

DOI: 10.15593/2224-9982/2016.45.07

УДК 534.23

**В.Ф. Копьев^{1, 2}, М.Ю. Зайцев^{1, 2}, В.В. Пальчиковский²,
И.В. Храмцов², Ю.В. Берсенов²**

¹ Центральный аэрогидродинамический институт
им. профессора Н.Е. Жуковского, Москва, Россия

² Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ШУМА ТУРБУЛЕНТНЫХ ВИХРЕВЫХ КОЛЕЦ В ЗАГЛУШЕННОЙ КАМЕРЕ

Приводятся первые результаты по экспериментальной диагностике аэроакустических свойств фундаментального объекта механики жидкости и газа – турбулентного вихревого кольца, которые были получены с помощью современных методов многоканальных акустических измерений и постпроцессинга.

Шум вихревого кольца удается различить на фоне помех только в специальных акустически заглушенных камерах. В данной работе регистрация шума свободно летящего вихревого турбулентного кольца проводилась в заглушенной камере размерами 10×6,7×4,1 м, недавно построенной и введенной в эксплуатацию в лаборатории механизмов генерации шума и модального анализа Пермского национального исследовательского политехнического университета. В результате проведенных экспериментов удалось выделить шум кольца и получить усредненные по ансамблю реализаций узкополосные спектры звукового давления, что говорит о хорошем акустическом качестве разработанного и изготовленного генератора вихрей и введенной в эксплуатацию в ПНИПУ акустической заглушенной камеры в целом. Эти эксперименты, в свою очередь, дают возможность проведения на их основе тонких аэроакустических исследований.

Ключевые слова: турбулентное вихревое кольцо, аэроакустика, заглушенная камера, поршневой генератор вихрей.

**V.F. Kopyev^{1, 2}, M.Yu. Zaytsev^{1, 2}, V.V. Palchikovskiy¹,
I.V. Khrantsov¹, Yu.V. Bersenev²**

¹ Central Aerohydrodynamic Institute, Moscow, Russian Federation

² Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF TURBULENT VORTEX RING NOISE IN ANECHOIC CHAMBER

In this paper the recent results concerning experimental diagnosis of aeroacoustic characteristics of a fundamental fluid mechanic object – turbulent vortex ring, are presented. These results were obtained by means of modern methods of multi-channel acoustic measurement and post-processing.

Vortex ring noise can be distinguished against the background only in special acoustically anechoic chamber. In the present paper noise of freely flying turbulent vortex ring was registered in anechoic chamber with dimensions $10 \times 6.7 \times 4.1 \text{ m}^3$ recently constructed in acoustic laboratory of Perm National Research Polytechnic University. As a result of fulfilled experiments the vortex ring noise was separated from background and the ensemble-averaged narrowband spectra were obtained. It confirms good acoustic quality of designed and manufactured vortex generator and the chamber that was recently put into service in PNRPU. Thus, the fine acoustical experiments can be done on the basis of developed test facility.

Keywords: turbulent vortex ring, aeroacoustics, anechoic chamber, piston vortex generator.

Введение

Существующая проблема ограничения авиационного шума в соответствии с постоянно ужесточающимися нормами ИКАО связана прежде всего с его вредным воздействием на человека. Эта проблема особенно остро встала к концу XX в. в связи с резким увеличением самолетного парка при одновременном росте мощности силовых установок. Ресурс дальнейшего снижения шума в рамках традиционных подходов связан с серьезными 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.

В дозвуковых турбулентных струях, представляющих собой один из основных источников шума современных авиационных силовых установок, шум генерируется турбулентными вихрями. Основной трудностью изучения шума струи является то, что в турбулентных струях присутствуют вихри различных масштабов, взаимодействующие друг с другом, что приводит к «смазыванию» картины излучения, поэтому чрезвычайно важной представляется возможность исследования фундаментальных вопросов излучения звука турбулентными потоками на примере изолированного вихря.

Таким элементарным вихрем является вихревое кольцо. Вихревое кольцо – это хорошо известный [1–7] и в определенном смысле уникальный объект, так как: а) допускает теоретическое исследование в рамках основных уравнений механики сплошной среды [4–8]; б) легко может быть создано на опыте для экспериментального исследования [6, 9–15]; в) не подвержено влиянию внешних границ, что позволяет исследовать с его помощью многие проблемы динамики и акустики вихрей в чистом виде.

