – замок-ловушка штока; 7 – контейнер с звукопоглощающим материалом; 8 – стена

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.

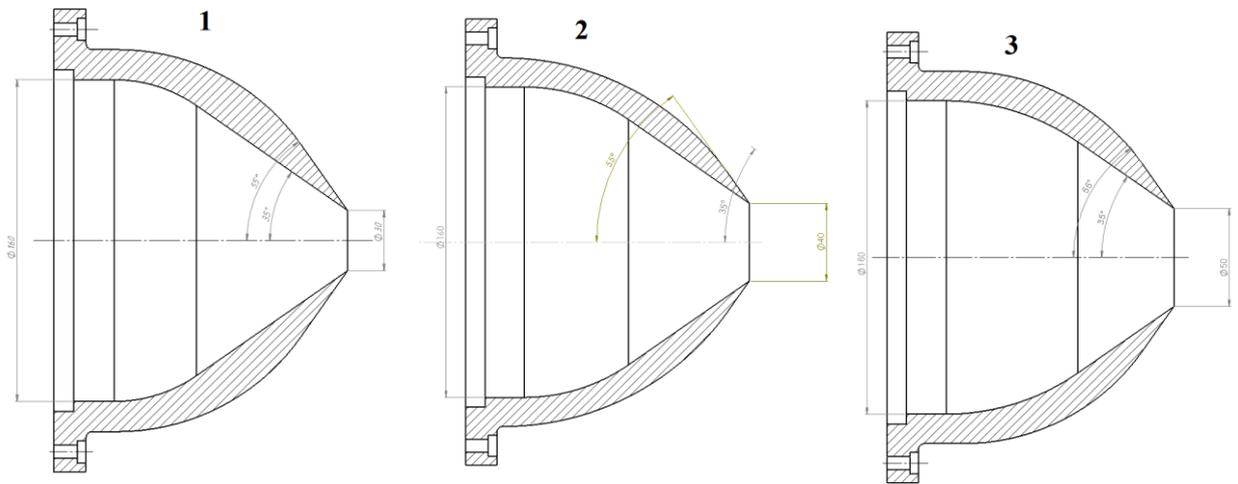
Для снижения структурного шума запуска движения и остановки поршня использовались различные способы. В первую очередь стоит отметить то, что генератор вихревых колец располагался в фанерном кожухе 7, смонтированном в стену 8, при этом система запуска движения и остановки поршня находится в одном помещении, а образующееся вихревое кольцо – в другом. Для снижения вибраций и шума установки генератор крепился в фанерном кожухе на четыре виброопоры, оставшееся свободное пространство заполнялось специальным звукопоглощающим материалом

типа «Изовер». На рисунке 6 представлена фотография генератора вихревых колец во время сборки. Снаружи стенки кожуха облицовывались аналогичным материалом типа «Саунтек». Также стоит отметить, что все места соударений (молот/шток, шток/ловушка штока и т.д.) оснащались резиновыми втулками или прокладками.

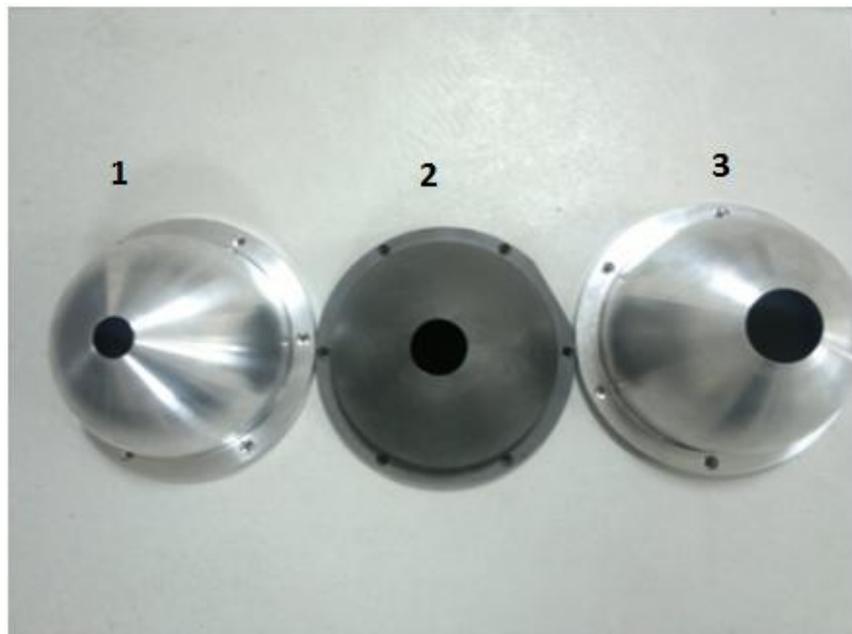


Рис. 6. Сборка генератора вихревых колец: 1 – виброопоры; 2 – полый цилиндр; 3 – звукопоглощающий материал; 4 – фанерный кожух

Для проведения параметрических исследований вихревых колец были специально разработаны и созданы сопла диаметрами 30, 40 и 50 мм. Геометрия сопел основывалась на следующих требованиях: профилированная внутренняя и внешняя поверхность без резких переходов; наличие острой кромки на срезе сопла; одинаковый угол в области кромки для внутренней и внешней поверхности. В связи с использованием сложного профиля внутри и снаружи изготовление сопел производилось на станке с числовым программным управлением. Схема разработанных сопел и их фотографии после изготовления представлены на рисунке 7.



(a)



(б)

Рис. 7. Схема (а) и фотографии изготовленных сопел (б): 1 – сопло диаметром 30 мм; 2 – сопло диаметром 40 мм; 3 – сопло диаметром 50 мм

Шум вихревых колец удастся 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. На рисунке 8 представлен общий вид камеры с выделенным помещением для генератора вихревых колец. Камера была аттестована для измерений в диапазоне частот 150-20000 Гц [100-102].

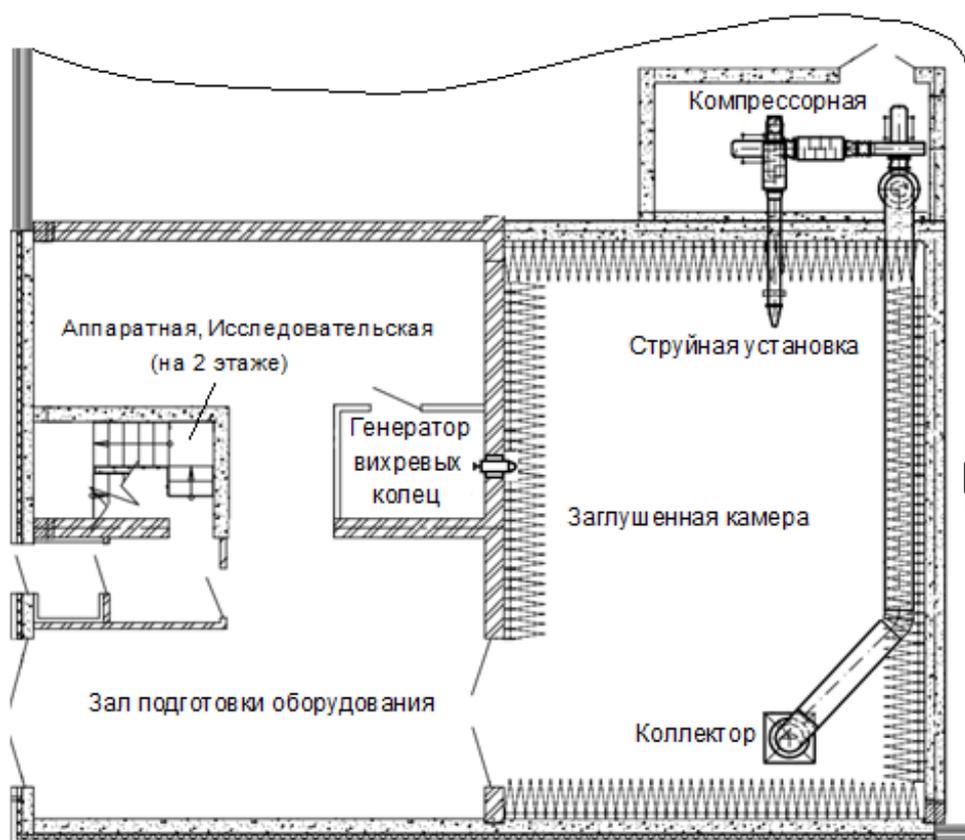


Рис. 8. Общий вид созданной заглушенной камеры

## **2.2. Методика проведения траекторных исследований движения вихревого кольца и результаты ее реализации**

Для анализа движения вихревого кольца была разработана многоканальная измерительная система, состоящая из 13 микрофонов Bruel & Kjaer тип 4944 (4-70000 Гц) и блоков сбора данных LAN XI фирмы «Bruel & Kjaer». 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. Положение микрофонов можно увидеть на схеме эксперимента, представленной на рисунке 9. Данная система включала в себя следующие элементы:

**27 микрофон** – триггерный микрофон Bruel & Kjaer тип 4944. Данный микрофон использовался для запуска измерительной системы в момент выхода кольца из генератора. Он располагался в 30 мм от среза сопла вдоль траектории и на расстоянии 150 мм от оси.

**13-24 микрофоны** – микрофоны, используемые непосредственно для регистрации времени пролета кольца, Bruel & Kjaer тип 4958. Особо следует остановиться на 13-14 микрофонах, служащих для определения начальной скорости кольца и двух парах микрофонов 19-20 и 21-22 для определения скорости кольца в момент пролета решетки. Данные микрофоны расположены относительно близко друг к другу; с их помощью по разнице времени пролета между данными микрофонами можно будет определять скорость движения кольца в данных точках. Также стоит отметить микрофон 24, расположенный непосредственно в плоскости экрана. Данный микрофон регистрирует момент пролета кольца через экран с шелковинками и момент разрушения кольца. Схема эксперимента представлена на рисунке 9.

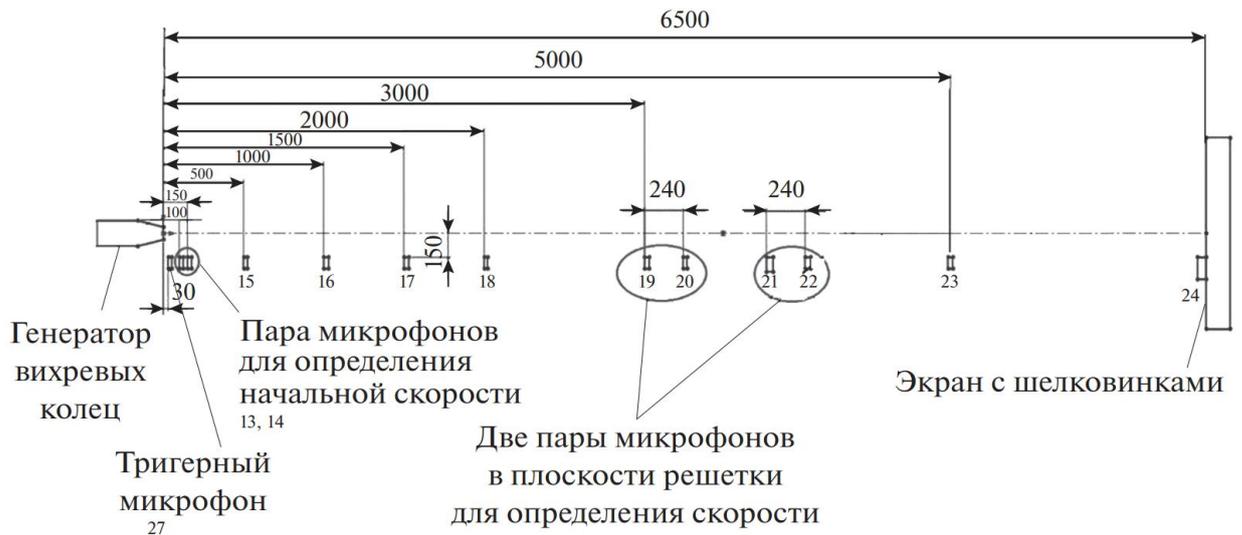


Рис. 9. Схема эксперимента по траекторным исследованиям

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.

Результаты разбраковки представлены в таблице 1. В нее занесены следующие параметры:

**Название сопла** - соответствует диаметру среза соответствующего сопла.

**Число запусков** - соответствует суммарному числу запусков кольца для соответствующего сопла.

**Достигло экрана** - производилась оценка, сколько из запущенных колец вообще достигло экрана.

**Отклонение <25 см** - производилась оценка, сколько из достигших экрана колец "попало" в область, соответствующую кругу с радиусом на 20 см больше мишени, закрепленной по центру экрана (радиус мишени 10 см).

**Центр** - производилась оценка, сколько из достигших экрана колец "попало" в область внутри мишени радиусом 10 см, закрепленной по центру экрана.

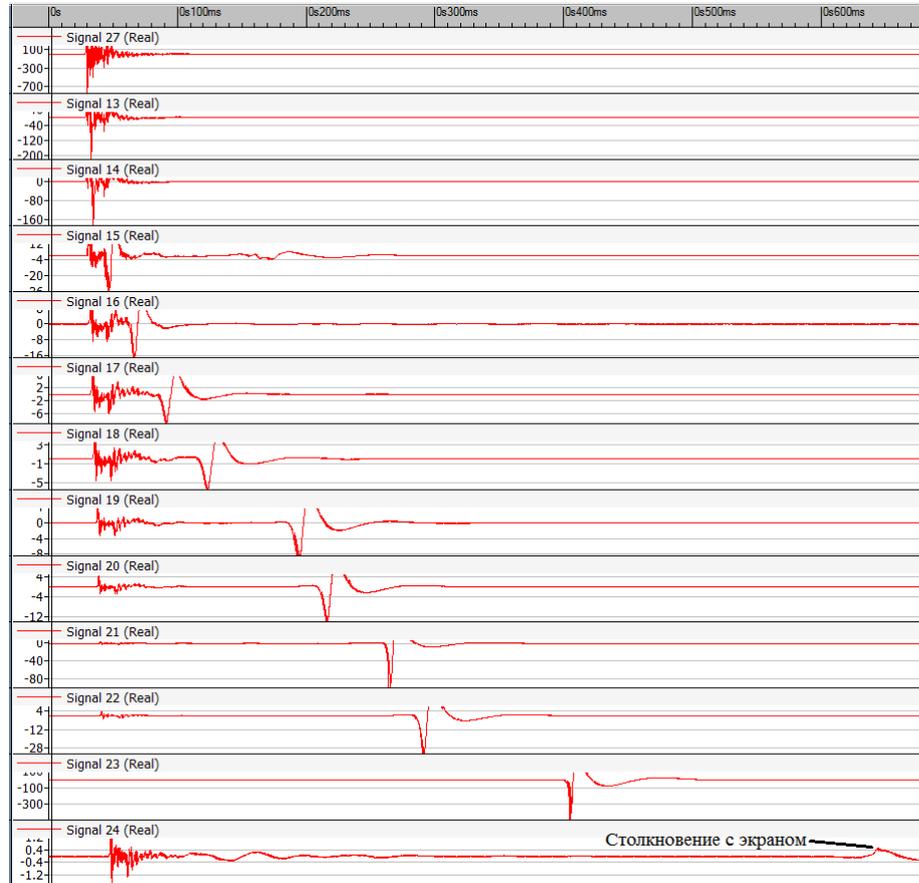
Таблица 1. Результаты предварительной разбраковки.

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

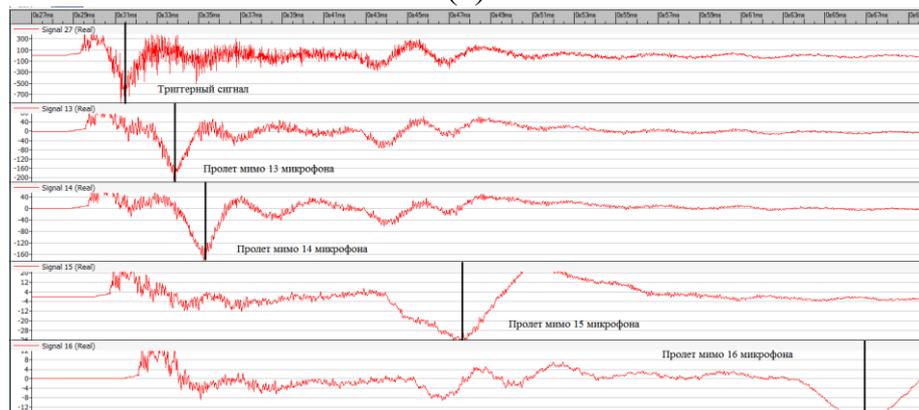
Как можно увидеть в таблице 1, вихревые кольца, образованные с помощью сопла с диаметром среза 50 мм являются наиболее стабильными и имеют наибольший процент удачных запусков. С уменьшением диаметра сопла происходит увеличение разброса характеристик и отклонений траектории колец от идеальной.

Дальнейшая обработка результатов эксперимента велась в программе Pulse LabShop. Для этого для каждого запуска вихревого кольца в окне программы открывались временные зависимости с каждого из 13 микрофонов. Время пролета кольца мимо  $i$ -го микрофона  $t_i$  определялось на дисплее компьютера путем установки курсора в положение, соответствующее минимуму сигнала (рис. 10 (б)). В случае, когда точно не удавалось определить минимум сигнала (такое происходило при пролете кольца на расстоянии  $>150$  мм), определялось примерное время пролета по максимуму сигнала. Точность определения времени пролета составляет около 0,2 мс, что связано с невозможностью точно определить минимум сигнала из-за малых колебаний давления (рис. 10(б)). На рисунке 10 представлены временные реализации для 13 микрофонов, установленных вдоль траектории. Стоит отметить, что при пролете кольца на расстоянии  $>250$  мм от микрофона выделить время пролета кольца не удавалось и данные реализации также удалялись из дальнейшего анализа. Из-за особенностей работы триггера временные реализации включают дополнительное время пре-записи, при обработке участок времени до первого минимума на 27 микрофоне удалялся из всех реализаций.

Как можно заметить на всех микрофонах, установленных вдоль траектории, виден четкий след от пролета кольца (рис.10.). На основании этого, можно сказать что разработанная методика подходит для траекторных исследований движения вихревых колец.



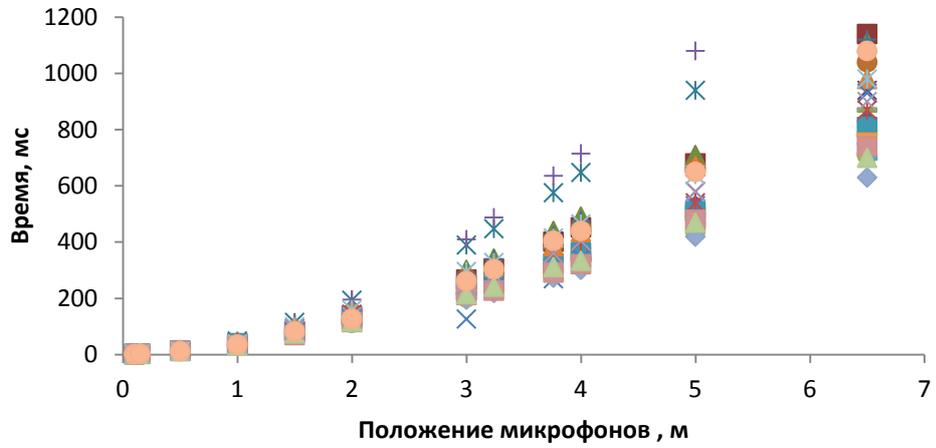
(a)



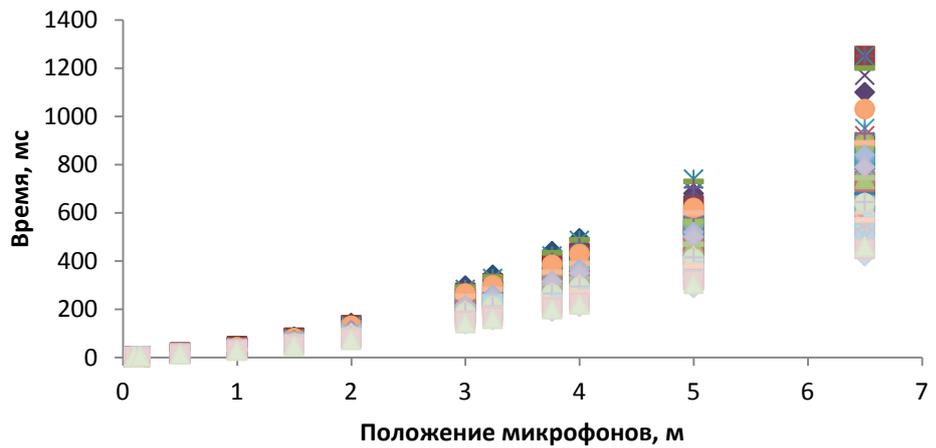
(б)

Рис. 10. Временная зависимость сигнала для траекторных микрофонов: (а) – для всех микрофонов; (б) – увеличенный вид для первых 5-ти микрофонов.

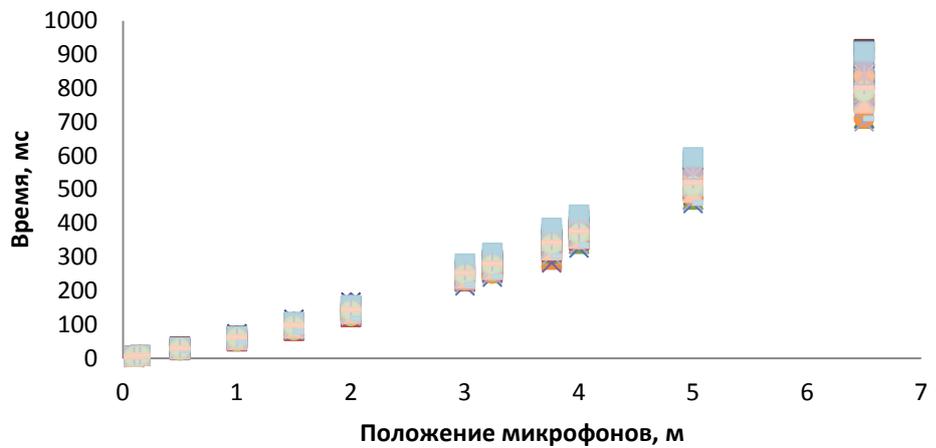
По полученным данным о времени пролета кольца мимо микрофонов и положению микрофонов были построены зависимости движения вихревого кольца (рис. 11).



(а)



(б)



(в)

Рис. 11. Траектории движения вихревых колец: вихревые кольца, образованные с помощью насадка, имеющего сопло диаметром (а) 30 мм, (б) 40 мм, (в) 50 мм.

Как можно увидеть на рисунке 11 (в), для сопла 50 получены хорошие зависимости пролета кольца вблизи микрофонов и разброс характеристик колец минимальный. Однако есть зависимости, когда кольцо неестественно ускоряется или замедляется на каком-либо участке. Такие реализации в дальнейшем удалялись из анализа для всех сопловых насадков. В результате была создана база траекторий вихревых колец различного размера и скоростей.

### **2.3. Анализ статистических данных траекторных исследований движения вихревых колец**

На следующем этапе проводилась оценка начальной скорости вихревых колец. Для ее определения использовались микрофоны № 13-14 (рис. 9), расположенные на расстоянии  $\Delta x = 50 \pm 1$  мм друг от друга. Скорость оценивалась исходя из выражения

$$V_0 = \frac{\Delta x}{\Delta t}, \quad (4)$$

где  $\Delta t = t_{14} - t_{13}$  – разность времени прихода кольца на 14 и 13 микрофон соответственно. Время  $t_{14}$  и  $t_{13}$  определялись по положению резкого снижения давления для 14 и 13 сигнала в соответствии с рисунком 9. Время прилета на экран определялось по характерным всплескам на временном сигнале 10.

