

ОТЗЫВ

на диссертацию Храмцова Игоря Валерьевича

«Исследование средних характеристик турбулентных вихревых колец различных диаметров и особенности их акустического излучения», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.06 – «Акустика»

Работа посвящена экспериментальному исследованию акустического излучения вихревого кольца. Как правильно отмечается во введении работы, вихревое кольцо обладает уникальными свойствами – оно достаточно легко создается в лаборатории, не зависит от влияния внешних границ и его стационарное и нестационарное движения допускают теоретическое (аналитическое) описание. Таким образом, вихревое кольцо можно считать эталоном течения, которое можно исчерпывающе исследовать с точки зрения механизмов эволюции турбулентности и генерации звука турбулентными потоками.

Работа развивает подходы и методы предыдущих исследований, проведенных в ЦАГИ в период 90-х – 00-х годах. Работа и ее результаты тесно связаны с созданием в Перми новой аэроакустической камеры со специализированной установкой для генерации и исследований колец.

Практическая значимость диссертации заключается в следующем.

Созданная установка является уникальным комплексом для экспериментальных исследований аэроакустических свойств вихревых колец. Установка обладает большим потенциалом для дальнейших исследований. Результаты, полученные в работе, доказывают большие возможности моделирования механизмов генерации звука турбулентными течениями с помощью вихревого кольца.

В диссертации сформулированы **основные положения, выносимые на защиту:**

Каждое созданное вихревое кольцо уникально, причем с уменьшением начального размера кольца при близких параметрах запуска растет разброс свойств вихревых колец.

Шум вихревых колец сосредоточен в узкой полосе частот. При увеличении размера вихревого кольца пик спектра смещается в сторону низких частот. Такое смещение не зависит от того, чем вызвано увеличение размера кольца - увеличением диаметра сопла при генерации, или увеличением кольца при его движении. Основная частота излучения в спектре вихревого кольца сосредоточена в области числа Струхалья 4-5.

Вследствие этой закономерности, возможно по излучаемому шуму, используя бимформинг многомикрофонных антенн, проводить бесконтактную диагностику положения свободно летящего нестационарного вихревого кольца.

Диссертация состоит из семи разделов: Введения, 5-ти глав и заключения. Список использованных источников содержит 117 пунктов.

Глава 1 является обзорной. В ней изложены результаты предыдущих теоретических и экспериментальных работ, описана теоретическая и экспериментальная база аэроакустики вихревых колец и сформулированы требования, которым должен удовлетворять разрабатываемый генератор колец.

Глава 2 посвящена конструкции генератора вихревых колец и результатам тестовых измерений траекторий колец, полученных с соплами четырех диаметров 30, 40, 50, 60 мм. Проведена тщательная работа по выделению из всего массива запущенных колец реализаций, пригодных для дальнейших аэроакустических исследований.

В главе 3 представлено параметрическое исследование шума вихревых колец, имеющих различные скорости и размеры. Приводится методика акустических измерений и обработки результатов. Наиболее существенным методическим приемом здесь является использование для анализа только записи тщательно отобранных колец. Значительным результатом представляется успешный анализ шума одиночного кольца (раздел 3.3).

Здесь вместо усреднения спектров из многих реализаций, как это делалось в первоначальных работах, определялся спектр шума одного кольца, но с разных микрофонов решетки, используемой для азимутальной декомпозиции. Рис. 25, на котором проводится сравнение спектральных максимумов излучения колец, полученных двумя методами, подтверждает эквивалентность использованных методик анализа шума кольца. Основным результатом состоит в экспериментальном определении зависимости характерной частоты спектра и максимума амплитуды от отношения диаметра сопла к скорости движения. Характерные черты шума кольца: 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 главе 4 дано расчетно-экспериментальное исследование движения кольца, частоты пика в спектре шума турбулентного вихревого кольца. Приводится метод исследования размеров вихревого кольца на начальном участке на основе численного моделирования. Следует отметить использование в расчетах экспериментально полученных граничных условиях на движущемся поршне (рис.27). Получены размеры вихревого кольца, которые в дальнейшем использовались в соответствующих формулах автомобильных теорий для оценки свойств кольца на большом удалении от среза сопла. Приведено сравнение перемещения и скорости вихревых колец, полученные в экспериментах (рис.36, стр. 76), с теоретическими полуэмпирическими выражениями (12) и продемонстрировано удовлетворительное соответствие. Следует отметить, что для подгонки потребовался всего один параметр α . Подтверждение полуэмпирических зависимостей (12), совместно с теоретической формулой (3) (стр. 23) позволили автору сформулировать и проверить выражения для нормированной частоте излучения звука вихрем (13) и (14). В этих формулах частота нормируется не на размер сопла, генерирующем вихрь, а на текущий диаметр самого вихря. Результаты проверки показаны на рис. 39 (стр. 80). Хорошее совпадение эксперимента и теоретической формулы позволяет

утверждать, что **автор диссертации подтвердил экспериментально теорию излучения звука вихревым кольцом.**

В главе 5 описано применение двух 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 квадрупольные составляющие.