Объект исследования

Вихревое кольцо представляет собой вихревой тор, вместе с которым перемещается эллипсоидальный объем жидкости, называемый атмосферой кольца. Подробное описание стационарной модели вихревых колец можно найти, например, в исследованиях [2, 3]. Речь в этих работах идет прежде всего о самопереносе вихревой нити, свернутой в кольцо. Ограниченность такого рассмотрения становится очевидной уже из того факта, что реальное кольцо при своем движении заметно расширяется. Учет вязкости [16, 17] позволил несколько сблизить имеющиеся расхождения между теоретической моделью и реальным явлением. Вместе с тем к началу 1970-х гг. стало совершенно ясно, что идеальная модель даже при учете вязкости не учитывает принципиальные моменты в эволюции вихревого кольца. Многочисленные экспериментальные исследования показали, что существуют два качественно различных режима течения – ламинарный и турбулентный [9–12, 18, 19]. Критическое число Рейнольдса Re_0 , построенное по начальному радиусу и скорости вихревого кольца, составляет около 10^3 . При малых числах Re образуется вихрь с характерной и четко просматриваемой спиральной структурой [6, 20]. При числах Re , превышающих Re_0 , характер течения принципиально меняется: течение становится турбулентным. 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 областями остается резкой, несмотря на то, что кольцо успевает пройти большие расстояния [13, 21]. Обнаруженные в эксперименте особенности турбулентного режима течения позволили сформулировать полуэмпирическую автомодельную теорию [5, 15, 18], описывающую эволюцию средних параметров (радиуса, скорости, завихренности и т.д.) в предположении, что распределение завихренности в ядре близко к константе (твердотельное вращение в ядре). 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 [14, 22], данные которых носят предварительный характер, и первые измерения, основанные на технике PIV [23, 24], относящиеся к не очень высокоскоростным кольцам.

Обзор по численному моделированию вихревого кольца приведен в работах [25, 26]. Большинство работ, касающихся численного моделирования нестационарных процессов, протекающих в вихревом кольце, связано с более или менее точным моделированием различных типов неустойчивости безотносительно к излучаемому кольцом звуковому полю [27, 28], так как моделируется главным образом крупномасштабная динамика кольца. В работах другого типа решаются задачи об образовании кольца или взаимодействии его с преградами [29], т.е. опять же моделируется нестационарность макропараметров. Полное моделирование собственных колебаний вихревого кольца находится на пределе мощности современных суперкомпьютеров [30] и представляет серьезную вычислительную задачу, которая должна решаться путем последовательного рассмотрения иерархически выстроенных модельных задач.

Отметим также, что с точки зрения аэроакустики интерес представляют прежде всего турбулентные вихревые кольца [5, 6, 9–18] с большим числом Рейнольдса ($\sim 10^4$ – 10^5), поскольку именно для них можно надеяться услышать звук в лабораторном эксперименте. Эксперименты, проведенные авторами в заглушенной камере ЦАГИ, показали, что акустическое излучение вихревого кольца сосредоточено в достаточно узкой полосе частот с максимумом вблизи частоты, зависящей от средних параметров вихревого кольца, его размеров и циркуляции, кроме этого результаты этих экспериментов указывают на то, что, несмотря на имеющееся во всей атмосфере кольца 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 [31–34].

Генератор вихревых колец

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. Это дости-

гается использованием специальных поршневых генераторов [31, 32]. Для этого в ПНИПУ был спроектирован и создан поршневой генератор вихревых колец [35], представленный на рис. 1. Данный генератор представляет собой полый стальной полированный цилиндр 1 диаметром 0,16 м, к которому крепится коническое сопло 3 с диаметром выходного отверстия 0,04 м. Внутри цилиндра свободно движется легкий фторопластовый поршень 2. Перед запуском вихря поршень выдвигается на фиксированное расстояние 0,06 м.