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:

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

где N – количество реализаций для анализа.

В таблицах 3-5 представлены данные по среднему времени пролета кольца мимо микрофонов и среднеквадратическому отклонению параметров.

Таблица 3. Среднее время пролета кольца мимо микрофона и среднеквадратическое отклонение параметров для вихревых колец с соплом 30 мм (число отобранных реализаций 17).

Номер микрофона	№13	№14	№15	№16	№17	№18	№19	№20	№21	№22	№23	№24
$x_i$ , м	0,1	0,15	0,5	1	1,5	2	3	3,24	3,76	4	5	6,5
$\langle t(x_i) \rangle$ , мс	0	0,825	11,625	35	81,06	127	231,37	260,25	326,43	365,37	523,06	821,81
$S$	0	0,12	1,11	3,11	8,99	13,86	25,38	30,08	38,12	42,56	64,34	102,3

Таблица 4. Среднее время пролета кольца мимо микрофона и среднеквадратическое отклонение параметров для вихревых колец с соплом 40 мм (число отобранных реализаций 40).

Номер микрофона	№13	№14	№15	№16	№17	№18	№19	№20	№21	№22	№23	№24
$x_i$ , м	0,1	0,15	0,5	1	1,5	2	3	3,24	3,76	4	5	6,5
$\langle t(x_i) \rangle$ , мс	0	1,44	13,90	36,14	66,91	108,82	216,17	244,65	307,63	345,21	501	803,97
$S$	0	0,10	0,8695	2,187	4,5452	7,3831	15,094	17,366	25,975	25,810	41,730	70,686

Таблица 5. Среднее время пролета кольца мимо микрофона и среднеквадратическое отклонение параметров для вихревых колец с соплом 50 мм (число отобранных реализаций 70).

Номер микрофона	№13	№14	№15	№16	№17	№18	№19	№20	№21	№22	№23	№24
$x_i$ , м	0,1	0,15	0,5	1	1,5	2	3	3,24	3,76	4	5	6,5
$\langle t(x_i) \rangle$ , мс	0	2,7185	23,22	53,355	89,52	135,37	243,74	272,13	335,74	371,43	524,07	815,52
$S$	0	0,2445	1,9977	4,0720	6,4833	9,1986	13,480	15,835	22,176	21,533	31,711	58,927

В работах [51, 54], представлены данные для среднего времени движения вихревых колец и среднеквадратического отклонения для вихревых колец, образованных с помощью сопла 40 мм, и начальной скоростью 37 м/с для 20 временных реализаций. Эти данные представлены в таблице 6.

Таблица 6. Результаты траекторных измерений [51, 54].

Номер микрофона	1	2	3	4	5	6	7	8
$x_i$ , м	0	0,053	0,55	1,05	1,55	2,08	3,08	4,13
$\langle t(x_i) \rangle$ , мс	0	1,44	19,2	43,5	77,2	119,5	215,7	346,8
$S$	0	0,04	0,9	2,9	5,5	8,9	22,2	54,7

Сравнение средних траекторий вихревых колец, образованных с помощью сопла 40 мм, полученных в данной работе и работах [51, 54], представлено на рисунке 12. Как можно увидеть наблюдается хорошее соответствие движения вихревых колец, полученных с помощью разных генераторов.

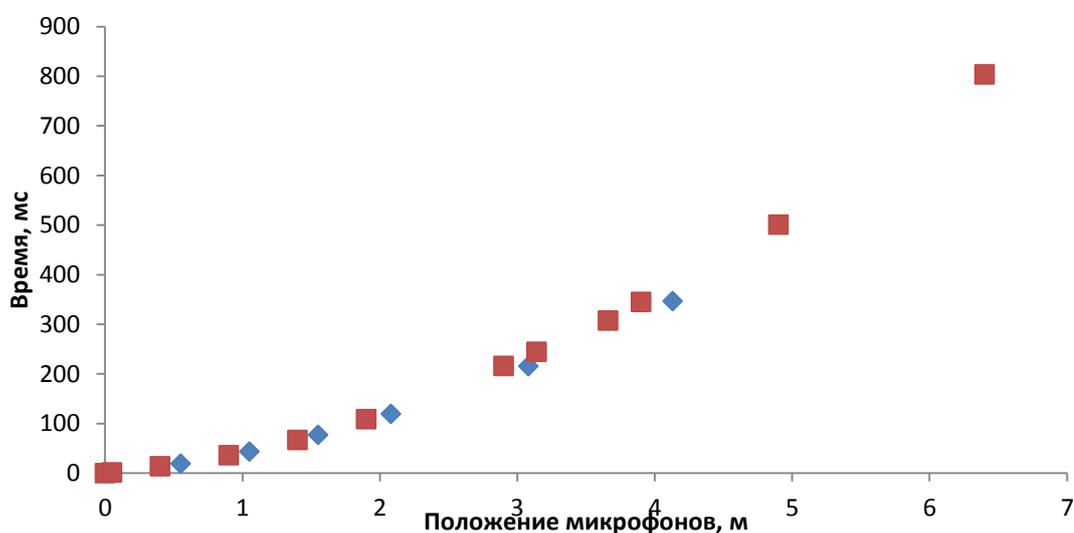


Рисунок 12. Сравнение средних траекторий движения вихревых колец с начальной скоростью 37 м/с и диаметром сопла 40 мм:

◆ – данные работ [51, 54]; ■ – результаты текущих экспериментов

В результате сравнения по среднеквадратичным отклонениям результатов данного эксперимента и работ [51, 54] можно сказать, что в начальный момент времени (до прохода кольцом 1 м) наблюдается

превышение среднеквадратичного отклонения (до пролета кольцом 1 м). Большой разброс в начальные моменты времени можно объяснить сложностью определения точного момента пролета кольца мимо соответствующих микрофонов. При большем удалении кольца от среза сопла разброс параметров становится ниже чем в работах [51, 54]. Среднеквадратическое отклонение времени пролета кольца точки с координатой  $\approx 4$  м в проведенном эксперименте для вихревых колец разных размеров и начальных скоростей меньше чем в работах [51, 54].

В результате, можно сделать вывод о хорошем качестве вихревых колец, отобранных с помощью предложенной методики.

### **Выводы по главе 3**

Создан поршневой генератор вихревых колец с ударным приводом, позволяющий создавать вихревые кольца с различной начальной скоростью и размерами.

Разработана методика исследования движения вихревых колец, основанная на многомикрофонных измерениях. При данных измерениях используются 13 микрофонов, установленных вблизи траектории движения вихревого кольца. Момент пролета вихревого кольца мимо микрофона определяется по характерному пику разряжения давления на временной реализации.

По разработанной методике проведено измерение движения вихревых колец, образованных с помощью сопел диаметром 30, 40 и 50 мм. Суммарно проведено 719 запусков для трех размеров сопла генератора вихревых колец. Создана база траекторий движения вихревых колец с различными начальными скоростями, образованных с помощью сопел диаметром 30, 40 и 50 мм. Вихревые кольца, образованные с помощью сопла с диаметром среза 50 мм, являются наиболее стабильными и имеют лучшую повторяемость. С уменьшением диаметра сопла происходит увеличение разброса характеристик и отклонений траектории колец от идеальной.

В результате обработки выделены наборы траекторий для каждого сопла с малым разбросом параметров. Средняя траектория вихревых колец, полученная с помощью сопла диаметром 40 мм в ходе данных экспериментов, хорошо соотносится с предыдущими экспериментальными исследованиями на аналогичном поршневом генераторе вихревым колец НИО-9 Центрального аэрогидродинамического института имени Жуковского (г. Москва).

Для отобранных временных реализаций проведена оценка среднеквадратичного отклонения времени пролета кольца мимо микрофонов. Для всех сопловых насадков наблюдается меньший разброс времени прилета кольца на удаленные от 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.

### ГЛАВА 3. ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИХРЕВЫХ КОЛЕЦ

В данной главе представлены методики измерения и обработка результатов экспериментов по исследованию шума турбулентных вихревых колец. Проведен спектральный анализ шума вихревых колец при их различном удалении от сопловых насадок для различных диаметров. Получены зависимости основной частоты излучения от времени движения кольца в безразмерном виде. Приводится методика оценки акустических свойств для одиночного вихревого кольца.

#### 3.1. Определение спектральных характеристик вихревых колец

Для анализа акустических характеристик движущегося вихревого кольца была разработана многоканальная измерительная система, состоящая из 20 микрофонов, и блоков сбора данных LAN XI фирмы «Briel & Kjaer». Для измерений вблизи траектории движения кольца используются 1/4" микрофоны поля давления Briel & Kjaer тип 4944 (4-70000 Гц), предназначенные для высоких уровней давления. В остальных случаях, используются 1/4" микрофоны свободного поля Briel & Kjaer тип 4958 (10-20000 Гц). Перед измерениями все микрофоны калибровались пистонфоном Briel & Kjaer тип 4228. Разработанная система включала в себя помимо микрофонов дальнего поля также две решетки для метода азимутальной декомпозиции (МАД), расположенные на расстоянии 800 мм от оси движения кольца ( $kr \gg 1$ , где  $k$  – волновое число,  $r$  – минимальное расстояние от оси движения кольца до микрофонов, при изменении частот излучения от 2000 до 500 Гц). Для регистрации отклонения траектории полета вихря от оси генератора использовался экран с шелковинками.

Положение микрофонов можно увидеть на схеме эксперимента, представленной на рисунке 13 (а). Фотография микрофонной системы,

установленной в заглушенной камере ПНИПУ, представлена на рисунке 13 (б). Данная система включала в себя следующие элементы:

**4-15 микрофоны** – микрофоны решетки МАД, Briel & Kjaer тип 4958. Решетка МАД имеет два контура, расположенных на расстоянии 760 мм друг от друга, и радиус 800 мм. Микрофоны в решетке располагаются на специальных державках длиной 250 мм для снижения отражений от контура решетки.

**1 микрофон** – триггерный микрофон, Briel & Kjaer тип 4944. Данный микрофон использовался для запуска измерительной системы в момент выхода кольца из генератора. Он располагался в 30 мм от среза сопла вдоль траектории и на расстоянии 150 мм от оси.

**2-3 микрофоны** – микрофоны для определения начальной скорости кольца, Briel & Kjaer тип 4944. Данные микрофоны располагались на расстоянии 100 и 150 мм от среза сопла вдоль траектории и 150 мм ниже оси движения кольца. Данные микрофоны фиксировали пик разрежения в момент пролета кольца.

**17-18 микрофоны** – два микрофона, Briel & Kjaer тип 4958, расположенных в области решетки МАД на расстоянии 400 мм от оси движения кольца. С помощью данных микрофонов определялся момент пролета кольца в области решетки. Также с помощью данных микрофонов можно определить направление отклонения движения кольца от траектории.

**19 микрофон** – микрофон, Briel & Kjaer тип 4958, установленный в плоскости экрана с шелковинками. Данный микрофон использовался для определения времени пролета кольца через плоскость экрана на основании характерного пика на временной зависимости в момент пролета кольца через экран.

**20-21 микрофоны** – микрофоны Briel & Kjaer тип 4958 для записи шума вихревого кольца в дальнем поле, находящиеся на расстоянии 2000 и 5000 мм от среза сопла соответственно и 800 мм от оси движения кольца. В связи с особенностями решетки МАД и ее расположения в камере на участке

2500-4500 мм от среза сопла установить дополнительные микрофоны для замеров шума в дальнем поле не удалось в связи с тем, что стойки микрофонов перекрывали бы сигналы на микрофонах. Поэтому на данном участке для измерения шума в дальнем поле применялись микрофоны решетки. Использовались микрофоны №6 и 12, находящиеся на расстоянии 3240 и 4000 мм от среза сопла соответственно.

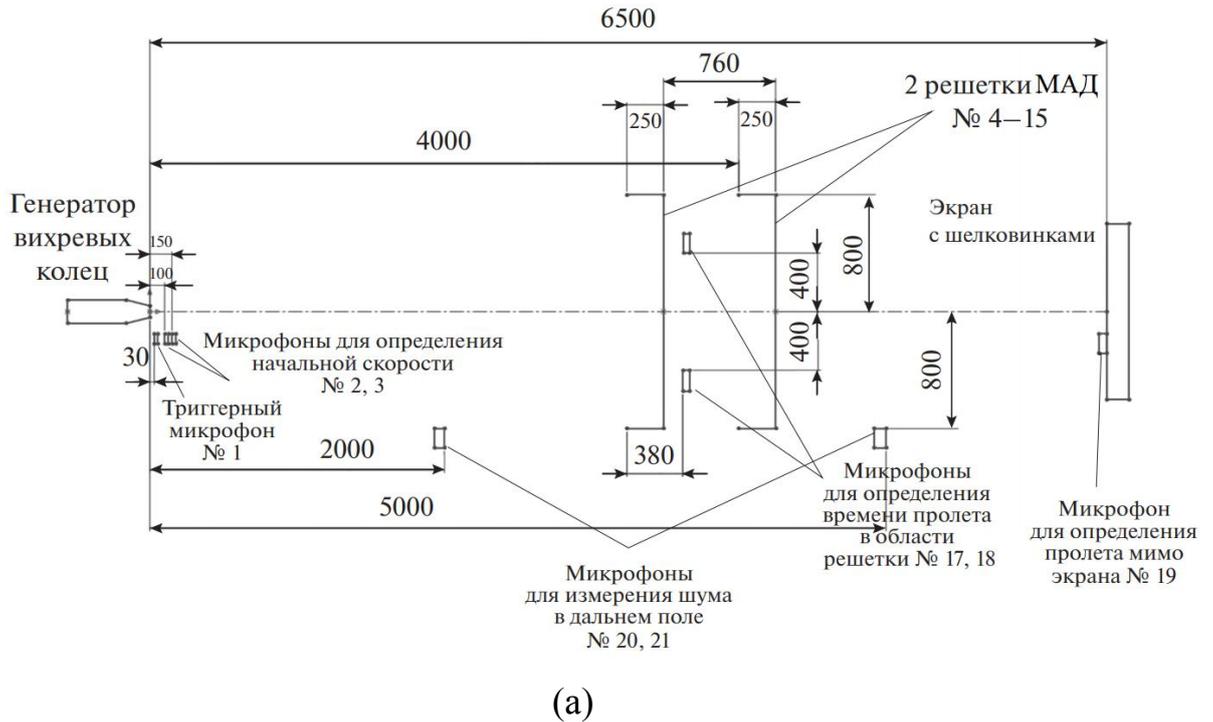


Рис. 13. Схема эксперимента (а) и многоканальная микрофонная система, установленная в заглушенной камере ПНИПУ (б)

При исследовании акустических характеристик вихревых колец возникают следующие проблемы:

- высокая скорость движения кольца;
- малое время процесса ( $< 1$  с);
- изменение характеристик вихря во время движения;
- относительно высокий шум запуска;
- разброс характеристик вихревых колец;
- характерный спектр удаётся выделить только с помощью усреднения по ансамблю реализаций.

по ансамблю реализаций.

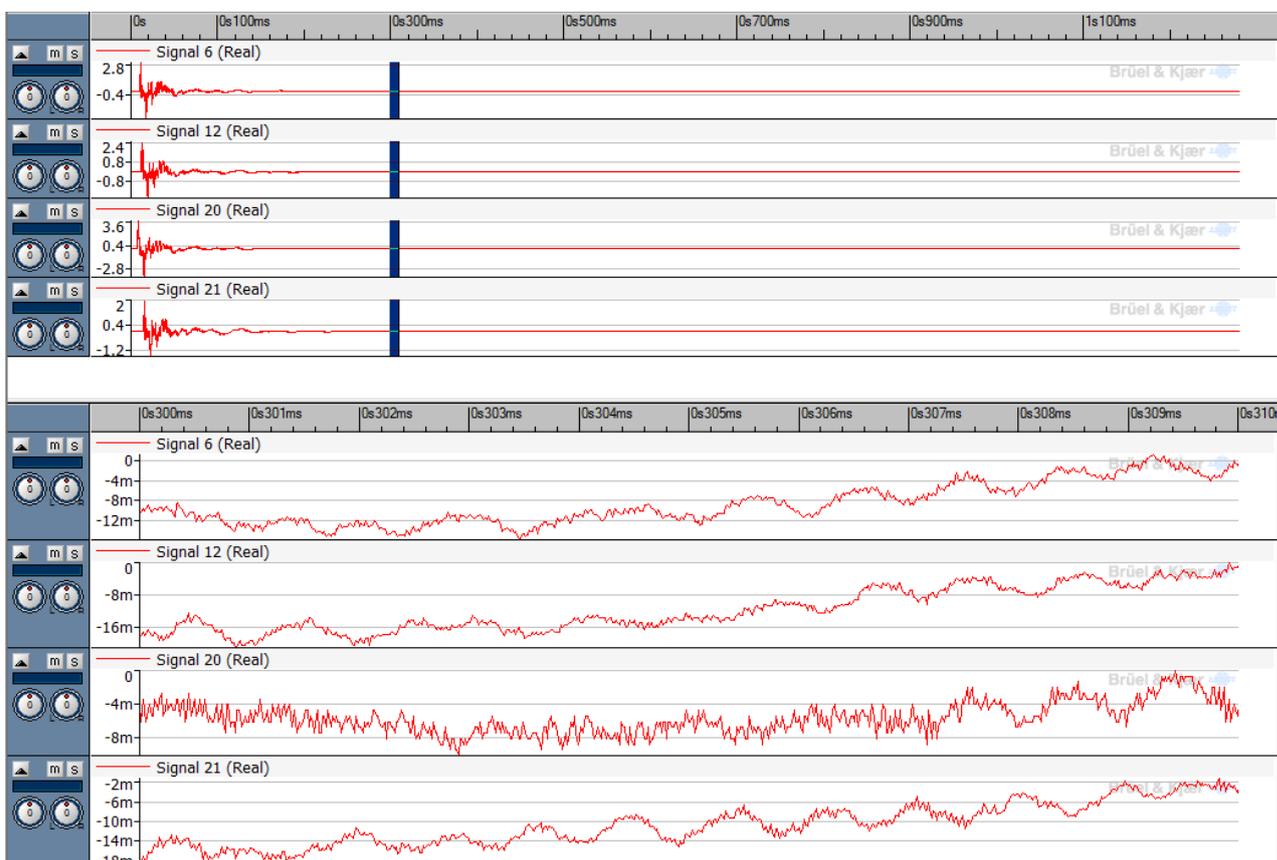


Рис. 14. Временные реализации звукового давления сигналов, использующихся для анализа шума в дальнем поле

Как можно увидеть на рисунке 14, в начальный момент времени присутствует достаточно сильный сигнал, соответствующий шуму запуска

генератора вихревых колец. Полезный сигнал на фоне шума запуска можно выделить только на участке реализации, когда шум установки достаточно затух. Началом отсчета времени для каждой реализации служит момент регистрации пика разрежения на триггерном микрофоне №13.

В настоящей работе проводились две серии экспериментов для каждого сопла, представляющие собой запись шума свободно летящего вихревого кольца, а также дополнительно проводились эксперименты, когда кольцо принудительно разрушалось на начальном участке траектории с помощью акустически прозрачного экрана, установленного на траектории (рис. 15).

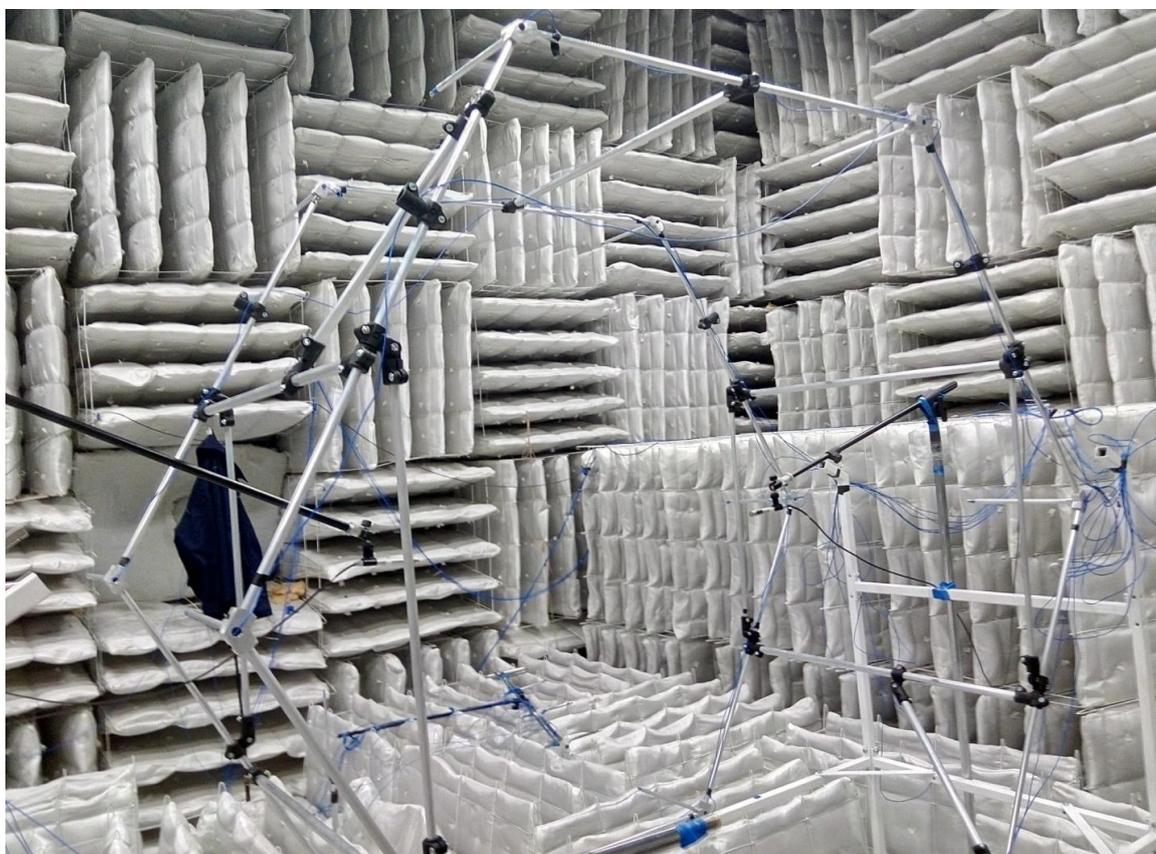


Рис. 15. Фотография серии экспериментов с установленным акустически прозрачным экраном

Для анализа шума, излучаемого вихревыми кольцами, было проведено 476 запусков вихревых колец. Далее производилась отбраковка вихревых колец по методике, представленной в разделе 2.3. Количество реализаций, используемых для дальнейшего анализа, представлено в таблице 7.