Наибольший интерес в этой главе представляют результаты наблюдения вихревого кольца многоканальной акустической антенной, состоящей из 26 микрофонов. Когерентная обработка сигналов со всех микрофонов с правильно выбранными временами задержки (бимформинг) позволяет не только регистрировать сигнал и спектр одного кольца (рис.50, стр. 94), но и определять его переменное местоположение (рис. 51, 52, стр. 96, 97).

В целом, проведенная автором работа по разработке установки для исследования вихревых колец, методик проведения экспериментов, обработке результатов и их интерпретации заслуживает самой высокой оценки. Объект исследования представляет самостоятельный научный интерес, а также может служить основой для прикладных работ по снижению шума высокоскоростных струй. Вследствие важности для современного авиастроения задачи снижения шума **исследование является весьма актуальным.**

В диссертации **решены следующие ключевые задачи, обладающие научной новизной:**

Разработан и создан генератор вихревых колец.

Разработана методика определения размеров вихревого кольца на начальном участке траектории.

Реализован метод антенного приема и обработки акустических сигналов для регистрации и анализа шума вихревых колец.

Проведены параметрические исследования шума вихревых колец в широком диапазоне начальных скоростей и размеров.

Экспериментально подтвержден предложенный ранее теоретически механизм излучения шума кольцом, связанный с колебаниями ядра кольца.

При прочтении работы возникли следующие **рекомендации и замечания**

1. Обращает на себя внимание следующее обстоятельство. При предельной тщательности изготовления генератора вихрей, в экспериментах отсутствует повторяемость параметров вихрей. Автор отмечает этот, в общем-то, парадоксальный результат, однако не делает никаких попыток объяснить, хотя бы качественно, его. Можно предложить следующее объяснение. Кольцо образуется вследствие сворачивания цилиндрической вихревой пелены, первоначально получающейся при выходе воздуха из сопла. Причиной сворачивания является неустойчивость сдвигового слоя (тангенциального разрыва осевой скорости). Для развития неустойчивого возмущения требуется внешнее возмущение, а оно является случайной функцией пространства и времени. В частности, возмущения могут возбуждаться в начальном течении несимметричные возмущения. Несимметрия, возможно, и приводит к уходу кольца от оси.

2. При отборе реализаций для определения среднего спектра шума представляется целесообразным использовать корреляционную обработку для выделения «похожих» реализаций. Такой метод используется, например, в акустико-эмиссионном контроле.

3. Шум кольца является нестационарным и узкополосным. Для обработки и интерпретации таких сигналом может оказаться полезным использование в дальнейших работах wavelet – преобразования.

4. В работе проведено тщательное сопоставление полученных максимумов спектров, скорости движения, размеров кольца с теоретическими представлениями. При этом имеющиеся экспериментальные данные по **амплитуде** в максимуме спектра излучения кольца практически никак не интерпретированы. Нормированные зависимости на рис.22 (стр.57) и на рис. 25 (г) указывают на какое-то подобие. Но никаких физических зависимостей, которые позволили бы рассчитывать излучаемую вихревым

кольцом акустическую мощность, в диссертации, к сожалению, не предложено.

К рис.11 (стр. 37) нет объяснения разных значков на графиках.

Отсутствуют понятные описания для рис.14 (стр.47). Каковы характерные интервалы времени, на что нужно обращать внимание?

Непонятно, какие спектры представлены на рис. 17-19 единичные, или усредненные.

Стр.70 к – турбулентная кинетическая энергия – куда она входит?

Отмеченные недостатки не снижает общей положительной оценки диссертации.

Данная работа отвечает требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением № 842 Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. (в редакции Постановления Правительства РФ от 21.04.2016 г. № 335), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор **Храмцов Игорь Валерьевич** заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.06 – Акустика.

Миронов Михаил Арсеньевич
канд. физ.-мат. наук
старший научный сотрудник
начальник Теоретического отдела
АО «Акустический институт имени академика Н.Н. Андреева»
117036, Москва, ул. Шверника,4
akin.ru, bvp@akin.ru, раб. тел.: 499-723-61-60

Я, Миронов Михаил Арсеньевич, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку

«23» мая 2019 г.

Подпись Миронова М.А. заверяю
Начальник отдела кадров АО «АКИН»

место печати



подпись

Рыжов В.Ю.