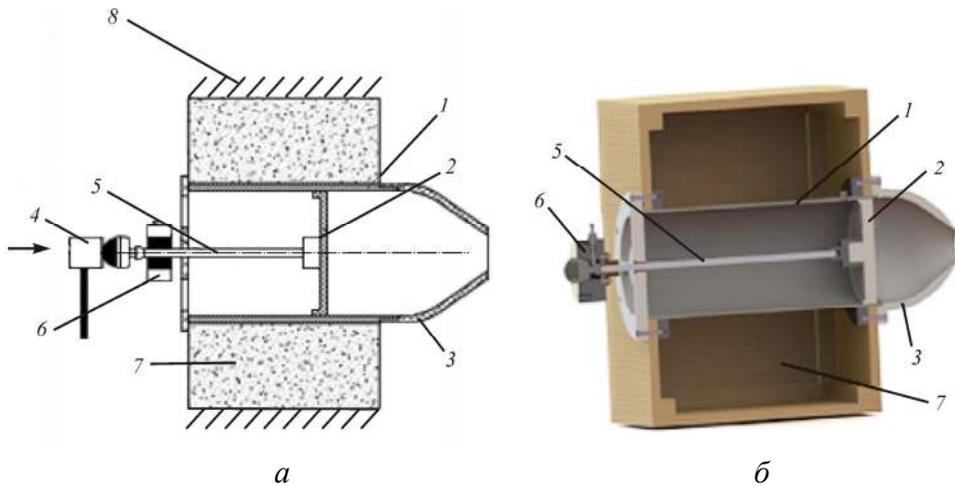


Рис. 1. Генератор вихревых колец: *а* – схема; *б* – 3D-модель; 1 – корпус; 2 – поршень; 3 – сопло; 4 – молот; 5 – шток; 6 – замок-ловушка штока; 7 – контейнер с звукопоглощающим материалом; 8 – стена

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

Для снижения 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 оста-

новки 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 рис. 2 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.

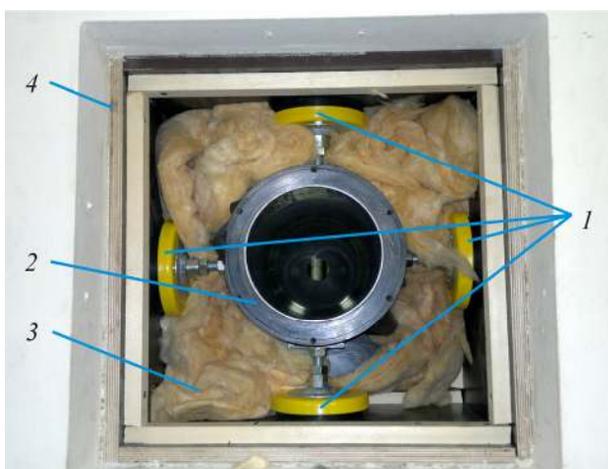


Рис. 2. Сборка генератора вихревых колец: 1 – виброопоры; 2 – полый цилиндр; 3 – звукопоглощающий материал; 4 – фанерный кожух

Шум вихревых колец, которые могут быть созданы в лабораторных исследованиях, отличается малой интенсивностью излучения. В связи с этим его изучение требует тщательного проведения физического эксперимента. Для того чтобы сделать вихревые кольца объектом экспериментальной аэроакустики, необходимо попытаться сначала их просто услышать. Таким образом, основная цель настоящей работы состояла в регистрации вообще какого-либо шума от вихревого кольца, выяснения самой возможности его достоверного определения на фоне помех [31].

Шум вихревого кольца удастся различить только в специальных акустических камерах. В данной работе регистрация шума свободно

летающего вихревого турбулентного кольца проводилась в заглушенной камере лаборатории механизмов генерации шума и модального анализа (ЛМГШиМА) ПНИПУ размерами 10×6,7×4,1 м (рис. 3). Акустические измерения в дальнем поле проводились с помощью трех микрофонов Briel & Kjaer (№ 1–3), расположенных на расстоянии 0,8 м от оси движения вихревого кольца. Для запуска измерительной системы использовался триггерный микрофон Briel & Kjaer (А), расположенный в плоскости сопла генератора и вырабатывающий сигнал для запуска системы регистрации шума в момент выхода кольца из сопла генератора. Схема системы регистрации акустических параметров представлена на рис. 4.