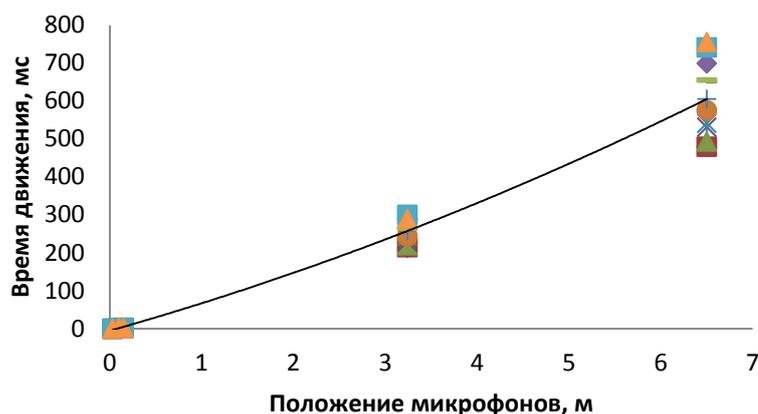
Таблица 7. Отобранные реализации

Название сопла	Общее число запусков	Количество отобранных реализаций	Средняя начальная скорость, м/с	Среднее время прилета кольца на экран, мс
Сопло 30	222	12	53±4	600±120
Сопло 40	141	25	38±2	540±20
Сопло 50	113	30	25±0,5	680±20

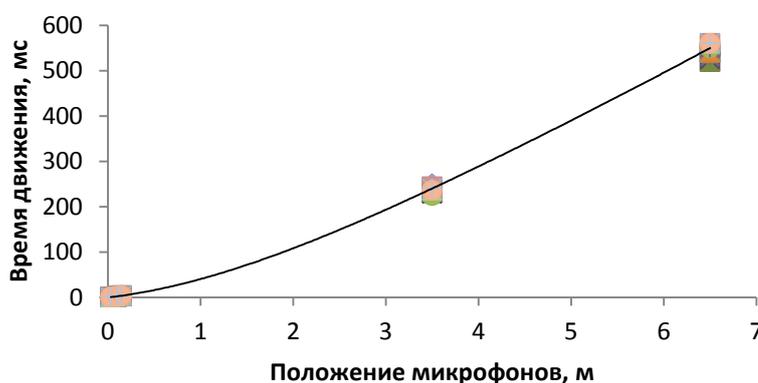
Траектории движения вихревых колец, отобранных для анализа шума кольца, представлены на рисунке 16.

На основании результатов, представленных в разделе 2.3 и работах [48, 51, 53, 98], можно сделать вывод о том, что разброс параметров и количество отобранных реализаций достаточны для дальнейшего анализа спектров вихревых колец. В ходе эксперимента по записи шума запуска и структурного шума установки было произведено по 20 запусков для каждого сопла.

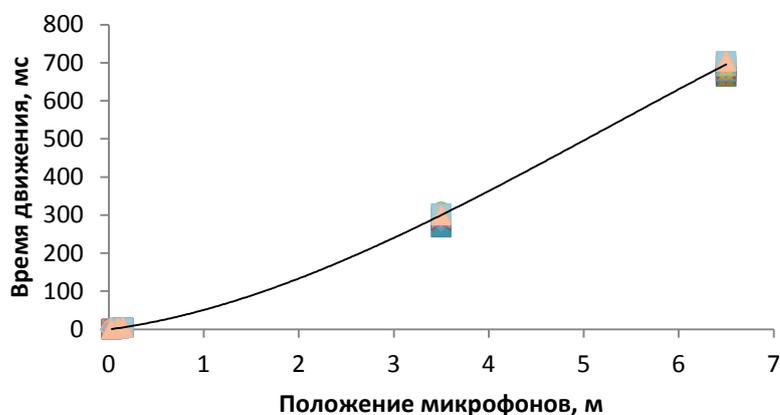
Во время полета кольца происходит изменение его параметров, в частности, происходит изменение скорости полета, его размеров и т.д. Изменение скорости и размеров приводит к изменению завихренности в ядре, что напрямую связано с излучением шума данным вихрем [49, 45], поскольку частота пика напрямую связана 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. Длительность реализации  $T$  выбиралась из соображений минимального изменения средних параметров кольца за время регистрации [50]. Именно такие параметры анализа использовались в работах [48, 51, 98].



(а)



(б)



(в)

Рис. 16. Траектории движения вихревых колец:

(а) сопло 30; (б) сопло 40; (в) сопло 50

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 можно получить спектры шума, излучаемого турбулентным вихревым кольцом на различных участках его траектории, что

представляется важным, так как средние и пульсационные аэродинамические параметры вихря (скорость, завихренность в ядре и т.д.) также изменяются вдоль траектории.

Были построены усредненные спектры на каждом малом участке временной реализации для микрофонов в дальнем поле № 20, 21 и находящихся на решетке МАД № 6, 12. При дальнейшем анализе использовались спектры сигналов, на которых амплитуда излучения была выше. Стоит отметить, что удалось выделить шум вихревого кольца на фоне помех, начиная с момента задержки 120 мс. В качестве примера на рисунках 17-19 приведены спектры с временем задержки 210 и 420 мс.

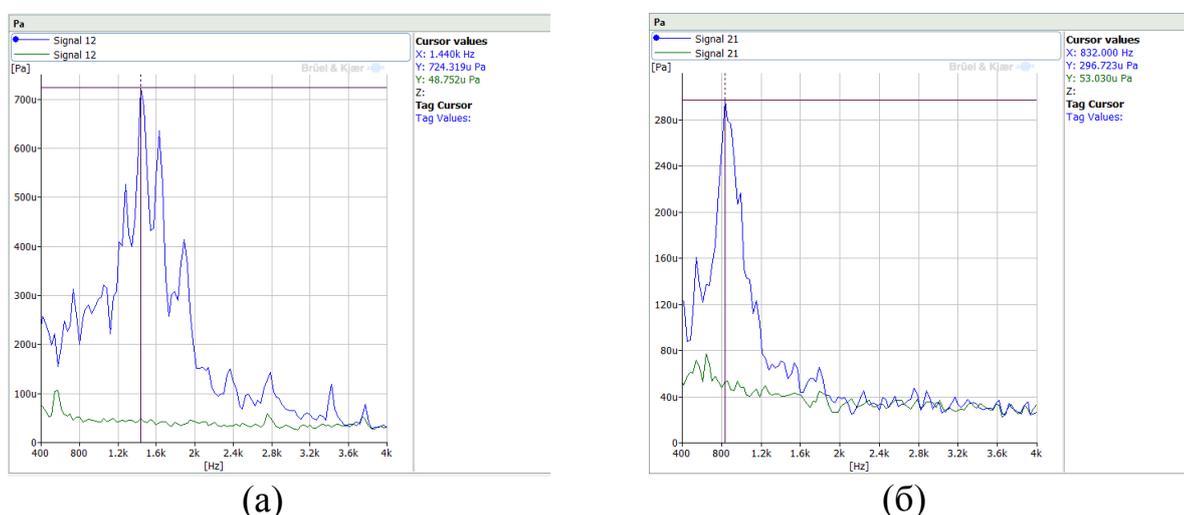


Рис. 17. Спектры (в микропаскалях) шума вихревых колец с диаметром сопла 30 мм «с кольцом» (синяя кривая) и фонового шума (зеленая кривая): а) задержка 210 мс; б) задержка 420 мс

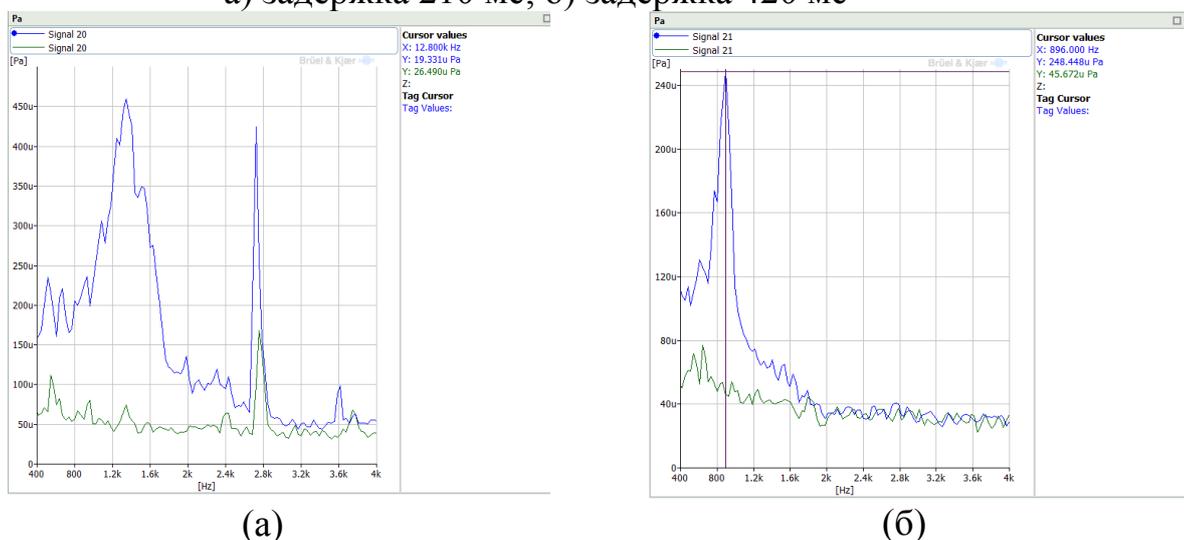


Рис. 18. То же, что на рис. 17, при использовании насадка с соплом 40 мм.

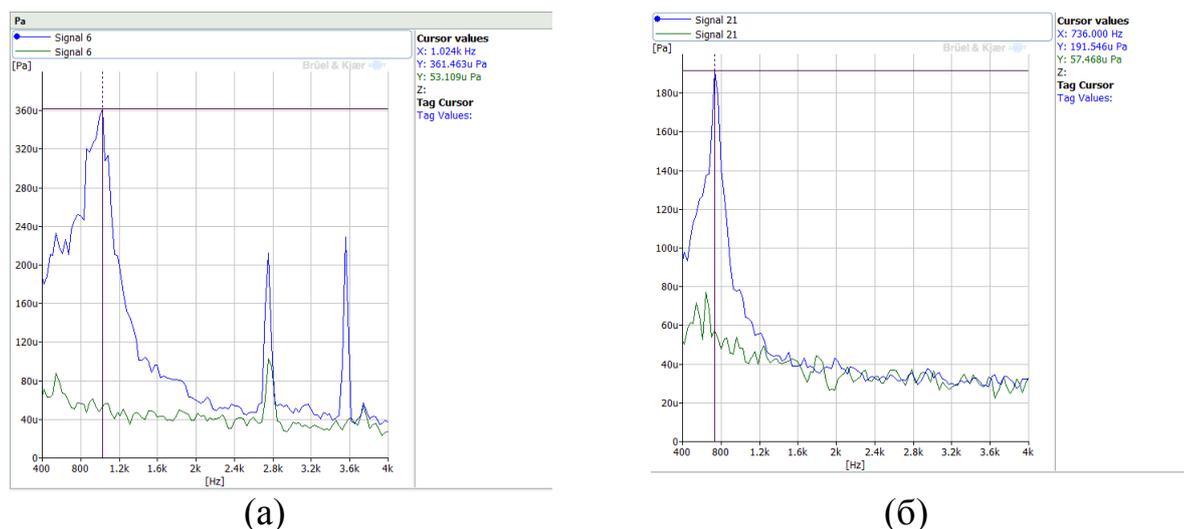


Рис. 19. То же, что на рис. 17, при использовании насадка с соплом 50 мм.

Полученные результаты хорошо соответствуют теоретическим представлениям о шуме вихревого кольца и предыдущим экспериментальным результатам. Шум вихревого кольца удается выделить на фоне структурного шума установки. Этот 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. Стоит отметить, что изменение частоты, связанное с эффектом Доплера, не может превышать величины 25-30 Гц. Поэтому смещение частоты пика в спектре излучения связано с другими эффектами [51].

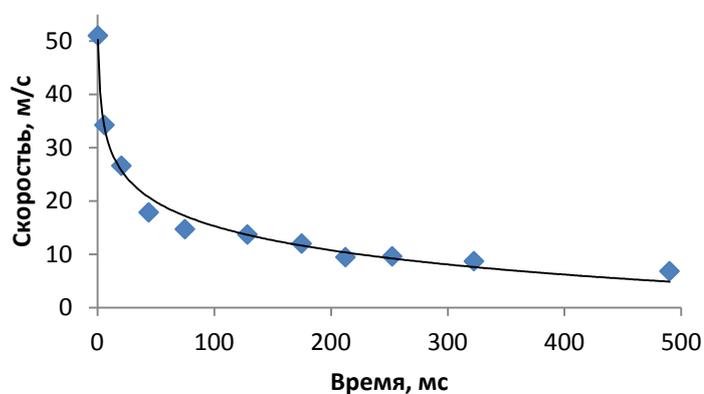
### 3.2. Анализ смещения характерной частоты излучения и амплитуды в шуме вихревого кольца

Из базы траекторных испытаний были выбраны временные реализации, соответствующие отобранным временным реализациям для дальнейшего исследования в пункте 3.1 данной главы, а также определены скорости колец на каждом участке.

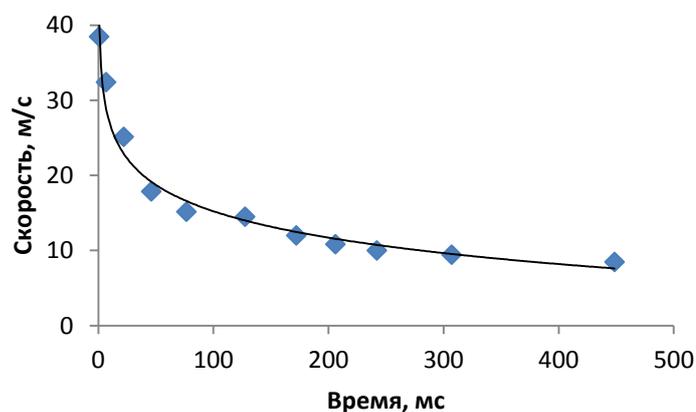
Скорость на текущем участке оценивалась по выражению (4), где  $\Delta t = t_i - t_{i-1}$  – разность времени прихода кольца на близкие друг другу траекторные микрофоны соответственно.

На рисунке 20 представлены зависимости скорости выбранных колец от времени.

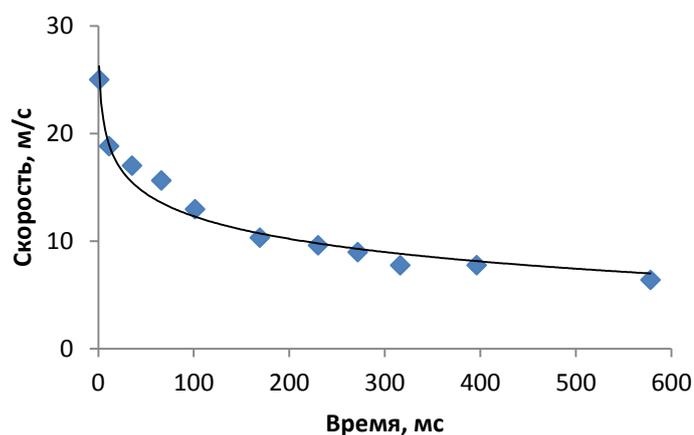
Проведен анализ смещения основной частоты в спектре излучения вихревого кольца от времени для вихрей, полученных с помощью сопловых насадок разных размеров. Для этого определялась частота с наибольшей амплитудой излучения в спектре кольца.



(а)



(б)



(в)

Рис. 20. Зависимости скорости движения вихревых колец от времени:

(а) вихревые кольца, образованные с помощью соплового насадка диаметром 30 мм, (б) 40 мм, (в) 50 мм

Полученные частоты были приведены к безразмерному виду относительно числа Струхалия. Использовалось число Струхалия по начальной скорости движения вихревого кольца и диаметру сопла:

$$St = \frac{fd_c}{V_0}, \quad (5)$$

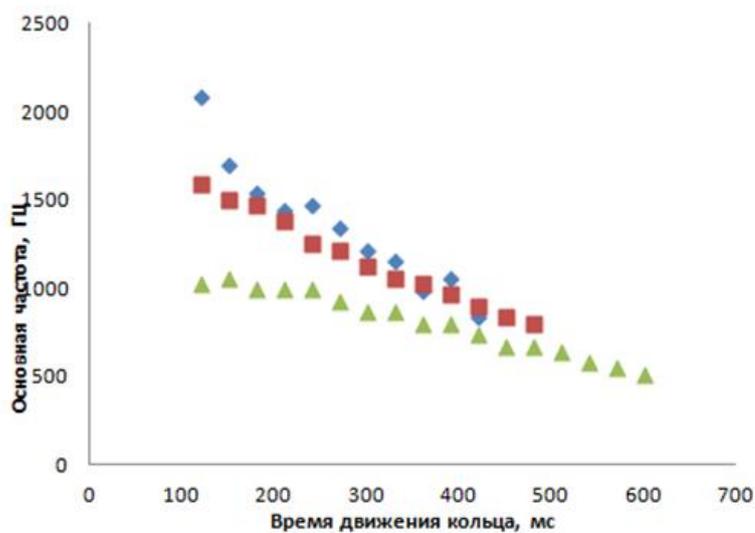
где  $f$  – частота излучения;  $d_c$  – диаметр сопла;  $V_0$  – начальная скорость движения кольца.

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

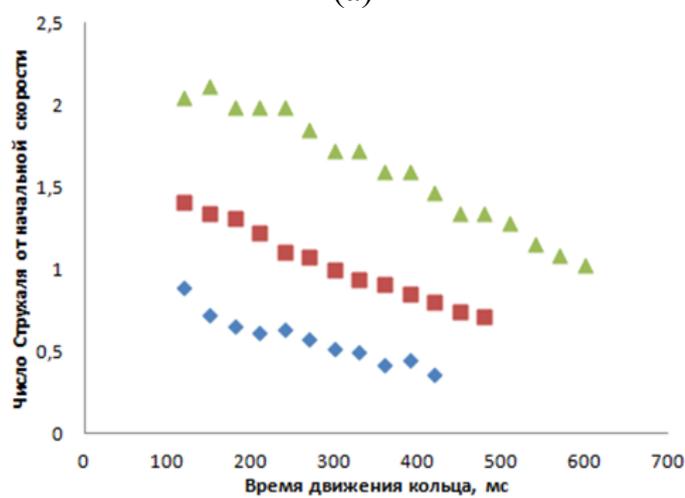
$$St = \frac{fd_c}{V_t}, \quad (6)$$

где  $V_t$  – текущая скорость движения кольца.

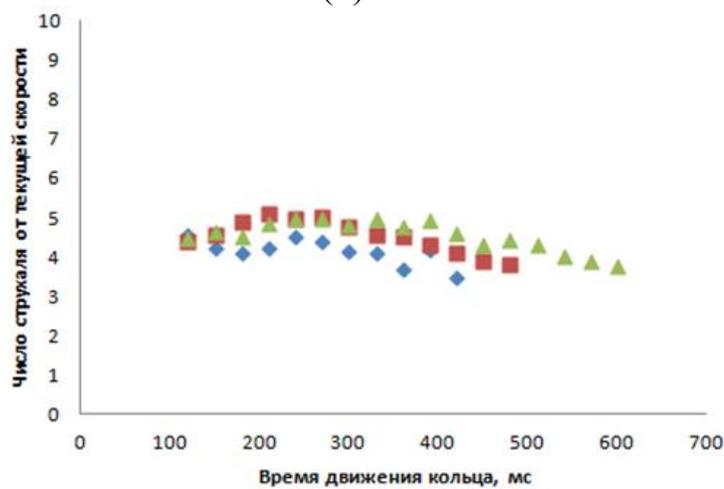
На рисунке 21 представлены полученные результаты для частоты и безразмерной частоты излучения вихревого кольца.



(а)



(б)



(в)

Рис. 21. Временная зависимость частоты (а), числа Струхала от начальной скорости (б) и числа Струхала от текущей скорости (в)

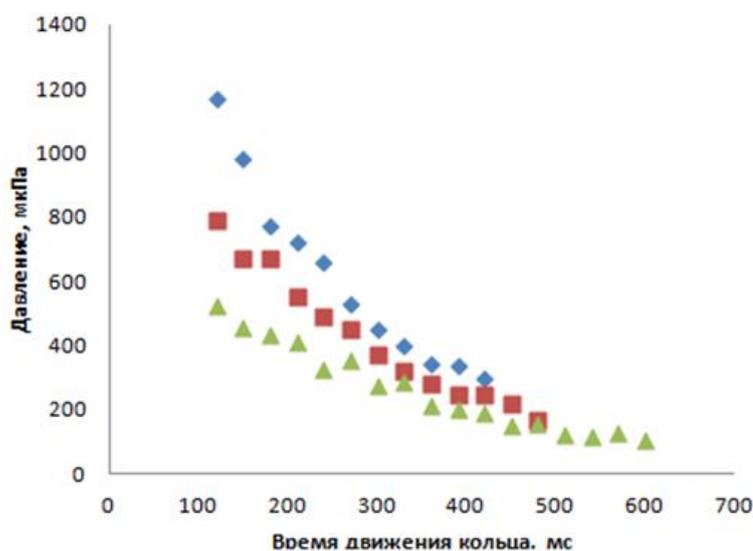
◆ – вихревые кольца, образованные с помощью соплового насадка диаметром 30 мм; ■ – 40 мм; ▲ – 50 мм

Основная частота в спектре шума вихревых колец  $f$  смещается в низкочастотную область при движении вихрей каждого семейства. Рассматривая число Струхала с использованием начальной скорости и диаметра сопла, 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 Струхала по текущей скорости позволяет сблизить соответствующий кривые так, что для всех вихрей излучение шума оказывается сосредоточено в области одного числа Струхала  $\sim 4-5$ . Полученные результаты позволяют говорить о том, что кольца разных размеров и скоростей имеют одинаковый механизм излучения шума.

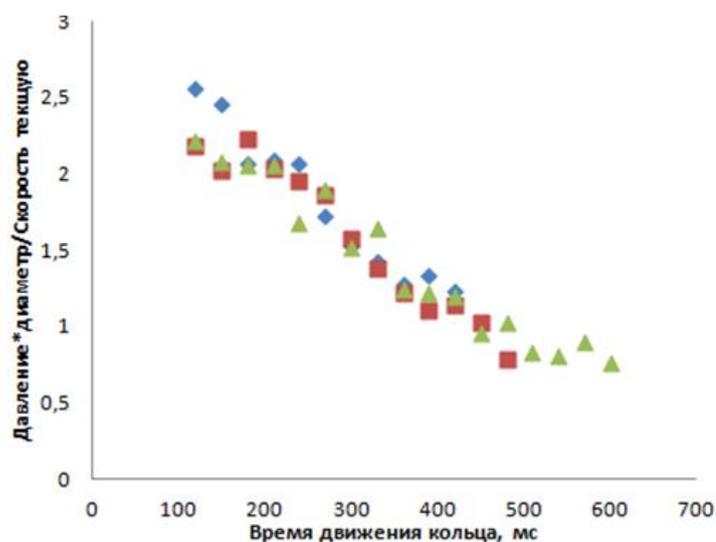
Совместно с основной частотой фиксировалось значение максимальной амплитуды в спектре излучения вихревого кольца. Проводилась нормировка амплитуды относительно диаметра сопла и текущей скорости движения вихря:

$$P_n = \frac{Pd_c}{V_0}, \quad (7)$$

где  $P_n$  – нормированная амплитуда пика в спектре излучения,  $P$  – амплитуда пика в микропаскалях.



(a)



(б)

Рис. 22. Временная зависимость амплитуды излучения вихревого кольца (а), временная зависимость нормированной амплитуды (б):

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

Как можно увидеть на рисунке 22 (а), амплитуда на пике излучения нелинейно убывает. Результаты, представленные на рисунке 22 (б), позволяют говорить о линейной зависимости амплитуды излучения от отношения диаметра к скорости для всех исследованных вихревых колец.

### 3.3. Исследование шума одиночного вихревого кольца

Одной из основных проблем при исследовании свойств вихревых колец, как указано выше, является необходимость проведения большого количества экспериментов для получения достаточного набора реализаций, чтобы провести разбраковку вихревых колец и построить усредненные по ансамблю спектры шума. Если рассматривать шум кольца в реализации длиной 31,2 мс на разных микрофонах без усреднения, то получается изрезанный спектр, приведенный на рисунке 23.