Рис. 3. Фотография системы регистрации параметров: 1 – сопло генератора вихревых колец; 2 – триггерный микрофон (А); 3 – микрофоны в дальнем поле (№ 1–3); 4 – экран с шелковинками

Для регистрации отклонения траектории полета вихря от оси генератора использовался прямоугольный экран размером 2×1 м из тонкой проволоки с наклеенными шелковинками, установленный на расстоянии 5 м от среза сопла так, чтобы центр экрана находился на оси генератора. При пролете вихревого кольца через экран шелковинки отклонялись, делая видимым положение кольца, что позволяло отобрать для дальнейшего исследования только правильно летящие вихревые кольца, попадающие в центр экрана.

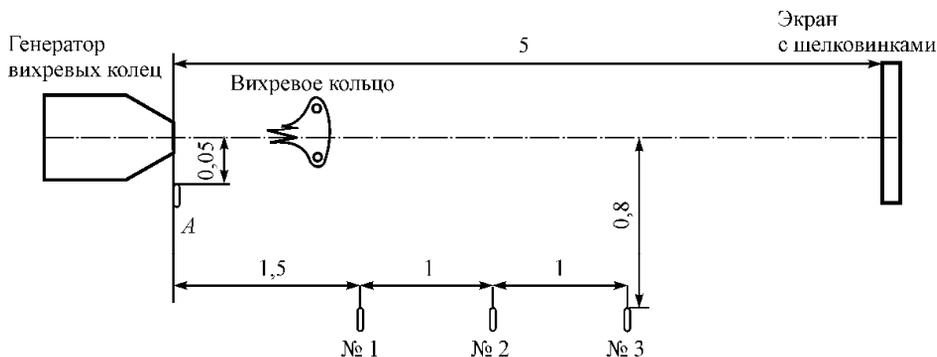


Рис. 4. Схема системы регистрации акустических параметров вихревого кольца

Дальнейшая обработка записанных на жесткий диск компьютера временных реализаций шума вихревого кольца проводилась с помощью лицензионных программ постпроцессинга фирмы Bruel & Kjaer: PULSE LabShop, PULSE Time Edit и PULSE Reflex. На первом этапе обработки редактировали «сырые» временные сигналы с целью отбора ансамбля реализаций «правильных» вихревых колец, т.е. вихрей, у которых отклонение параметров траектории от средних значений было бы минимальным. В настоящем эксперименте был отобран ансамбль из 30 реализаций. Кроме реализаций «с кольцом» были также записаны акустические сигналы «без кольца», когда сразу после образования вихрь попадал в акустически прозрачный экран и разрушался. При этом записывался фоновый структурный шум установки, связанный с ударным запуском генератора, но при отсутствии шума вихревого кольца.

На рис. 5 приведены типичные временные сигналы, записанные микрофонами *A* и 1–3 (см. рис. 4). Для всех сигналов характерным является наличие пика разрежения, связанного с ближним псевдозвуковым полем давления при прохождении вихря вблизи микрофона и затухающими низкочастотными колебаниями, обусловленными структурным шумом генератора, возникающим при ударном запуске вихревого кольца. Этот шум многократно превышает полезный сигнал (шум кольца) на начальном участке временной реализации (0–200 мс), поэтому шум кольца удается выделить только тогда, когда структурный шум достаточно затух (200–500 мс). Началом отсчета времени для каждой реализации служит момент регистрации пика разрежения на триггерном микрофоне *A*.