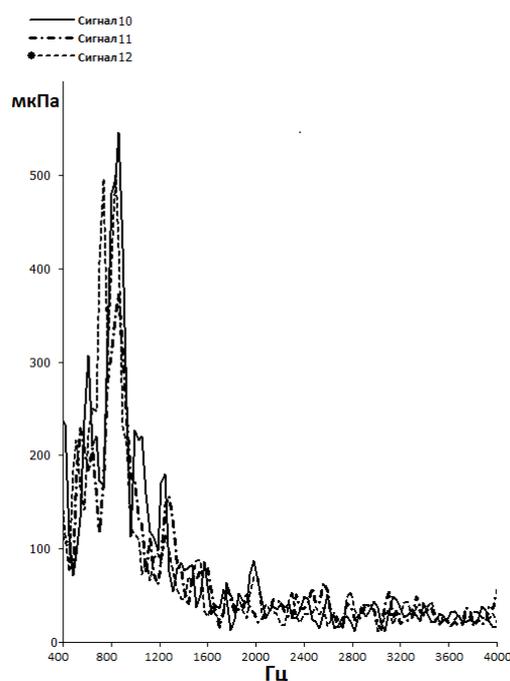


Рис. 23. Мгновенный спектр вихревого кольца в реализации, задержанной от момента запуска на 330 мс для трех различных микрофонов, расположенных в решетке для метода азимутальной декомпозиции

В этом случае выявить характерный пик в спектре при исследовании шума отдельного вихря не представляется возможным. В настоящей работе предлагается 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 решетку метода азимутальной декомпозиции [103]. 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. В углах шестиугольников установлены четвертьдюймовые микрофоны Brüel & Kjær, тип 4958.

В данной работе использовалась одна временная реализация для сопла диаметром 50 мм и микрофоны второго контура антенны (рис. 13а). По этим 6 микрофонам были построены усредненные спектры для выбранной временной реализации.

Нестационарность исследуемого процесса приводит к смещению пика в низкочастотную область, в связи с этим звуковое поле исследуется на малом участке временной реализации длиной  $T = 31,2$  мс. Спектральные характеристики вычислялись для шести микрофонов, для одного и того же времени задержки  $\tau$  от сигнала запуска кольца, вырабатываемого триггерным микрофоном на срезе сопла, а затем усреднялись. Анализ спектров вихревого кольца проводится на коротких интервалах в диапазоне от 150 мс, где шум кольца превышает затухающий шум запуска, до 540 мс, где шум кольца уже не различим. Примеры усредненных таким образом спектров для отдельного вихревого кольца представлены на рисунке 24.

Сделаем следующее замечание общего характера. Использование такого усреднения может приводить к улучшению статистической оценки спектров в том случае, если расстояние между микрофонами больше характерного размера корреляции звукового поля. Для вихревого кольца улучшение статистики легко оценить. Действительно, шум вихревого кольца состоит из 5 квадрупольей [49, 53], каждый из которых излучает независимо от других. Кроме того, в излучении имеются высшие мультиполи существенно меньшей амплитуды. В идеальной ситуации чисто квадрупольного излучения можно лишь пятикратно улучшить статистику при получении спектров. Шестой микрофон можно рассматривать как дополнительный для снижения шума от высших мультиполей. Следует иметь в виду, что в направлениях вперед-назад, где доминирует только осесимметричное квадрупольное излучение (нулевая мода, другие квадрупольи не «светят» в этом направлении), статистика практически улучшаться не будет, поскольку звуковое поле по этим направлениям состоит лишь из одной моды, с корреляцией, близкой к единице. Это проявляется в недостаточном усреднении спектра на рисунке 24 (а), поскольку кольцо в этих измерениях находится на расстоянии  $\sim 2$  м от среза сопла [103], а решетка на расстоянии 4 м, что как раз и соответствует доминированию нулевой моды.

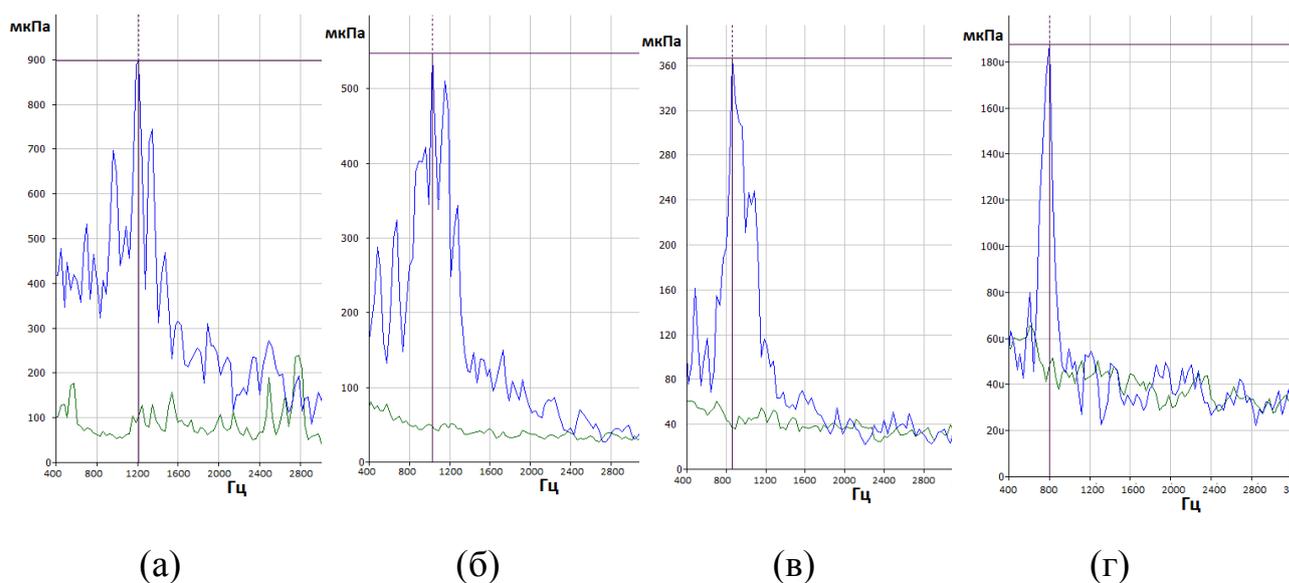


Рис. 24. Спектры шума вихревого кольца для одной временной реализации, усредненные по 6-ти микрофонам круговой решетки (синяя кривая), и фонового шума (зеленая кривая): (а) задержка 150 мс; (б) задержка 240 мс; (в) задержка 330 мс; (г) задержка 480 мс

Тем не менее, предложенный метод позволяет существенно улучшить статистические оценки спектров (сравнение рис. 24 (в) и рис. 23). В целом, полученные спектры хорошо соотносятся с типичными спектрами шума вихревого кольца [48, 51, 95, 103]. Для рассмотренной временной реализации была определена частота максимума в спектре и амплитуда излучения в различные моменты времени. Проведено сравнение с результатами, полученными при использовании усреднения по ансамблю реализаций для вихревых колец аналогичного размера, представленных в разделе 2.3. На рисунке 25 видно, что результаты для единичной реализации хорошо соотносятся с результатами при усреднении по ансамблю реализаций. На основании этого, учитывая высказанные выше оговорки, можно сделать вывод, что для исследования шума вихревого кольца можно использовать единичные реализации и проводить усреднение по микрофонам, расположенным вокруг траектории движения вихревого кольца.

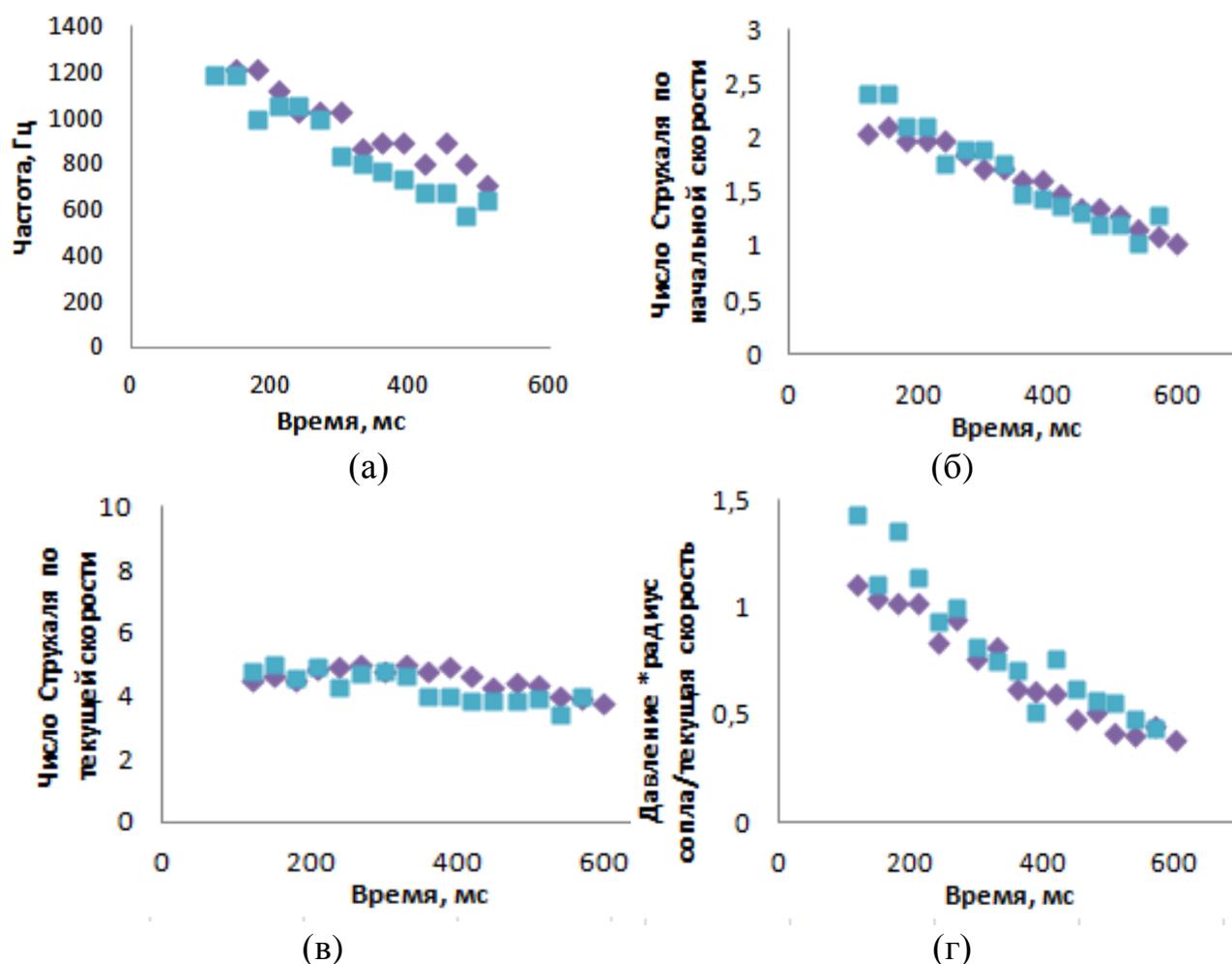


Рис. 25. Зависимости от времени (а) основной частоты, (б) числа Струхала, посчитанного по начальной скорости, (в) числа Струхала, посчитанного по текущей скорости, (г) нормированной амплитуды пика;  $\blacksquare$  – одиночное вихревое кольцо;  $\blacklozenge$  – усредненные значения по ансамблю реализаций

### Выводы по главе 3

Проведено экспериментальное исследование шума вихревых колец, образованных поршневым генератором с разными размерами сопла, в заглушенной камере. Для каждого размера сопла получены усредненные спектры шума вихревых колец на разных участках траектории. Шум вихревого кольца на фоне помех удалось выделить для всех сопловых насадков, начиная с момента времени 120 мс, что меньше чем в предыдущих работах. Шум сосредоточен в узкой полосе частот для всех колец, образованных с помощью сопловых насадков 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. Амплитуды излучения также уменьшается при движении вихревых колец так, что можно проследить линейную зависимость амплитуды звукового сигнала от отношения диаметра к скорости для всех исследованных вихревых колец.

Полученные результаты хорошо соответствуют теоретическим представлениям о шуме вихревого кольца и предыдущим экспериментальным результатам. Приведение основной частоты излучения к безразмерному виду показало, что зависимости безразмерной частоты от времени для различных вихрей становятся подобными друг другу, что позволяет говорить о том, что кольца разных размеров и скоростей имеют одинаковый механизм излучения шума.

## **ГЛАВА 4. РАССЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ПИКА В ШУМЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ВИХРЕВОГО КОЛЬЦА**

В данной главе проводится сравнение частоты излучения звука свободно летящими турбулентными вихревыми кольцами с рассмотренной теоретической моделью на значительном участке траектории. Проведено численное моделирование средних параметров вихревых колец разных размеров при их движении на начальном участке траектории. С помощью автомодельной теории можно продлить данные расчета на более удаленные от сопла области и сравнить значения основной частоты и экспериментальные данные частоты пика излучения для различных диаметров сопла при его движении. Рассматриваются вихревые кольца, образованные с помощью сопел диаметрами 40, 50 и 60 мм. Численное моделирование проводилось в осесимметричной постановке, предполагая, что формирование и движение вихря на начальном участке [104, 105] является осесимметричным. Для задания граничных и начальных условий при численном моделировании движения вихревого кольца была разработана методика экспериментального определения условий создания вихря. Верификация расчета проводилась путем сопоставления траекторий движения вихрей, полученных численно и во время эксперимента.

### **4.1. Экспериментальное определение зависимости движения кольца от движения поршня**

В работах [105, 96] показано, что свойства вихревого кольца существенно зависят от условий его создания, в частности от интенсивности перемещения поршня генератора. В связи с этим, при использовании всех сопловых насадок в данной работе проводилась совместная регистрация

перемещения поршня генератора вихревых колец, перемещения самого вихревого кольца и шума в дальнем поле, излучаемого данными вихрями.

Перемещение поршня генератора вихревого кольца регистрировалось с помощью акселерометра, закрепленного на задней стенке поршня. Перемещение вихревого кольца регистрировалось с помощью микрофонов №1-12, 19, установленных на малом расстоянии от траектории движения кольца. Для контроля отклонения кольца от оси движения использовался экран с шелковинками. Шум вихревого кольца записывался с помощью кругового массива микрофонов, расположенных на расстоянии 1 м от траектории движения. На рисунке 26 показана схема проведения эксперимента.

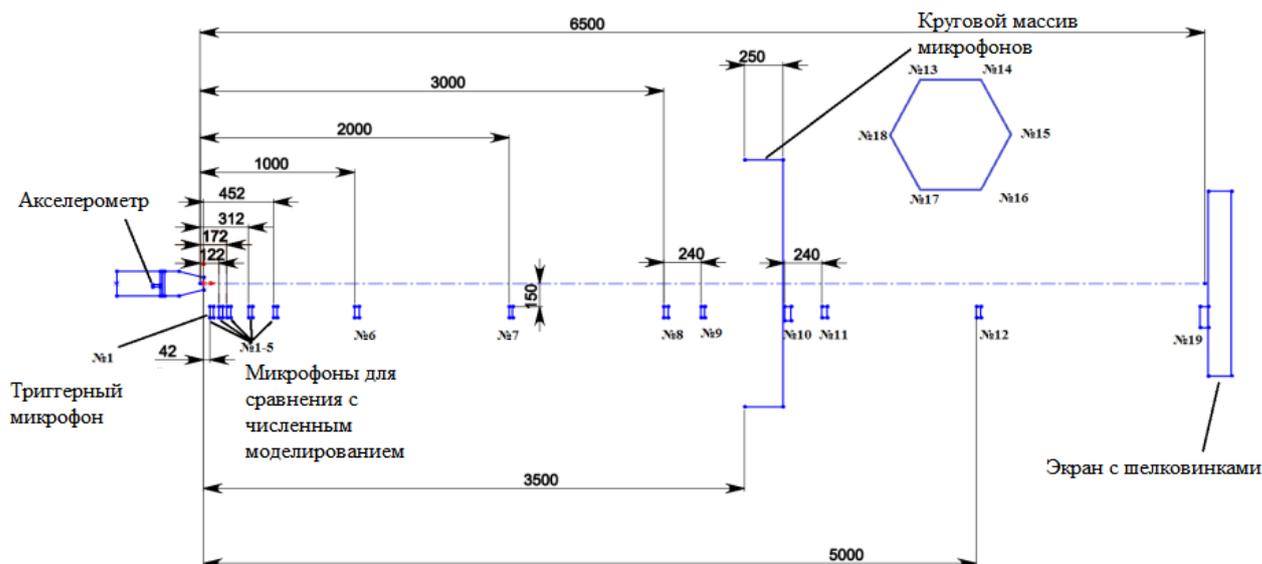


Рис. 26. Схема проведения эксперимента

Поскольку каждое созданное вихревое кольцо имеет индивидуальные свойства (скорость, отклонение от траектории, размеры) из-за ударного метода запуска поршня, была проведена большая серия экспериментов. Это позволило выбрать для дальнейшего исследования только правильно летящие вихревые кольца, попадающие близко к центру экрана и получить среднюю траекторию вихревых колец. Из данной серии экспериментов была выбрана одна временная реализация для каждого сопла, 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, тогда как в некоторых исследованиях используются теоретические законы, которые плохо согласуются с фактическим движением поршня [96]. Полученные зависимости ускорения, скорости и смещения поршня генератора показаны на рисунке 27.

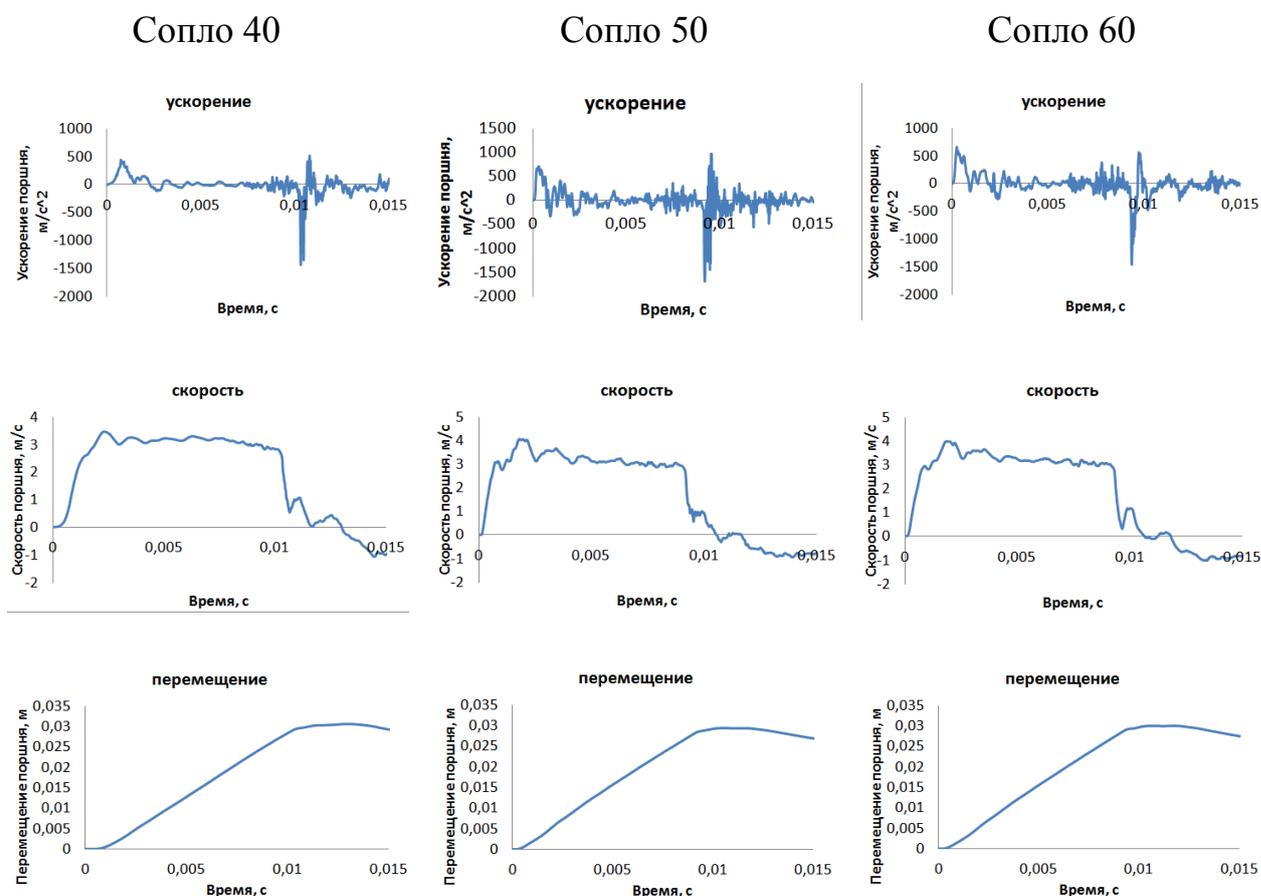


Рис. 27. Ускорение, скорость и перемещение поршня генератора вихревых колец

Анализ сигналов микрофонов №1-5, позволил оценить время пролета вихревого кольца рядом с соответствующим микрофоном по пику разрядки, образуемому в момент пролета кольца вблизи соответствующего микрофона, в соответствии с методикой, предложенной во

второй главе. Пример сигналов с этих микрофонов для вихревого кольца, образованного с помощью сопла 60 мм, показан на рисунке 28.

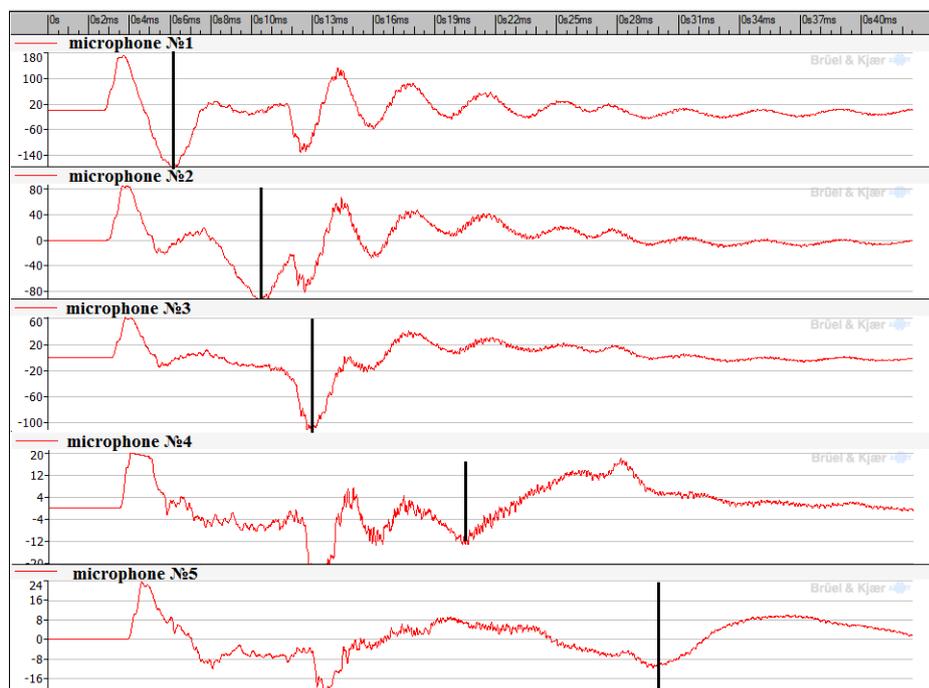


Рис. 28. Зависимости давления на микрофонах №1-5 от времени вихревого кольца, образованного с помощью сопла 60 мм

Полученные с микрофонов №13-18 временные сигналы, обрабатывались с помощью быстрого преобразования Фурье на малом временном участке  $T=31,2$  мс. Спектральные характеристики вычислялись для каждого микрофона для одного и того же времени задержки  $\tau$  от триггерного сигнала, а затем усреднялись, аналогично разделу 3.3. Анализ шума вихревого кольца проводится на интервале от 150 мс, где шум кольца превышает шум запуска, до 600 мс, где шум кольца уже не различим. Примеры полученных спектров представлены на рисунке 29.

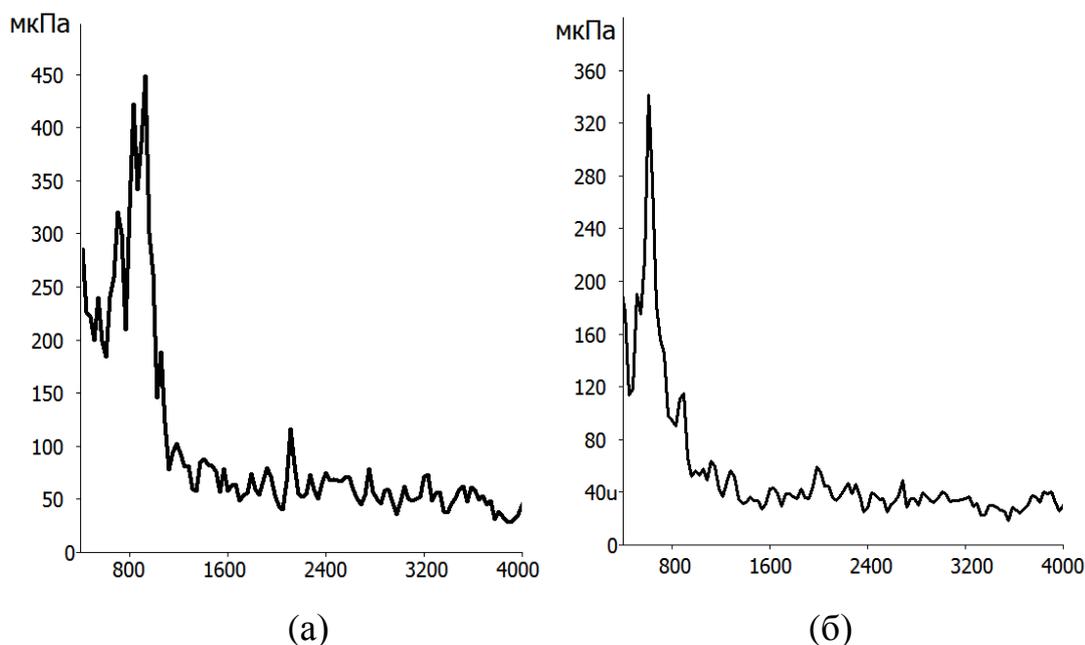


Рис. 29. Спектры шума вихревого кольца, образованного с помощью сопла 60 мм: (а) – задержка от момента запуска 210 мс; (б) – задержка 420 мс

#### 4.2. Численное моделирование формирования вихревого кольца

Численное моделирование формирования вихревого кольца на начальном участке его траектории выполнялось в программном пакете ANSYS Fluent. Процесс моделирования формирования вихревого кольца проводился 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 [106]:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) &= -\nabla p + \nabla \cdot \tau, \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) &= \nabla \cdot (\chi \nabla T + \tau \cdot \vec{v}).\end{aligned}\tag{8}$$

Тензор вязких напряжений определяется выражением:

$$\tau = \eta \left[ (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right].\tag{9}$$

Полная энергия имеет вид:

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2}.\tag{10}$$

где  $\rho$  – плотность;  $\vec{v}$  – вектор скорости;  $p$  – давление;  $T$  – температура;  $h$  – энтальпия;  $\eta$  – молекулярная вязкость;  $\chi$  – теплопроводность;  $I$  – единичный вектор. Для замыкания системы уравнений (8)-(10) используется уравнение состояния совершенного газа.

Геометрическая модель, используемая в расчетах, представляла собой внутреннюю область генератора и область за выходным сечением сопла, в которой формируется и движется вихревое кольцо. Размер этой области составляет  $\sim 14$  диаметров выходного сечения сопла, так как на этом участке траектории поток является осесимметричным. Геометрическая модель показана на рисунке 30.

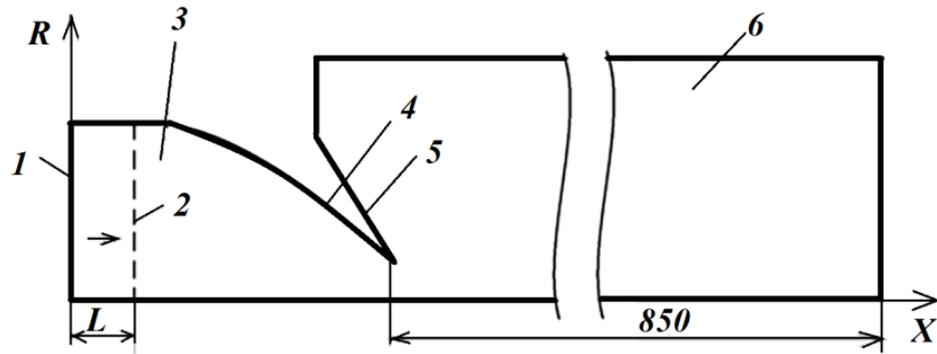


Рис. 30. Геометрическая модель расчетной области:

1 – стенка подвижного поршня; 2 – остановка поршня; 3 – внутренняя область генератора; 4 – внутренняя стенка сопла; 5 – внешняя стенка сопла; 6 – область движения вихревого кольца

Численное решение задач вихревой газовой динамики требует достаточно тонкой вычислительной сетки. В то же время типичный размер вихря для нормального разрешения требует не менее 40-50 вычислительных ячеек. В качестве типичного размера принимается диаметр ядра вихревого кольца, который по экспериментальным результатам для аналогичных вихревых колец составляет  $\sim 10$  мм. На основании этого средний линейный размер вычислительной ячейки в области движения вихрей составляет 0,25 мм. У стенки сопла вычислительная сетка более тонкая, так что безразмерный параметр  $y^+$  удовлетворяет условию  $y^+ < 1$ . Сетка содержит 1 000 000 вычислительных ячеек, ее фрагмент показан на рисунке 31.

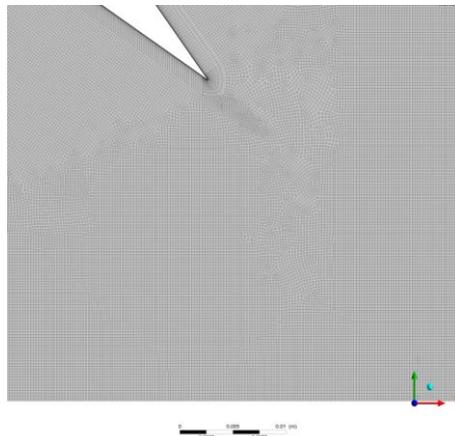


Рис. 31. Расчетная сетка в области выходного сечения сопла

Вычисления проводились при нормальных условиях окружающей среды. Рабочей средой принят воздух, свойства которого изменяются в соответствии с законом идеального газа.

На границе внешней области движения вихря используется граничное условие «Выход» с нулевым избыточным давлением. Внутренние и внешние стенки генератора и подвижная стенка поршня генератора моделируются граничными условиями «Стенка».

Математическая формулировка граничных условий:

- «Выход»:

$$P|_b = P|_{t=0}; \quad \frac{\partial T}{\partial n}|_b = 0.$$

$$\text{если } u|_b \leq 0, \text{ то } \frac{\partial u}{\partial n}|_b = 0; \quad \text{если } u|_b > 0, \text{ то } u|_b = u_\tau|_b.$$

- «Стенка»:

$$u_n|_b = 0; \quad \frac{\partial u_\tau}{\partial n}|_b = \frac{u_\tau}{\kappa} \ln\left(\varepsilon \frac{\rho u_\tau y}{\mu}\right); \quad \frac{\partial T}{\partial n}|_b = 0.$$

- «Подвижная стенка»:

$$u_n|_b = 0; \quad \frac{\partial u_\tau}{\partial n}|_b = \frac{u_\tau}{\kappa} \ln\left(\varepsilon \frac{\rho u_\tau y}{\mu}\right); \quad \frac{\partial T}{\partial n}|_b = 0,$$

при этом на данной границе производится перестроение сетки по методу Layering. При перестроении используются данные о перемещении поршня генератора вихревых колец полученные для исследуемой временной реализации.

- «Ось»:

$$u_n|_b = 0; \quad \frac{\partial u_\tau}{\partial n}|_b = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial n}|_b = 0; \quad u|_b = u_\tau|_b.$$

где  $u$  – вектор скорости;  $P$  – давление;  $T$  – температура;  $\kappa$  – турбулентная кинетическая энергия;  $\rho$  – плотность;  $\mu$  – динамическая вязкость;  $\varepsilon$  – скорость диссипации турбулентной энергии;  $n$  – нормаль. Нижние индексы  $n$ ,  $\tau$

являются нормальными и касательными компонентами соответственно;  
 $b$  – граничная компонента;  $t=0$  начальное значение.

Граничные условия показаны на рисунке 32.

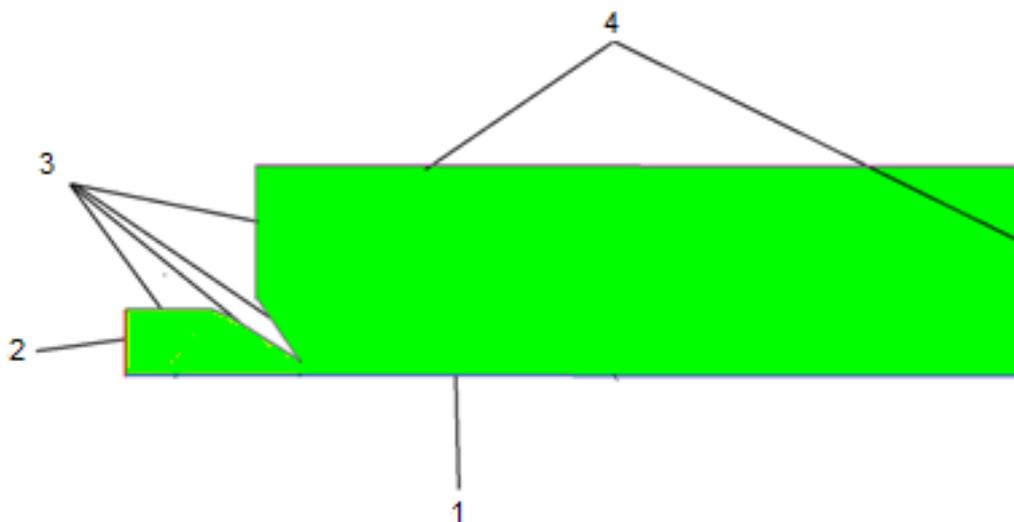


Рис. 32. Граничные условия: 1 – ось; 2 – подвижная стенка; 3 – стенка;  
 4 – выход

Для решения системы (8)-(10) во Fluent использовался метод конечных объемов. Уравнения неразрывности, движения и энергии записывались в общем интегральном виде:

$$\int_V \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dV + \oint_S \rho \phi \vec{v} \cdot d\vec{A} = \oint_S \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot d\vec{A} + \int_V S_\phi dV \quad (11)$$

Здесь  $\phi$  скалярная величина, зависящая от решаемого уравнения. Для уравнения неразрывности  $\phi = 1$ , для уравнения движения  $\phi = \rho \vec{v}$ , для уравнения энергии  $\phi = \rho E$ .

Вся расчетная область делилась с помощью сетки на конечные объемы и для каждой ячейки записывались интегральные законы сохранения (6). Интегралы, входящие в уравнения, аппроксимировались с использованием средних значений полей на гранях ячеек, которые связаны со значениями в узлах линейными соотношениями. Для интегрирования по времени использовалась неявная схема второго порядка. Таким образом, значения полей в узлах сетки оказываются связанными системой линейных уравнений.

Подробнее схема решения нестационарных уравнений Навье-Стокса в Fluent представлена в [106].

Шаг по времени для данной задачи был выбран  $t=1/65536$  с. Расчеты проводились в течении 1900 шагов по времени.

#### 4.3. Сопоставление полученных экспериментальных и расчетных результатов с теорией о излучении вихревого кольца

На первом этапе проведено сравнение перемещения вихревого кольца по результатам численного моделирования и расчета в Ansys Fleunt. Верификация расчетов проводилась по значению начальной скорости. Определение начальных параметров вихревого кольца производилось при удалении вихря на несколько калибров от среза сопла – это связано с тем, что на выработывание автомодельного распределения завихренности в вихре необходимо некоторое время [20]. Начальную скорость вихревого кольца определяли по выражению (4) на основании разности положений кольца на участках с координатами  $x_1 = 0,122$  м и  $x_2 = 0,172$  м, где были установлены микрофоны № 2, 3:

Сравнение начальной скорости вихревого кольца полученное в расчете и эксперименте, представлено в таблице 8. Как можно увидеть начальная скорость в расчете и эксперименте хорошо согласуется друг с другом, погрешность между расчетом и экспериментом не превышает 2%.

Таблица 8. Сравнение начальной скорости

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

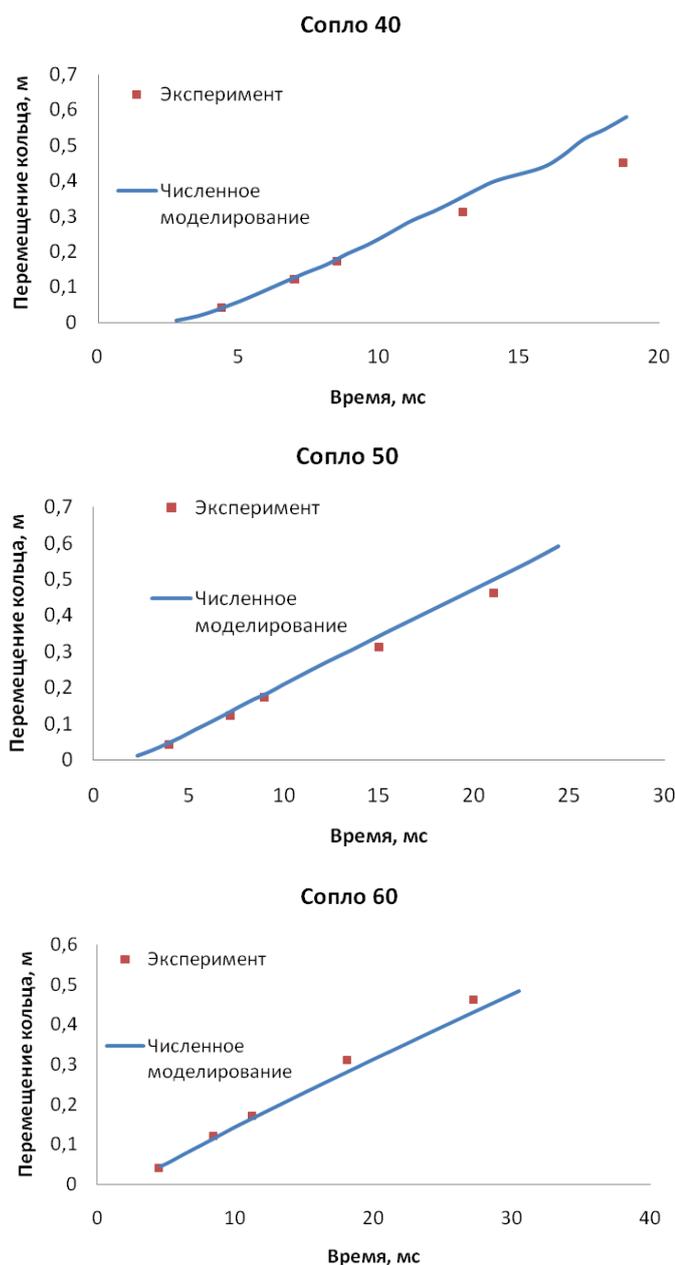


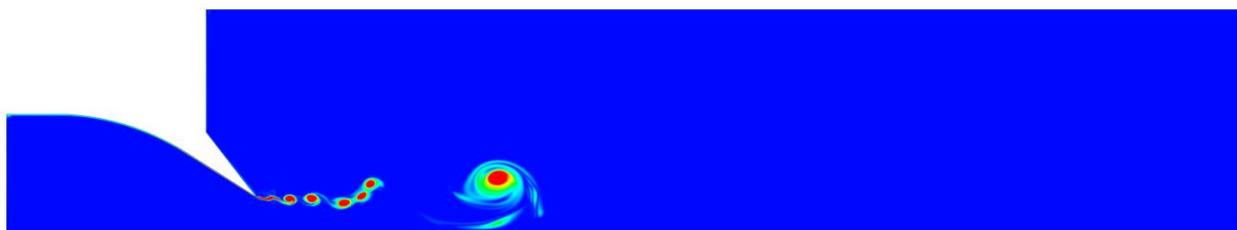
Рис. 33. Перемещение вихревого кольца

На рисунке 33 представлено сравнение положений вихревых колец. Видно, что на начальном участке траектории результаты расчета хорошо соответствуют результатам эксперимента. При дальнейшем перемещении кольца наблюдается небольшое расхождение между результатами расчета и эксперимента. Это объясняется воздействием вторичных вихрей меньшей интенсивности, процесс распада которых существенно отличается от осесимметричного. Данные вихри можно увидеть на рисунке 34, где представлено распределение завихренности в момент времени,

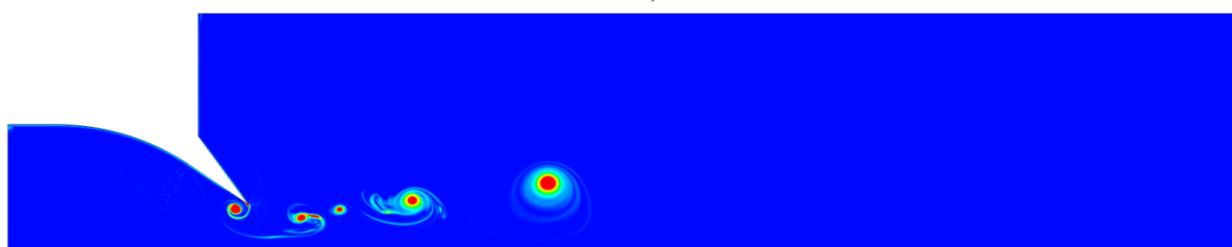
соответствующий прохождению вихревым кольцом точки с координатой  $X/D_c=3$ , где  $X$  – положение кольца,  $D_c$  – диаметр сопла.



(а)



(б)



(в)

Рис. 34. Распределение завихренности при прохождении вихревым кольцом точки с координатами  $X/D_c=3$ : (а) сопло 40; (б) сопло 50; (в) сопло 60

В данной точке проводилась оценка размеров вихревого кольца, которую дает численное моделирование. Радиус вихревого кольца определялся положением максимума завихренности в ядре. Для оценки размеров ядра вихревого кольца исследовался профиль модуля скорости вдоль линии, проходящей через центр вихревого ядра и параллельной оси движения кольца. Диаметр ядра определялся по положению максимальных значений в распределении модулей скорости внутри вихревого кольца (рис. 35). В соответствии с представлениями автомодельной теории,

относительный размер вихря  $\mu=a/R$  остается постоянным при движении вихря по траектории. При этом, с уменьшением размера сопла происходит увеличение относительного размера, что может быть связано с увеличением длины выдуваемой струи, образующей основное вихревое кольцо и вторичные вихри, и следовательно с увеличением относительного размера ядра основного вихря при достаточно близких условиях запуска.

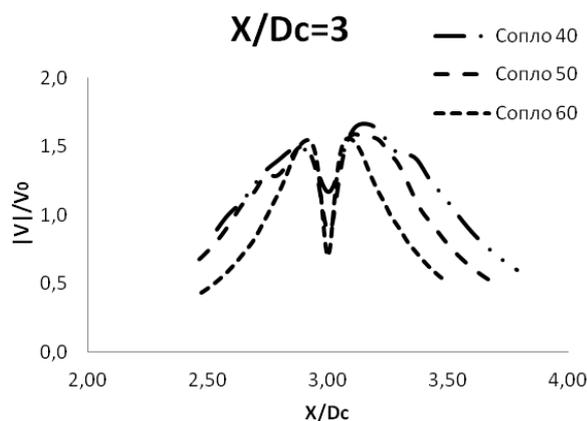


Рис. 35. Распределение модуля скорости в вихревом кольце

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 [20], который хорошо соотносится с полуэмпирическими моделями представленными другими авторами [10, 12, 25, 29] и описывается выражениями:

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

$$V(t) = V_0 \left( \alpha \frac{L(t)}{R_0} + 1 \right)^{-3}, \quad (12)$$

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

Здесь  $R_0$ ,  $V_0$  – начальный радиус и начальная скорость вихревого кольца соответственно;  $\alpha$  – коэффициент скорости расширения вихревого кольца.

Коэффициент  $\alpha$  был определен графически согласно рисунку 36 так, чтобы зависимость перемещения и скорости вихревого кольца, полученные по выражениям (12), хорошо соотносились с результатами эксперимента. Для всех вихревых колец  $\alpha \approx 0,004$ .

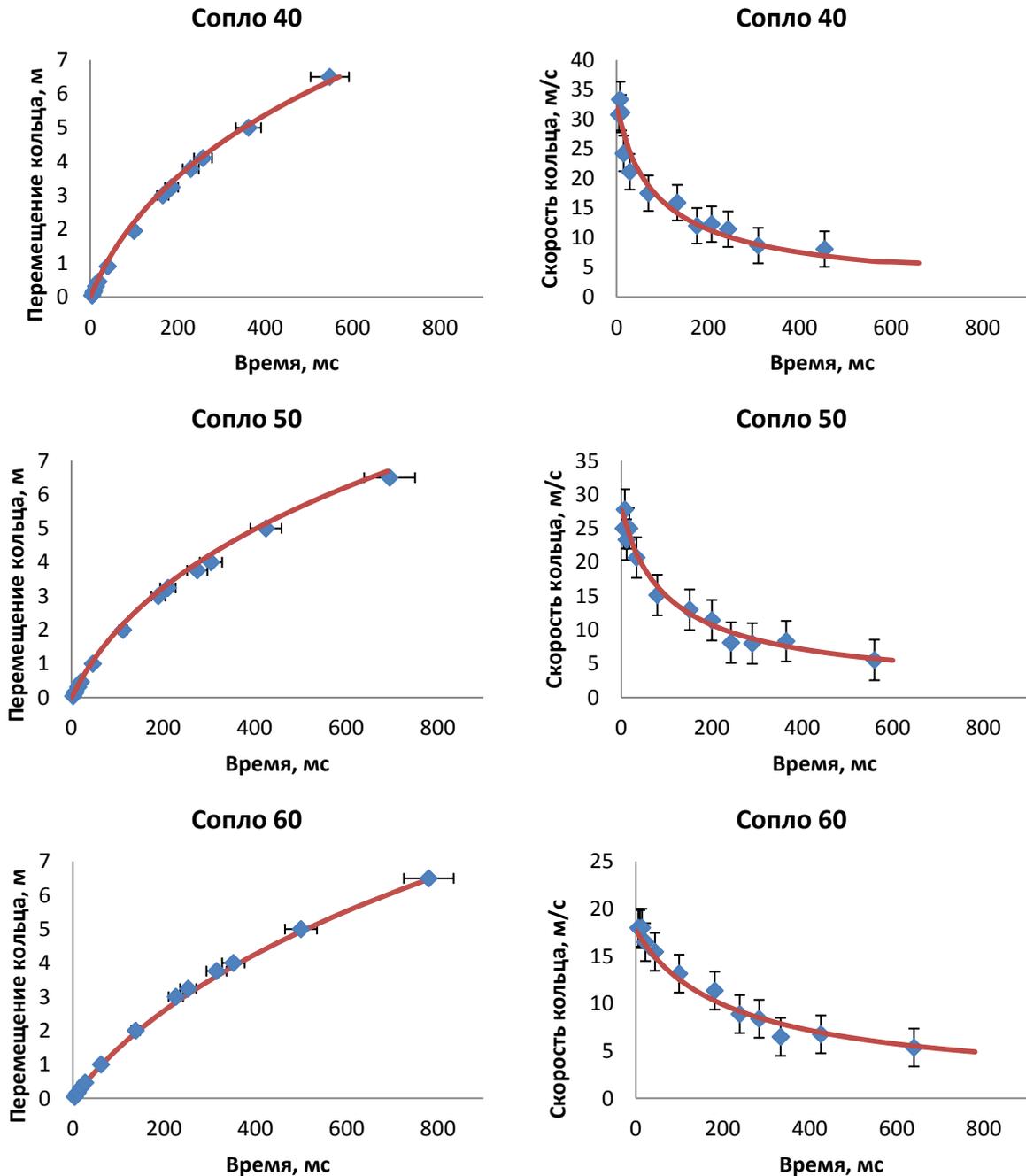


Рис. 36. Перемещение и скорость вихревого кольца:

◆ — результаты эксперимента; — выражение (12)

На основе совместного использования результатов натуральных экспериментов и численного моделирования были найдены все параметры,

входящие в выражение (3), что позволило провести сравнение значений основной частоты. Установленные свойства вихревых колец, используемые в автомоделных теориях для движения вихревого кольца и смещения частоты, представлены в таблице 9.

Таблица 9. 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

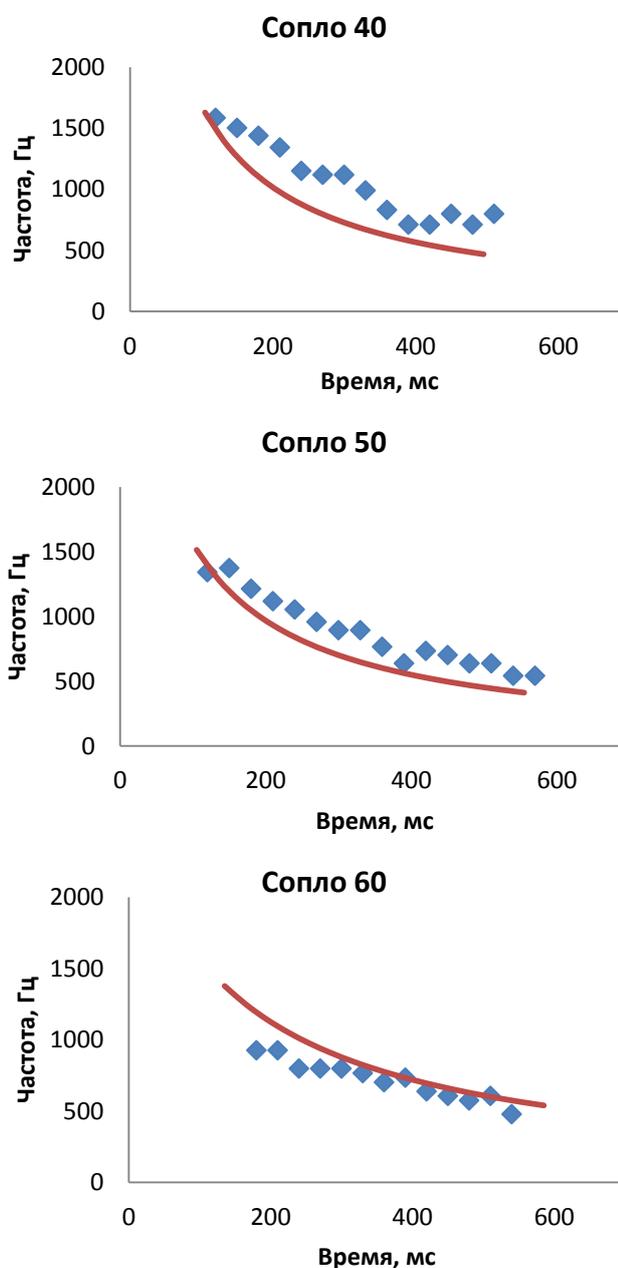


Рис. 37. Сравнение основной частоты излучения вихревых колец:

◆ — результаты эксперимента; — выражение (3)

Как можно увидеть на рисунке 37, значение основной частоты, полученное в эксперименте, для всех вихрей, качественно соотносится с результатами, полученными с помощью выражения (3). Ранее в разделе 2.2. экспериментально был отмечен факт увеличения разброса свойств вихревых колец с уменьшением диаметра сопла, что может объяснить увеличение количественного рассогласования результатов для вихревых колец меньших диаметров.

Для движущегося вихревого кольца, подставляя в (3) выражение (2) для поступательной скорости, можно получить для безразмерного числа Струхаля  $Sh_1 = f \cdot D/V$  выражение

$$Sh_1 = \frac{2}{\pi \cdot \mu^2 c(\mu)}. \quad (13)$$

Учитывая, что механизм излучения связан с колебаниями ядра, для которого более характерной является не скорость поступательного движения, а скорость вращения жидкости вокруг ядра  $U = \Omega_0 a/2$  (рис. 38), можно получить другое выражение

$$Sh_2 = \frac{1}{\pi \mu}. \quad (14)$$

При выполнении условия концентрации завихренности только в ядре, в предположении о ее распределении, близком к твердотельному вращению, что соответствует формулам (1)-(3), число Струхаля будет характеризоваться единственным безразмерным параметром задачи  $\mu$ . Наличие резкой границы между турбулентной атмосферой и ламинарным ядром говорит в пользу такого представления. Используя предположение, что свойства среднего течения в вихревом кольце на протяжении всей траектории подчиняются автомодельной теории [10, 12, 20] с постоянным  $\mu$ , получим, что число Струхаля должно оставаться постоянным при движении кольца. Однако накопление завихренности в турбулентной атмосфере может со временем искажать связь завихренности в тонком ядре  $\Omega_0$ , определяющем частоту излучения (1), с поступательной скоростью кольца (2), что приведет к

искажению безразмерной частоты (13) и возможному отличию ее от константы. Отношение (14) должно быть более устойчивым, однако в эксперименте легче следить за поступательной скоростью  $V(t)$ . Поэтому для проверки теоретического значения частоты на значительном участке траектории будут использованы значения поступательной скорости  $V(t)$  и меняющиеся в соответствии с автомодельной теорией геометрические характеристики вихревого кольца, которые в реальности могут не полностью соответствовать упрощенным представлениям автомодельной теории.

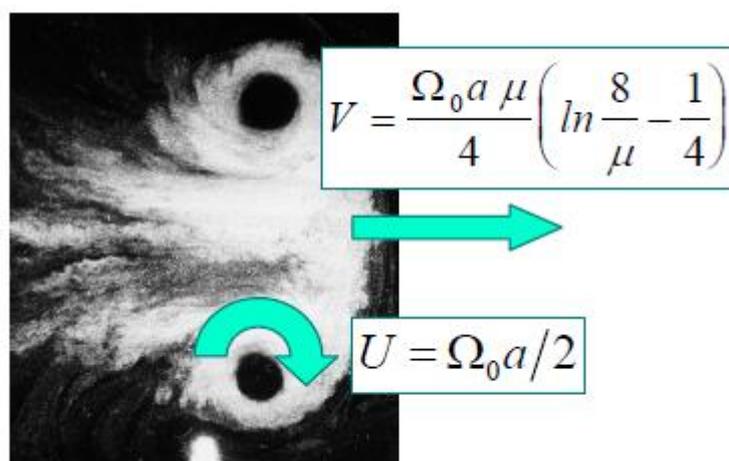


Рисунок 38. Турбулентное вихревое кольцо и характерные скорости, определяющие его динамику

Можно ввести числа Струхалия, связанные с диаметром сопла  $D_c$  или начальным диаметром вихря  $D_0$   $Sh_3 = f \cdot D_c / V$  и  $Sh_4 = f \cdot D_0 / V$  соответственно, которые различаются на постоянный множитель  $D_c / D_0$ . Однако постоянство выражений именно (13) или (14) будет соответствовать теоретическим представлениям о механизме генерации шума вихревым кольцом, описанным выше.

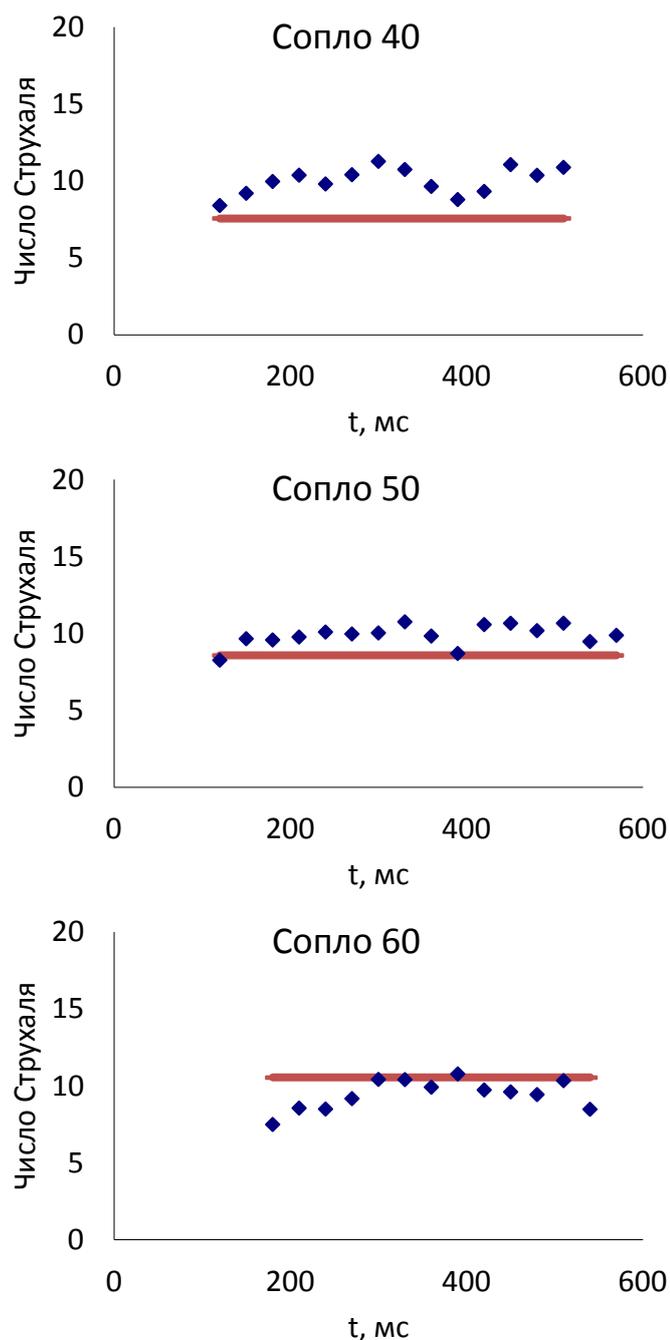


Рисунок 39. Сравнение числа Струхала (13) частоты излучения вихревых колец: ◆ эксперимент; — теория

На рисунке 39 приводится сравнение экспериментального значения числа Струхала  $Sh = f \cdot D/V$ , где значения  $f$  взяты из эксперимента, а величина  $D$  и  $V$  из автотемельной теории, с теоретическим выражением (13) на различных расстояниях от генератора, которое показывает удовлетворительное согласие с экспериментом для всех размеров сопла.

#### **Выводы по главе 4**

Предложен новый способ определения параметров вихревого кольца на значительном участке траектории. Для этого использовалась упрощенная осесимметричная численная схема расчета, в которую был заложен найденный экспериментально закон движения поршня. Такая схема должна хорошо работать именно на начальном участке, пока трехмерные эффекты не исказили значительно движение и параметры вихревых колец. Качество расчета проверялось сравнением с измеренным движением вихревого кольца на начальном участке. Это позволило определить геометрические параметры вихревых колец (диаметр, радиус ядра) на начальном участке, которые являются главными параметрами автомодельной теории движения вихревого кольца. Через формулы автомодельной теории были получены средние геометрические и динамические характеристики вихревых колец на всей траектории, включая расстояния, расположенные на большом удалении от среза сопла. Это позволило сравнить с экспериментом значение частоты пика в спектре акустического излучения вихревых колец на всей траектории, поскольку она выражается через медленно меняющиеся средние параметры вихря.

## **ГЛАВА 5. ЛОКАЛИЗАЦИЯ И МОДАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИСТОЧНИКОВ ШУМА ВИХРЕВОГО КОЛЬЦА С ПОМОЩЬЮ МИКРОФОННЫХ РЕШЕТОК**

В главе 4 была рассмотрена возможность применения многомикрофонных антенн для получения дополнительных знаний о акустических свойствах вихревых колец. Приведено описание и результаты полученные при использовании антенны для метода азимутальной декомпозиции и антенны для метода бимформинг.

### **5.1. Исследование пространственной структуры звукового поля турбулентного вихревого кольца методом азимутальной декомпозиции**

Дополнительную информацию о положении и структуре излучения шума турбулентными потоками может дать метод азимутальной декомпозиции [107-110, 53, 54]. Данный метод основан на синхронном многоканальном сборе и анализе акустических сигналов от решетки микрофонов, расположенных в углах правильного шестиугольника, и позволяет измерять коэффициенты разложения звукового поля в ряд Фурье по азимутальному углу.

Метод азимутальной декомпозиции позволяет разложить далее звуковое поле на азимутальные гармоники (по углу  $\theta$ ) на цилиндрической поверхности вокруг оси турбулентного течения (рис. 40). На основе полученной информации о характере азимутальных мод (свойства направленности и/или взаимных корреляций), можно сделать выводы о структуре и положении источников шума, что позволит в дальнейшем принять более адекватные меры по борьбе с данными источниками.

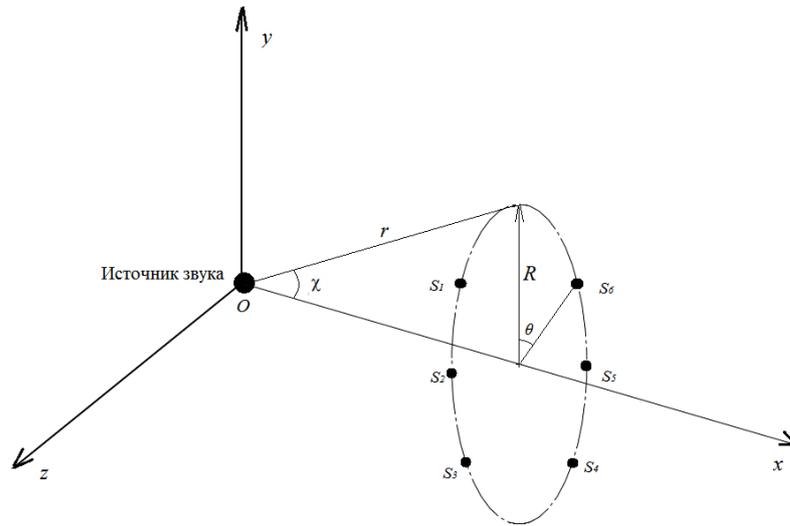


Рис. 40. Система координат для метода азимутальной декомпозиции ( $\theta$  – азимутальный угол,  $\chi$  – полярный угол. Ось  $x$  совпадает с осью движения кольца)

Сформулируем задачу азимутального разложения следующим образом. Пусть сигнал  $p(r, \theta, \chi, t)$ , создаваемый в дальнем поле некоторым точечным источником, расположенным в начале координат (рис. 40), является суперпозицией не более чем  $N$  первых азимутальных мод (от 0 до  $N-1$ ):

$$p(r, \theta, \chi, t) = A_0(r, \chi, t) + \sum_{n=1}^{N-1} (A_n(r, \chi, t) \cos n\theta + B_n(r, \chi, t) \sin n\theta) \quad (15)$$

Рассмотрим нерегулярное в общем случае расположение микрофонов по азимутальному углу, т.е. зафиксируем координаты  $r$  и  $\chi$ , что будет означать нахождение наблюдателя на окружности радиуса  $R=r \sin \chi$ . Тогда, в каждый момент времени, для нахождения  $2N-1$  коэффициента разложения (15) нужно иметь результаты, как минимум,  $2N-1$  измерений поля при различных азимутальных углах  $\theta$ . Действительно, тогда коэффициенты разложения (15) можно однозначно определить из решения линейной системы уравнений :

$$f = Q^{-1}s,$$

где:

$$Q = \begin{pmatrix} 1 & \cos \theta_1 & \sin \theta_1 & \dots & \sin((N-1)\theta_1) \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & \cos \theta_{2N-1} & \sin \theta_{2N-1} & \dots & \sin((N-1)\theta_{2N-1}) \end{pmatrix}, \quad (16)$$

$$f = \begin{pmatrix} A_0(r, \chi, t) \\ A_1(r, \chi, t) \\ B_1(r, \chi, t) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ A_{N-1}(r, \chi, t) \\ B_{N-1}(r, \chi, t) \end{pmatrix}, \quad s = \begin{pmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ s_{2N-1}(t) \end{pmatrix}$$

Таким образом, выражение (16) дает формальное решение задачи об определении коэффициентов азимутального расположения звукового поля с использованием микрофонов, расположенных в некотором поперечном относительно азимутальной оси сечении, на фиксированном от нее расстоянии  $R$ . Условие  $\det Q \neq 0$  обеспечивается выбором соответствующих азимутальных углов.

Поскольку в реальных ситуациях не всегда можно априори гарантировать, что в азимутальной структуре поля будет наблюдаться именно  $N$  первых мод (допустим, что неизвестно, только ли дипольное излучение будет доминировать в дальнем поле или же будет значимой и квадрупольная часть), может оказаться полезным приведенную выше формулировку несколько изменить: добавить либо еще один микрофон, чтобы иметь возможность проверить условие  $\|A_N\|, \|B_N\| \ll \|A_i\|, \|B_i\|$ ,  $i = \overline{0, N-1}$  в том случае, если известно, что  $\|A_N\|, \|B_N\|$  (в качестве нормы сигналов можно

брать, например, их среднеквадратичные значения). Тогда соответствующим образом изменится матрица  $Q$  в формуле (16).

На основе полученных коэффициентов вектора  $f$  вычисляются осредненные спектры в выбранных полосах частот  $\omega_1 < \omega < \omega_2$ :

$$a_0^2(x, \Delta\omega) = \frac{1}{\Delta\omega} \int_{\omega_1}^{\omega_2} \langle \hat{A}_0 \hat{A}_0^* \rangle(x, \omega) d\omega$$

$$a_n^2(x, \Delta\omega) = \frac{1}{2\Delta\omega} \int_{\omega_1}^{\omega_2} \langle \hat{A}_0 \hat{A}_0^* \rangle(x, \omega) d\omega, \quad n > 0$$

$$b_n^2(x, \Delta\omega) = \frac{1}{2\Delta\omega} \int_{\omega_1}^{\omega_2} \langle \hat{B}_0 \hat{B}_0^* \rangle(x, \omega) d\omega, \quad n > 0$$

Каждое выражение определяет энергию соответствующей моды в заданной полосе частот в данном сечении. В частности,  $a_0^2$  дает вклад осесимметричной моды в общий шум, а  $(a_1^2 + b_1^2)$  и  $(a_2^2 + b_2^2)$  определяют вклад 1-й и 2-й мод. Отметим, что  $a_n^2 = b_n^2$  для  $n \geq 1$  из-за средней осесимметричности течения.

В работе [53] рассмотрен модельный пример о пролете идеального гармонического источника через решетку микрофонов с азимутальными составляющими квадрупольного типа. На рисунке 41, представлена направленность квадрупольных составляющих.

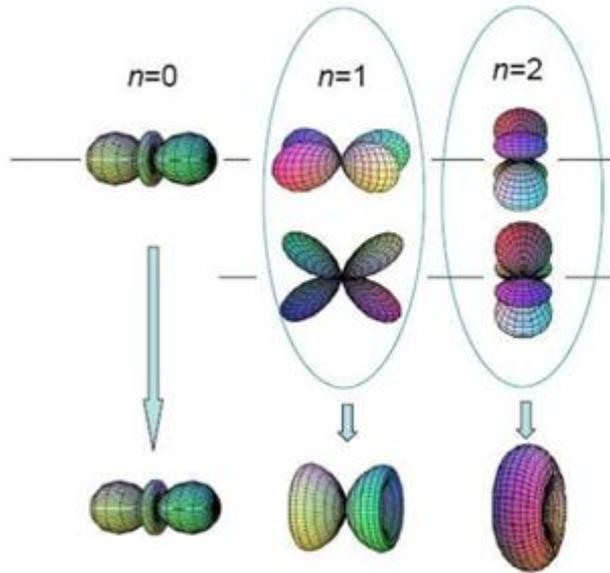


Рис. 41. Направленность квадрупольных составляющих

Вклад каждой квадрупольной составляющей тогда можно оценить исходя из выражений:

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

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

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

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

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

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

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  $q_0 = 0,6$ ,  $q_1 = 0,4$ ,  $q_2 = 0,1$ ,  $q_3 = 0,07$  представлена на рисунке 42.

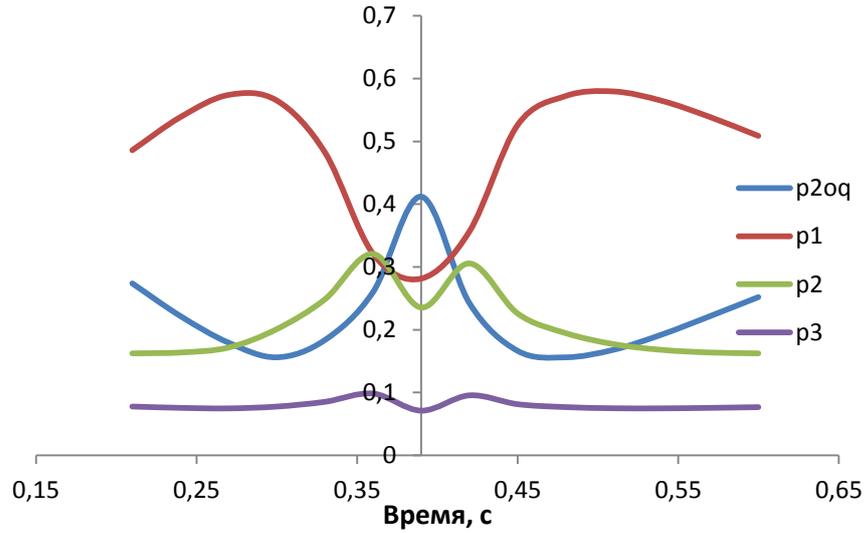


Рис. 42. Вклад различных азимутальных составляющих в суммарное квадрупольное излучение

Для исследования вихревого кольца, на базе ЛМГШиМА был проведен эксперимент, включающий в себя регистрацию шума кольца в дальнем поле (микрофоны 1-3, 5) и траекторные исследования (микрофоны 13-16, 6). Схема эксперимента и фотография проведения представлены на рисунках 43 и 44.

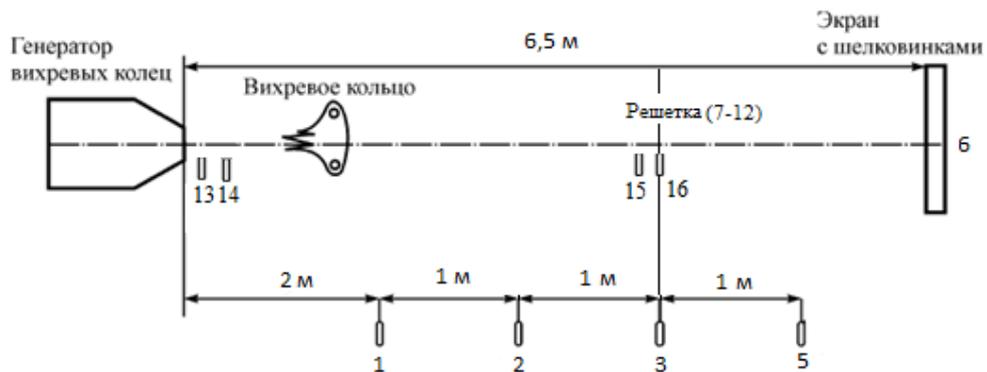


Рис. 43. Схема эксперимента



Рис. 44. Фотография решетки для азимутальной декомпозиции

По методике, представленной во второй главе, проводилась разбраковка реализаций. Обработка методом азимутальной декомпозиции проводилась по следующему алгоритму:

- в каждом пуске проводилось вычисление коэффициентов азимутального разложения по времени;
- затем сигнал в плоскости решетки определялся как триггерный и от него задавалась положительная и отрицательная задержка от триггерного сигнала;
- строился спектр сигналов по коротким временным реализациям для одного пуска ( $\Delta t = 31,25$  мс);
- такие спектры строились для всех отобранных реализаций (рис. 45);
- для спектра, полученного на первом интервале (задержка около 120 мс) использовалась полоса частот шириной 300 Гц ( $F_{\max} \pm 150$  Гц) и определялась звуковая мощность в  $\text{Па}^2/\text{Гц}$  (рис.45);
- определялась эта величина для всех спектров в этом временном отрезке и вычислялось среднее значение;
- операцию повторялась для всех временных интервалов.

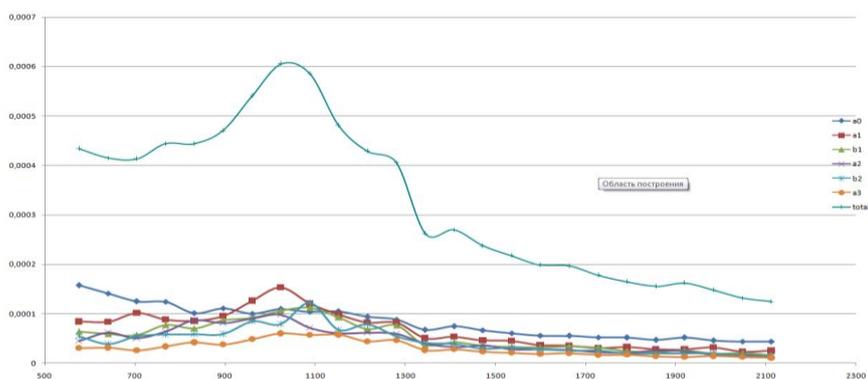


Рис. 45. Усредненный спектр в области решетки

В результате получена направленность шума вихревого кольца. Направленность излучения вихревого кольца представлена на рисунке 46.

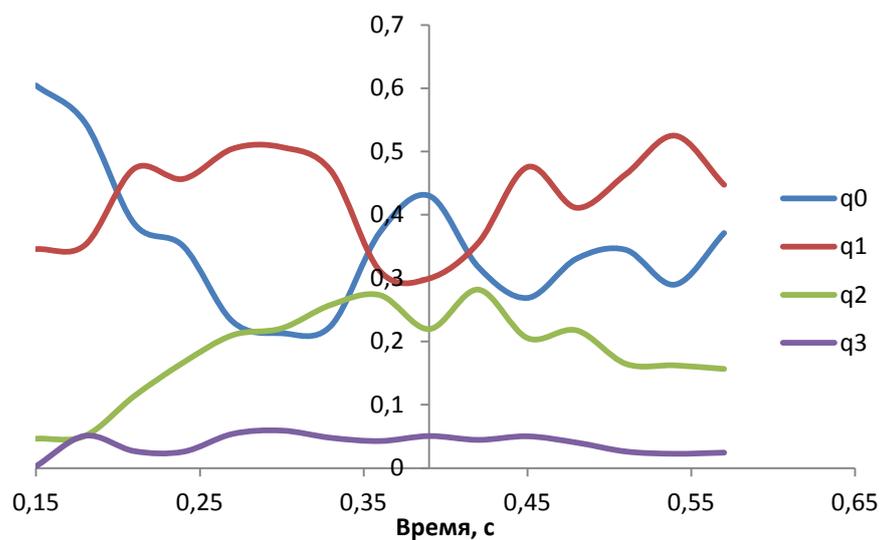


Рис. 46. Направленность шума вихревого кольца

Прямое сравнение результатов представленных на рисунках 42 и 46 невозможно, вследствие неизвестности амплитуд  $q_0$ ,  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $q_3$ . 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.

## **5.2. Адаптация метода многоканальных микрофонных антенн (бимформинг) для исследования локализации источников в вихревом кольце**

Полученные в первой части работы результаты подтвердили возможность использования однократной временной реализации для шума вихревого кольца. Это делает возможным разработку методики локализации источников шума летящего вихревого кольца с помощью многомикрофонных антенн (бимформинг). С помощью данного метода можно получить информацию о распределении акустических источников в пространстве, определить уровень звукового давления данных источников на представляющих интерес частотах. Методы бимформинга широко применяется в аэроакустических исследованиях [111-114].

Для измерения шума вихревого кольца в дальнем поле применялась 9-лучевая 54-микрофонная антенна Briel & Kjaer типа WA-1676-W-003 с неполным числом микрофонов. Использовались 26 четвертьдюймовых микрофонов Briel & Kjaer типа 4958. В связи с тем, что микрофонов 26, а антенна имеет 54 канала, требовалось определить оптимальное расположение данных микрофонов в антенне среди доступных каналов.

Разрешающая способность микрофонной антенны (минимальное значение расстояния, при котором два звуковых источника могут быть однозначно разделены между собой на карте локализации), определяется по формуле:

$$R = \alpha \cdot \frac{z}{D} \cdot \lambda,$$

где  $\alpha = 1.22$  – коэффициент, определяемый для круговой апертуры массива (по аналогии с критерием Рэлея для оптического разрешения);  $z$  – расстояние от микрофонной антенны до плоскости, в которой находятся звуковые источники, представляющие интерес;  $D$  – максимальный диаметр микрофонной антенны с круговой апертурой;  $\lambda$  – длина волны звукового источника.

Таким образом, при равном удалении микрофонной антенны от измерительной плоскости и при одной и той же длине волны источника, разрешающая способность антенны зависит лишь от максимального диаметра микрофонной антенны  $D$ . Следовательно, 26 микрофонов в антенне необходимо расположить на её внешних контурах. Расположение микрофонов в микрофонной антенне показано на рисунке 47.

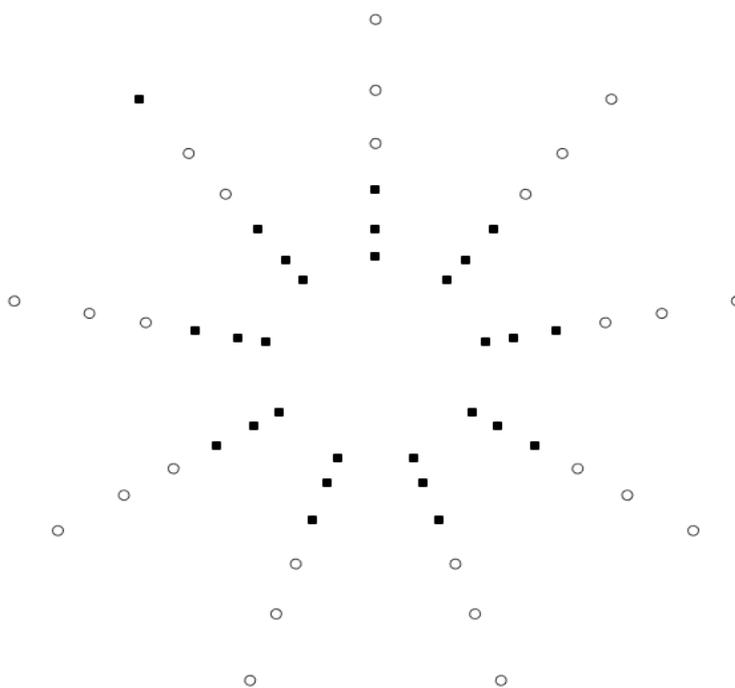


Рис. 47. Расположение микрофонов в антенне при исследовании шума вихревого кольца методом бимформинг. ○ – положение микрофонов;  
■ – выключенные каналы

Наличие боковых лепестков в диаграмме направленности приводит к тому, что волны с направлений, отличных от фокусных, будут просачиваться в измерения с направления главного лепестка. Это обуславливает появление ложных пиков в измеренной карте локализации. Оптимальное положение микрофонов в антенне характеризуется низким максимальным уровнем боковых лепестков ( $MSL$  – *Maximum Sidelobe Level*), определяемым относительно уровня главного лепестка. Функция  $W(\mathbf{K})$ , определяющая диаграмму направленности, описывается следующей формулой:

$$W(\mathbf{K}) = \sum_{m=1}^M e^{i\mathbf{K} \cdot \mathbf{r}_m}$$

Здесь  $\mathbf{K} = \hat{\mathbf{k}} - \hat{\mathbf{k}}_0$  – разница проекций волновых векторов плоской волны  $\mathbf{k}$ , падающей с фокусного направления, и плоской волны  $\mathbf{k}_0$ , падающей с направления, отличного от фокусного. Радиальный профиль диаграммы направленности  $W_p(K)$  можно определить по формуле:

$$W_p(K) \equiv 10 \cdot \lg \left[ \max_{|\mathbf{K}|=K} |W(\mathbf{K})|^2 / M^2 \right]$$

На его основе можно определить функцию максимального уровня бокового лепестка:

$$MSL(K) \equiv \max_{K_{\min}^0 < K' \leq K} W_p(K') = 10 \cdot \lg \left[ \max_{K_{\min}^0 < |\mathbf{K}| \leq K} |W(\mathbf{K})|^2 / M^2 \right]$$

Здесь  $K_{\min}^0 = 2,44\pi / D$  – первый минимум функции диаграммы направленности, соответствующий круговой апертуре с диаметром  $D$ . Чтобы перейти от абсолютной величины разности проекций волновых векторов к частотам, можно воспользоваться выражением  $|\mathbf{K}| \leq 2k = 2\omega / c = 4\pi f / c$  и построить функцию максимального бокового лепестка в зависимости от частоты излучения источника. Путем минимизации данной целевой функции можно добиться низких максимальных уровней боковых лепестков в диаграмме направленности, что напрямую влияет на качество локализации звуковых источников с помощью оптимизированной микрофонной антенны [112]. На основе выражений, описанных выше, было установлено, что на представляющих интерес частотах (до 2000 Гц) при внешнем распределении микрофонов в антенне уровень бокового лепестка не превышает 6,1 дБ.

Диаграмма направленности (показана сплошной кривой) и функция максимального бокового лепестка (показана штриховой линией) в зависимости от частоты излучения звуковых источников при распределении 26 микрофонов на внешних контурах микрофонной антенны изображены на рисунке 48.

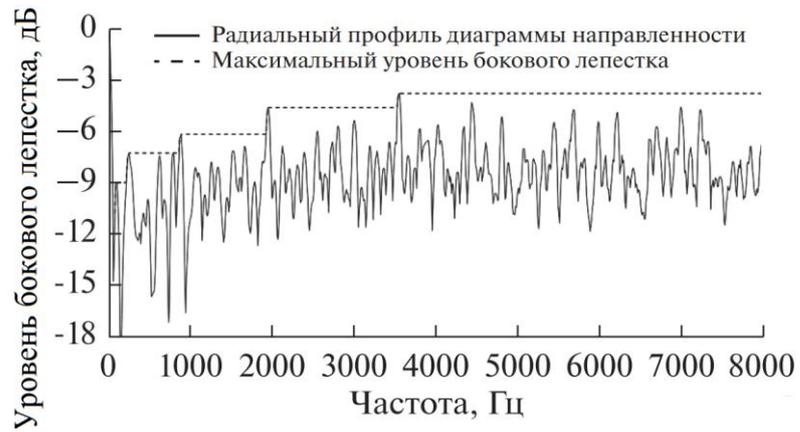
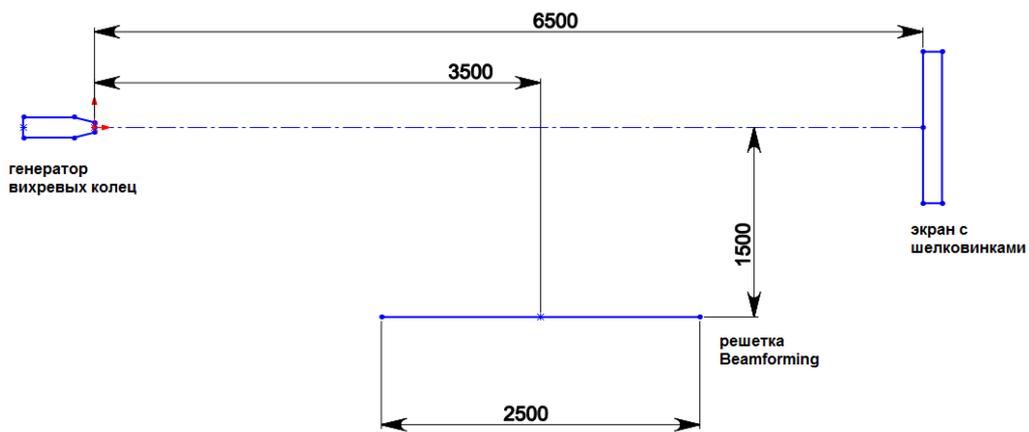


Рис. 48. Диаграмма направленности и функция максимального бокового лепестка при распределении микрофонов на внешних контурах антенны

Схема проведения эксперимента и фотография представлены на рисунке 49.



(а)



(б)

Рис. 49. Схема расположения антенны (а) и фотография эксперимента (б)

Измерения проводились при использовании соплового насадка диаметром 50 мм. Запись шума выполнялась в течение 10 с. Это время включает в себя участок времени до запуска генератора, шум кольца и шум после разрушения кольца при ударе об экран с шелковинками. В этом случае при анализе временных сигналов по характерным всплескам на временной реализации проводилось определение начала движения кольца и начала распада кольца. 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 (рис. 50).

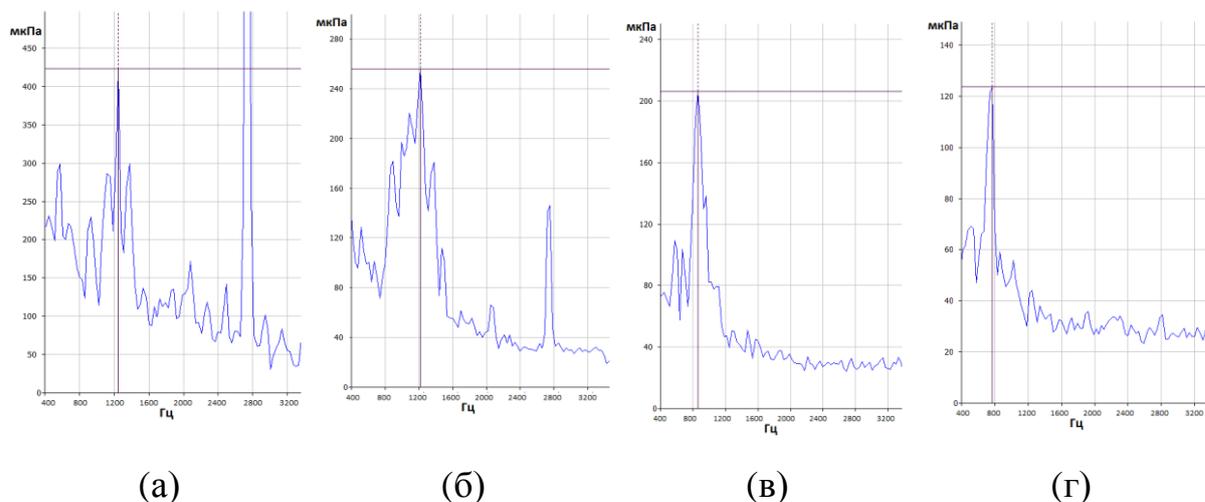


Рис. 50. Спектры шума вихревого кольца для одной временной реализации, усредненные по 26-ти микрофонам антенны для бимформинга:

- (а) – задержка 150 мс; (б) – задержка 240 мс; (в) – задержка 330 мс;  
 (г) – задержка 480 мс

Использование микрофонов антенны для усреднения спектров, также как и микрофонов решетки азимутальной декомпозиции, может приводить к улучшению статистической оценки спектров однократной реализации в том

случае, если расстояние между микрофонами больше характерного размера корреляции звукового поля. Как отмечалось выше, шум вихревого кольца состоит из 5 квадрупольей, каждый из которых излучает независимо от других. Поэтому, вообще говоря, можно лишь пятикратно улучшить статистику при получении спектров и использовать все 26 микрофонов необязательно. При этом в направлениях вперед-назад, где доминирует только осесимметричное квадрупольное излучение, статистика практически улучшаться не будет, поскольку звуковое поле по этим направлениям состоит лишь из одной моды, с корреляцией, близкой к единице (рис. 50 (а)). Сравнивая спектры на рисунках 24 и 50 можно видеть их полную идентичность в частотной области. Поскольку антенна для бимформинга установлена вдвое дальше от траектории, чем решетка для метода азимутальной декомпозиции, прямое сравнение амплитуд затруднительно.

Обработка методом бимформинг производилась в программе постобработки сигналов NSI Array Acoustic Post-Processing методом Beamforming Delay and Sum [112, 113, 115, 116] на участках длиной  $T=31,2$  мс, соответствующих участкам, на которых были подготовлены спектры шума для выбранной временной реализации. Для этого указывалось время начала анализируемого интервала и время его окончания в десятисекундной записи. 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. 50). Использовался динамический диапазон 5 дБ. Полученные карты локализации источников шума, связанных с летящим вихревым кольцом, представлены на рисунке 51.

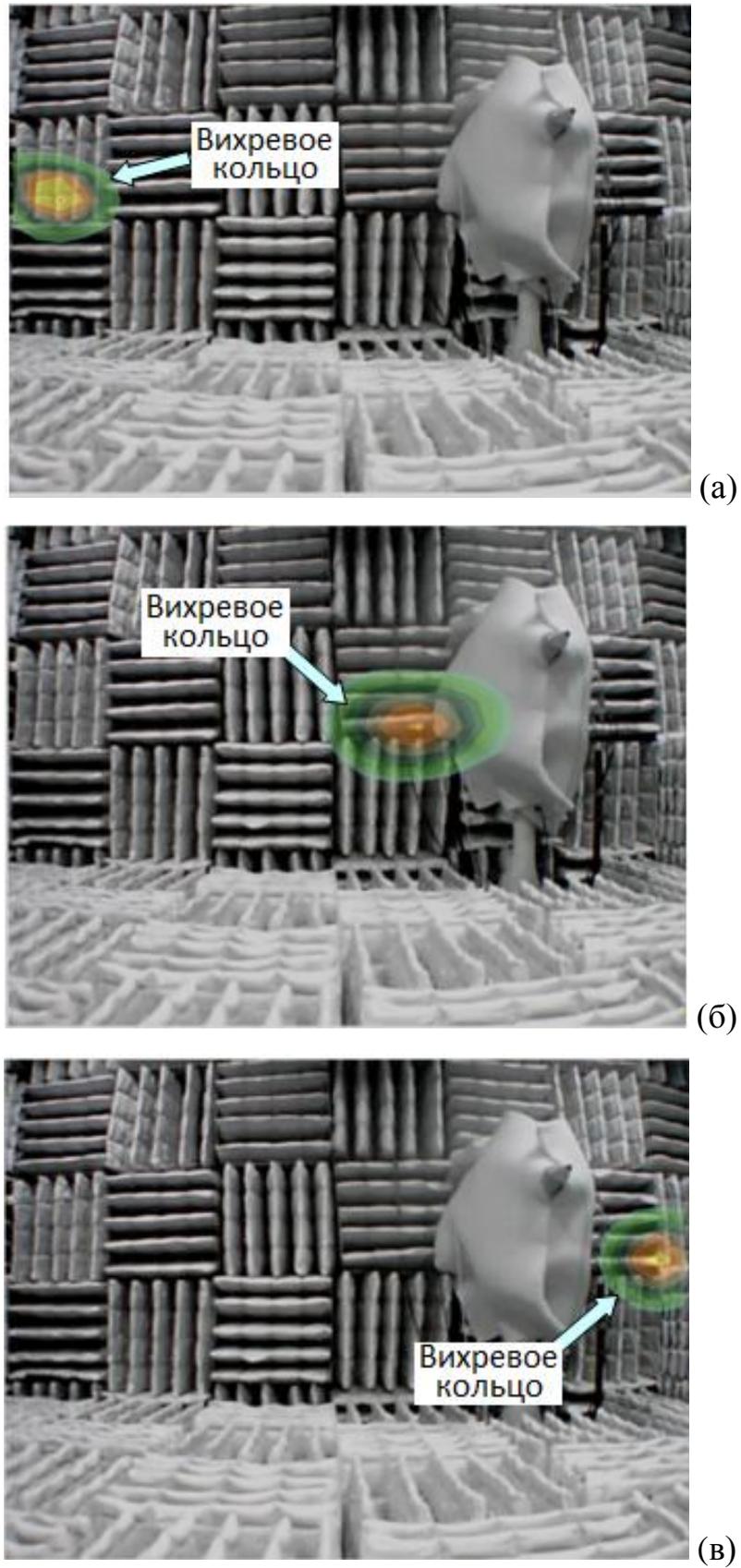


Рис. 51. Карта локализации источников шума в моменты времени:  
(а) задержка 150 мс; (б) задержка 240 мс; (в) задержка 300 мс

Как можно увидеть на рисунке 51, 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. Для того, чтобы убедиться, что полученный источник действительно является вихревым кольцом, проводилось сравнение положения этого источника в каждый момент времени с результатами траекторных экспериментов, представленных в главе 2. 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 52, 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 [117].

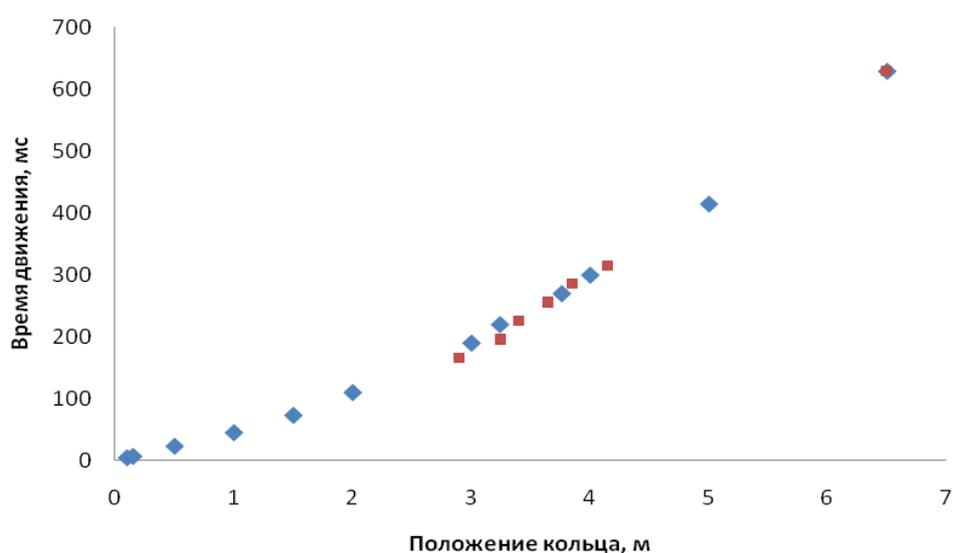


Рис. 52. Сравнение положения вихревого кольца. ◆ – положение вихревого кольца по результатам траекторных экспериментов; ■ – положение вихревого кольца, полученное с помощью метода бимформинг

## Выводы к главе 5

Таким образом, в рамках данного этапа проекта проведено исследование пространственной структуры звукового поля турбулентного вихревого кольца методом азимутальной декомпозиции. В результате получены вклады различных азимутальных составляющих в суммарное квадрупольное излучение. По направленности шума вихревого кольца четко видна осесимметричная, первая и вторая моды. Третья мода практически не вносит свой вклад в шум вихревого кольца.

Для локализации положения турбулентного вихревого кольца бесконтактным акустическим способом была разработана специальная методика многоканальной обработки данных эксперимента с использованием микрофонной антенны для бимформинга. В результате постобработки многоканальных данных удалось провести локализацию свободно летящего вихревого кольца на различных участках траектории. Разработанная методика основывалась на 26 микрофонах, установленных в 9-ти лучевую 54-канальную микрофонную антенну Brüel&Kjær. Таким образом, адаптация метода многоканальных микрофонных антенн, для локализации положения свободно летящего вихревого кольца показала принципиальную возможность его бесконтактной диагностики по излучаемому шуму.

Показана возможность получения осредненных спектров для каждого пятна локализации источников шума вихревого кольца с использованием микрофонов антенны для бимформинга.

## 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 Струхалья, 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 автотельных 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.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Ламб Г. Гидродинамика. – М.: ОГИЗ, 1947. – 928 с.
2. Kelvin L. On vortex atoms // *Phil. Mag.* – 1867. – V. 34. – P. 15–24.
3. Thomson J.J. A treatise on the motion of vortex rings. – London.: Macmillan, 1883. — 124 p.
4. Гельмгольц Г. Основы вихревой теории. – М. – Ижевск: Изд-во Ин-та компьютер. исслед-й, 2002. – 82 с.
5. Hicks W.M. Researches on the theory of vortex rings. Part II // *Phil. Trans. Roy. Soc. London.* – 1885. – Vol. 176. – P. 725–780.
6. Saffman P.G. The velocity of viscous vortex rings // *Stud. Appl. Math.* – 1970. – Vol. 49. – P. 371–380.
7. Fraenkel L.E. On steady vortex rings of small cross-section in an ideal fluid // *Proc. Roy. Soc. Lond. A.* – 1970. – Vol. 316. – P. 29-62.
8. Bliss D.B. The dynamics of curved, rotational vortex lines. – M.S. thesis, MIT, 1970. – 110 P.
9. Луговцов Б.А. О движении турбулентного вихревого кольца и переносе им пассивной примеси // *Некоторые проблемы математики и механики.* – Л.: Наука, 1970. – С. 76–93.
10. Johnson G.M. An empirical model on the motion of turbulent vortex rings // *AIAA Journal.* – 1971. – Vol. 9. – P. 763–764.
11. Maxworthy T. The structure and stability of vortex rings // *J. Fluid Mech.* – 1972. – Vol. 51. – P. 15–32.
12. Maxworthy T. Turbulent vortex rings // *J. Fluid Mech.* – 1974. – Vol. 64, №2. – P. 227-239.
13. Maxworthy T. Some experimental studies of vortex rings // *J. Fluid Mech.* – 1977. – Vol. 81. – P. 465–489.

14. Тарасов В.Ф., Якушев В.И. Экспериментальные исследования переноса примеси турбулентным вихревым кольцом // ПМТФ. – 1974. – №1. – С. 130–136.
15. Shariff K., Leonard A. Vortex rings // *Ann. Rev. Fluid Mech.* –1992. – Vol. 24. – P. 235–279.
16. Ван-Дайк М. Альбом течений жидкости и газа. – М.: Мир, 1986. – 184 с.
17. Владимиров В.А., Тарасов В.Ф. Структура турбулентности вблизи ядра кольцевого вихря // Докл. АН СССР. – 1979. – Т. 245, № 6. – С. 1325–1328.
18. Владимиров В.А., Луговцов Б.А., Тарасов В.Ф. Подавление турбулентности в ядрах концентрированных вихрей // ПМТФ. – 1980. – № 5. – С. 69–76.
19. Johari H. Chemically reactive turbulent vortex ring // *Phys. Fluids.* – 1995. – №7. – P. 2420–2427.
20. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Проблемы гидродинамики и их математические модели. – М.: Наука, 1977. – 416 с.
21. Glezer A., Coles D. An experimental study of a turbulent vortex ring // *J. Fluid Mech.* – 1990. – Vol. 211. – P. 243–284.
22. Тарасов В.Ф. Оценка некоторых параметров турбулентного вихревого кольца // Динамика сплошной среды: сб. науч. тр. / СО РАН СССР. – 1973. – Вып. 14. – С. 120–127.
23. Sallet D.W., Widmayer R.S. An experimental investigation of laminar and turbulent vortex rings in air // *Z. Flugwiss.* – 1974. – Vol.22. – P. 207–215.
24. Ахметов Д.Г., Кисаров О.П. Гидродинамическая структура кольцевого вихря // ПМТФ. – 1966. – № 4. – С. 120–123.
25. Sulivian J.P., Widnall S.E., Ezekiel S. Study of vortex rings using a laser doppler velocimeter // *AIAA J.* – 1973. – Vol.11. – P. 1384-1389.

26. Sullivan I., Niemela J., Hershberger R., Bolster D., Donnelly R. Dynamics of thin vortex rings // *J. Fluid Mech.* – 2008. – Vol. 609. – P. 319-347. doi:10.1017/S0022112008002292.
27. Ахметов Д.Г. Формирование и основные параметры вихревых колец // *Прикладная механика и техническая физика.* – 2001. – Т. 42, № 5. – С. 70–83.
28. Ахметов Д.Г. Модель формирования вихревого кольца // *ПМТФ.* – 2008. – Т. 49, № 6. – С. 25-36.
29. Ахметов Д.Г. Вихревые кольца. – Новосибирск: Академ. Издат. «ГЕО». – 2007. – 151 с.
30. Стручаев А.И. Перенос «пассивной» примеси вихревым кольцом при его взаимодействии с препятствием // *Физика аэродисперсн. систем.* – 2001. – №39. – С. 195-205.
31. Стручаев А.И., Копыт Н.Х.. Роль подавления турбулентных пульсаций в уменьшении потерь переносимой примеси из ядра вихревого кольца // *Физика аэродисперсн. систем.* – 2001, № 38. – С. 18-27.
32. Das D., Bansal M., Manghnani A. Generation and characteristics of vortex rings free of piston vortex and stopping vortex effects. // *J. Fluid Mech.* — 2017. — Vol. 811. — P. 138–167.
33. Weigand A., Garib M. On the evolution of laminar vortex rings // *Exp. Fluids.* – 1997. – Vol. 22. – P. 447–457.
34. Sun Z., Bruecker C. Investigation of the Vortex Ring Transition using Scanning Tomo-PIV // *Experiments in Fluids.* – 2017. – Vol. 58 (4). doi: 10.1007/s00348-017-2322-1.
35. Tinaikar A., Advait S., Basu S. Understanding evolution of vortex rings in viscous fluids // *J. Fluid Mech.* – 2018. – Vol. 836. – P. 873-909. doi:10.1017/jfm.2017.815.
36. Bouremel Y., Ducci A. Scalar mixing and strain dynamics methodologies for PIV/LIF measurements of vortex ring flows // *Physics of Fluids.* – 2017. – Vol. 29. – No. 013602. doi: 10.1063/1.4973822

37. Arévalo G., Hernández R.H., Nicot C, Plaza F. Particle image velocimetry measurements of vortex rings head-on collision with a heated vertical plate // *Phys Fluids*. – 2010. – Vol. 22. No– 053604. doi: 10.1063/1.3410800
38. Murugan T., De. S., Dora L., Das D. Numerical Simulation and PIV study of Formation and Evolution of Compressible Vortex Ring // *Shock waves*. – 2012. –Vol. 22 (1). – P. 69-83.
39. Dora L., Saravanan D., Karunakar K., Das D. Characteristics of Embedded-Shock-Free Compressible Vortex Rings: A Detailed Study Using PIV // *Advances in Mechanical Engineering*. – 2011. – Vol. 3. – No. 650871. doi:10.1155/2011/650871
40. Копьев В.Ф., Зайцев М.Ю., Копьев В.А. Применение TR PIV для исследования течения в ядре вихревого кольца // *Материалы III Отраслевой конференции по измерительной технике и метрологии для исследований летательных аппаратов, КИМИЛА 2018 (5–6 июня, Жуковский)*. – Жуковский. — 2018. – С. 345-358.
41. Kelvin L. Vibrations of a columnar vortex // *Phil. Mag.* – 1880. – Vol. 10. – P. 155–168.
42. Saffman P.G. The number of waves on unstable vortex rings // *J. Fluid Mech.* – 1978. – Vol.84. – P. 625-639.
43. Widnall S.E., Tsai S.Y. The instability of a thin vortex ring of constant vorticity // *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* – 1977 – Vol. 287.– №1344– P. 273-305.
44. Уиднел Ш. Структура и динамика вихревых нитей. // *Механика. Новое в зарубежной науке. Вихревые движения жидкости. Устойчивость и отрыв пограничного слоя, свободные и квантовые вихри*. – М.: Мир, 1979.– с. 126-159.
45. Копьев В.Ф., Чернышев С.А., Колебания вихревого кольца, возникновение в нем турбулентности и генерация звука // *УФН*. – 2000. – Т.170, № 7. – С. 713-742.
46. Владимиров В.А., Тарасов В.Ф. Об упругости закрученных потоков // *ДАН СССР*. – 1980. – Т.253, №3. – С. 565-568.

47. Владимиров В.А. Аналогия эффектов стратификации и вращения. // В кн." Нелинейные проблемы теории поверхностных и внутренних волн". – Новосибирск: Наука, СО – 1985. – 318 с.
48. Зайцев М.Ю., Копьев В.Ф., Мунин А.Г., Потокин А.А. Излучение звука турбулентным вихревым кольцом // Доклады академии наук СССР. – 1990 –. Т. 312, № 5. – С. 1080-1083.
49. Kopiev V.F., Chernyshev S.A. Vortex ring eigen-oscillation as a source of sound // J. of Fluid Mech. – 1997. – Vol. 341. – P. 19-57
50. Зайцев М.Ю., Копьев В.Ф. О механизме излучения звука турбулентным вихревым кольцом // Акуст. журн. – 1993. – Т. 39, №.6. – С. 1068-1075.
51. Зайцев М.Ю., Копьев В.Ф. О смещении пика в спектре излучения вихревого кольца // Ученые записки ЦАГИ. – 1998. – Т. XXIX, № 3-4. – С. 83-91.
52. Копьев В.Ф., Леонтьев Е.А. Излучение и рассеяние звука вихревым кольцом // Известия АН СССР. Механика жидкости и газа. – 1987. – № 3. – С. 83–95.
53. Зайцев М.Ю., Копьев В.Ф., Котова А.Н. Представление звукового поля турбулентного вихревого кольца суперпозицией квадрупольей // Акуст. журн.– 2001 – Т. 47, №6. – С. 793–801.
54. Kopiev V.F., Zaitsev M.Yu., Chernyshev S.A. Sound radiation from a free vortex ring and a ring crossing an obstacle // AIAA Paper. – 1998. – No. 98-2371
55. Kambe T. Acoustic emissions by vortex motions // J. Fluid Mech. – 1986. – Vol.173. – P. 643–666.
56. Glezer A., Coles D. An experimental study of a turbulent vortex ring. // J.Fluid Mech. – 1990. – Vol. 211. – P. 243-283. doi:10.1017/S0022112090001562.
57. Dazin A., Dupont P., Stanislas M. Experimental characterization of the instability of the vortex ring. Part 2: nonlinear phase // Exp. Fluids. – 2006. – Vol. 41 (3). – P. 401–413.

58. Didden N. On the Formation of Vortex Rings: Rolling-up and Production of Circulation // *Journal of Applied Mathematics and Physics (ZAMP)* – 1979. – Vol. 30. – P. 101–116.

59. Чепрасов С.А., Секундов А.Н. Моделирование шума турбулентных струй // *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*– 2011. – № 4 (3). – С. 1245–1247.

60. Shur M.L., Spalart P.R., Strelets M.Kh., Garbaruk A.V. Further Steps in LES Based Noise Prediction for Complex Jets // *AIAA Paper* – 2006. №2006-485.

61. Любимов Д.А. Разработка и применение эффективного RANS/ILES-метода для расчета сложных турбулентных струй // *ТВТ*. – 2008. – Т. 46, №2. – С. 271.

62. Сипатов А.М., Усанин М.В., Чухланцева Н.О. О численном моделировании шума струи // *Ученые записки ЦАГИ*. – 2012. – №4. – С. 69-81.

63. Крашенинников С.Ю., Миронов А.К. О свойствах течения в турбулентной струе и экспериментальном определении положения источников звука // *Ученые записки ЦАГИ*. – 2012. – №4.– с. 3-18.

64. Karabasov S.A., Afsar M.Z., Hynes T.P., Dowling A.P., McMullan W.A., Pokora C.D., Page G.J., McGuirk J.J. Jet Noise: Acoustic Analogy informed by Large Eddy Simulation // *AIAA Journal*. – 2010. – Vol. 48, №. 7. – P. 1312-1325.

65. Brès G.A., Jaunet V., Rallic M., Jordan P., Colonius T., Lele S.K. Large eddy simulation for jet noise: the importance of getting the boundary layer right. // *AIAA Paper*. – 2015. – № 2015-2535.

66. Shur M., Spalart P.M., Strelets M.Kh. Jet noise computation based on enhanced DES formulations accelerating the RANS-to-LES transition in free shear layers // *International Journal of Aeroacoustics*. – 2016.– Vol. 15(6-7). – P. 595–613.

67. Гарбарук А.В., Спаларт Ф.Р., Стрелец М.Х., Шур М.Л. Расчет аэродинамики и шума при обтекании тандема цилиндров // Матем. моделирование. – 2014. – Т. 26, № 6. – С. 119–136.
68. Guillaume A.B., Freed D., Wessels M., Noelting S., Perot F. Flow and noise predictions for the tandem cylinder aeroacoustic benchmark // Physics of Fluids – 2012 – Vol. 24, № 3 – P.1-25.
69. Сорокин Е.В. Отработка численной модели генерации шума взаимодействия // Научно-технический вестник Поволжья. – 2018. – № 3. – С.29-32.
70. Sandberg R.D., Jones L.E., Sandham N.D., Joseph P. F. Direct numerical simulations of tonal noise generated by laminar flow past airfoils // J. Sound and Vibration. – 2009. – Vol. 320 (4–5). – P. 838–858. doi:10.1016/j.jsv.2008.09.003.
71. Усанин М.В. Применение акустической аналогии для расчета звука в дальнем поле // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2004. – № 12. – С. 101-109.
72. Пятунин К.Р., Архарова Н.В., Ремизов А.Е. Численное моделирование тонального шума ступени вентилятора двухконтурного турбореактивного двигателя // Вестник СГАУ. – 2014. – №5 (47). – С.60-65.
73. Августинович В.Г., Шмотин Ю.Н. Численное моделирование нестационарных явлений в газотурбинных двигателях. – М.: Машиностроение. – 2005. – 536 с.
74. Carolus T. Schneider M., Reese H. Axial flow fan broad-band noise and prediction // Journal of Sound and Vibration. – 2007. – Vol. 300. – P.35-37.
75. Patel K., Novak C., Defoe J. A Novel Numerical Approach for Generation and Propagation of Rotor-Stator Interaction Noise // AIAA Paper. – 2016. – No. 2016-22821
76. Сипатов А.М., Усанин М.В., Чухланцева Н.О. Трехмерный акустический анализ в процессе проектирования авиационного двигателя // Ученые записки ЦАГИ, – 2010. – № 2. – С.3-10.

77. Абалакин И.В., Горобец А.В., Козубская Т.К. Вычислительные эксперименты по звукопоглощающим конструкциям // Матем. моделирование. – 2007. – Т.19, № 8. – 15–21.
78. Храмцов И.В., Кустов О.Ю., Федотов Е.С., Синер А.А. О численном моделировании механизмов гашения звука в ячейке звукопоглощающей конструкции // Акуст. журн. – 2018. – Т.64, № 4. – с. 508–514.
79. Zhang Q., Bodony D. Numerical investigation and modelling of acoustically excited flow through a circular orifice backed by a hexagonal cavity. // J. Fluid Mech. – 2012. – Vol. 693, – P. 367-401. doi:10.1017/jfm.2011.537.
80. Tam C.K.W., Ju H., Jones M.G., Watson W.R., Parrott T.L. A Computational and Experimental Study of Resonators in Three Dimensions// Journal of Sound and Vibration. – 2010. – Vol. 329. – P. 5164–5193.
81. Tam C.K.W., Ju H., Walker B.E. Numerical simulation of a slit resonator in a grazing flow under acoustic excitation // Journal of Sound and Vibration. – 2008. – Vol. 313. – P. 449–471.
82. Ran H., Colonius T. Numerical simulation of the sound radiated from a turbulent vortex ring. // IJA. – 2009 – V. 8, №. 4. – P. 317–336.
83. Kambe T. Vortex sound with special reference to vortex rings: theory, computer simulations, and experiments. // IJA. – 2010. – V. 9, №.1-2. – P. 51-89.
84. Shariff K., Verzicco R., Orlandi P. A numerical study of the three-dimensional vortex ring instabilities: viscous corrections and early nonlinear stage // J. Fluid Mech. – 1994. – Vol. 279. – P. 351–375.
85. Knio O., Ghoniem A. Numerical Study of a Three-Dimensional Vortex Method // J. Comp. Physics. – 1990. – Vol. 86. – P. 75–106.
86. Гиневский А.С., Погребная Т.В., Шипилов С.Д. Натекание кольцевого вихревого жгута на плоский экран. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 2006.– Т. 42, №5. – С. 681-686.
87. Ghosh D., Baeder J. High-Order Accurate Incompressible Navier–Stokes Algorithm for Vortex-Ring Interactions with Solid Wall. // AIAA Journal. – Vol. 50, №. 11. – 2012. – P.2408-2422.

88. Mohseni K., Ran H., Colonius T. Numerical experiments on vortex ring formation // *J. Fluid Mech.* – 2001. – Vol. 430. – P. 267–282.
89. Петрова Т.А., Шугаев Ф.В. Частота акустического излучения цилиндрического вихря // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон.* – 2015. – № 4. – С. 31 - 35
90. Shugaev F.V., Cherkasov D.Y., Solenaya, O.A. Acoustic radiation by 3D vortex rings in air // *Aerospace.* – 2015. – Vol. 2, – P. 627-636. doi:10.3390/aerospace2040627
91. Черкасов Д.Ю., Шугаев Ф.В. Эволюция акустического излучения ансамбля вихревых колец в воздухе // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон.* – 2015. – № 2. – С. 50-55
92. Копьев В.Ф., Чернышев С.Л. Развитие методов вычислительной аэроакустики в ЦАГИ. // *Труды 6-й международной конференции «Параллельные вычисления и задачи управления РАСО'2012».* – 2012. – Т. 3. – С. 254-265
93. Danaila I., Kaplanski F., Sazhin S. Modelling of confined vortex rings // *J. Fluid Mech.* – 2015. – vol. 774. – pp. 267–297. doi:10.1017/jfm.2015.261
94. Nitsche M., Krasny R. A numerical study of vortex ring formation at the edge of a circular tube // *J. Fluid Mech.* – 1994. – Vol. 276. – 139-161
95. Ooi A., Soria J., Lim T. T., Kollmann W., Chong M. S. A Numerical Study of Swirling Vortex Rings. // *14th Australasian Fluid Mechanics Conference Adelaide University. Adelaide. Australia. 10-14 December 2001.* – 2001. – P. 375-378.
96. Rosenfeld M., Rambod E., Gharib M. Circulation and formation number of laminar vortex rings. // *Journal of Fluid Mechanics* – 1998. – Vol. 376. – P. 297-318.
97. Капранов И.Е. Моделирование динамики формирования, перемещения и транспортировки примеси вихревым кольцом // В кн.: *Четвертые Поляховские чтения. Избранные труды.* СПб.: Издательство «ВВМ». – 2006. – С. 358-364.

98. Копьев В.Ф., Зайцев М.Ю., Пальчиковский В.В., Храмов И.В., Берсенев Ю.В. Экспериментальные исследования шума вихревого кольца в заглушенной камере // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2016. – № 45. – С. 133–151.

99. Храмов И.В., Писарев П.В., Пальчиковский В.В., Бульбович Р.В., Павлоградский В.В. Разработка генератора вихревых колец со сменными сопловыми насадками // Актуальные проблемы современного машиностроения: сб. тр. междунар. науч.-практ. конф. Юрга. – 2014. – С. 194–199.

100. 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 // Акуст. журн. – 2017. – Т. 63, № 1. – С. 114–126.

101. Palchikovskiy V.V., Bersenev Yu.V., Makashov S.Yu., Belyaev I.V., Korin I.A., Sorokin E.V., Khrantsov I.V., Kustov O.Yu. Tests of anechoic chamber for aeroacoustics investigations // AIP Conference Proceedings. – 2016. – Vol. 1770. – No. 030116.

102. Kopyev V.F., Palchikovskiy V.V., Bersenev Yu.V., Makashov S.Yu., Belyaev I.V., Korin I.A., Sorokin E.V., Khrantsov I.V., Kustov O.Yu. Design and qualification of an anechoic facility in PNRPU // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 176. – P. 264-272.

103. 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 // Акуст. журн. – 2018. – Т. 64, № 4. – С. 499-507

104. Khrantsov I.V., Pisarev P.V., Palchikovskiy V.V., Bulbovich R.V., Pavlogradskiy V.V. Numerical analysis of gasdynamic characteristics of vortex ring // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 770. – P. 483-488.

105. Khrantsov 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.  
DOI 10.1088/1757-899X/208/1/012045.

106. Fluent 12.0 User's Guide. February 2008.

107. Копьев В.Ф., Шур М. Л. Азимутальные компоненты звукового поля турбулентной струи: результаты измерений и их использование для валидации современных методов расчета шума // Ученые записки ЦАГИ. – 2010. – №1. – С.5-12

108. Kopiev V. F., Zaitsev M.Y u., Chernyshev S. A., Ostrikov N. N. Vortex ring input in subsonic jet noise // Int. J. of Aeroacoustics. – 2007. – Vol. 6, № 4. – p. 375—405.

109. Kopiev V.F., Zaitsev M.Y., Chernyshev S.A., Zaitsev M.Y., Kuznetsov V.M. Experimental validation of instability wave theory for round supersonic jet // AIAA Paper. – 2006. – No. 2006–2595.

110. Kopiev V.F., Zaitsev M.Y u., Chernyshev S.A., Kotova A.N. The role of large-scale vortex in a turbulent jet noise // AIAA Paper. – 1999. – No. 99-1839

111. Gade S., Hald J., Gomes J., Dirks G., Ginn B. Recent Advances in Moving-Source Beamforming. // Sound & Vibration. – 2015. – Vol.49, № 4. – P.8-14

112. Christensen J.J., Hald J. Beamforming. Technical review // Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurements A/S. – 2004.

113. Dougherty R.P. Beamforming in acoustic testing. // Aeroacoustic Measurements. – 2002. – P. 62–97.

114. Breen N.P., Ahuja K. Measuring Jet Noise Source Locations with Acoustic Beamforming // AIAA Paper. – 2015. – No. 2015-0735.

115. Johnson D., Dudgeon. Array Signal Processing: Concepts and Techniques // Prentice Hall. – 1993. – P. 111–119.

116. Yardibi T., Lia J., Stoica P., Zawodny N., Cattafesta L.A covariance fitting approach for correlated acoustic source mapping // The Journal of the Acoustical Society of America. – 2010. – Vol. 5. – P. 2920–2931.

117. Копьев В.Ф., Храмцов И.В., Ершов В.В., Пальчиковский В.В. О возможности использования единичной временной реализации для исследования шума вихревых колец // Акуст. журн. – 2019. – Т. 65, № 1. С. 48-57