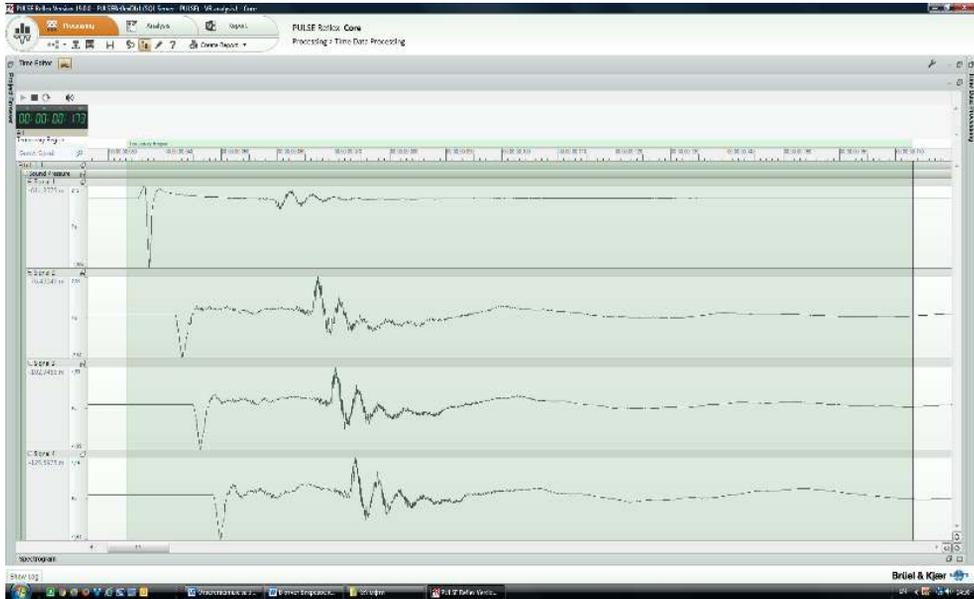
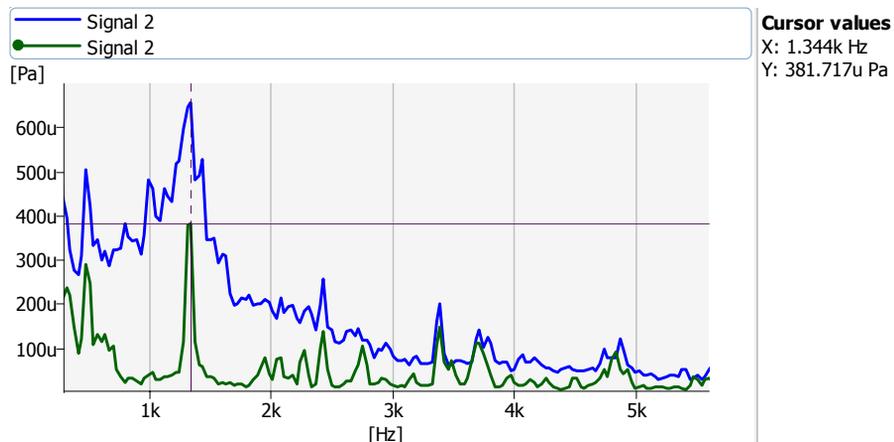


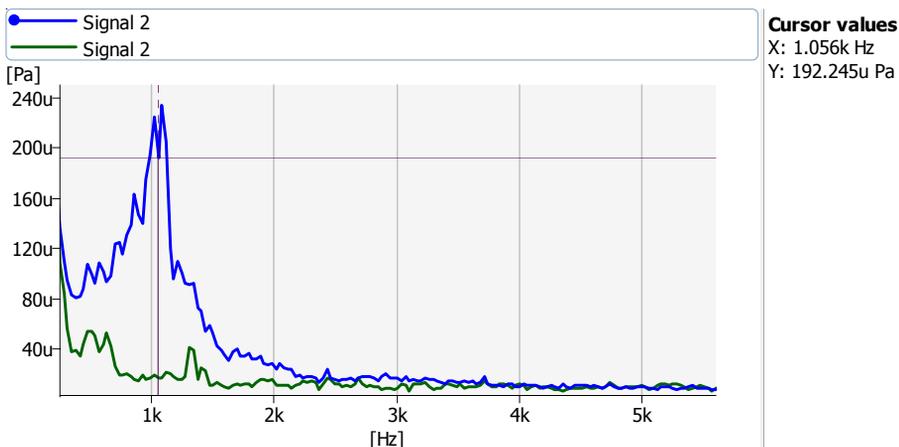
Рис. 5. Временные реализации звукового давления (Па) для триггерного микрофона *A* и микрофонов дальнего поля № 1–3

Спектральные характеристики вычисляются затем для всех временных реализаций, входящих в усредняемый ансамбль «с кольцом» и ансамбль фонового шума, для одного и того же времени задержки t 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 гидродинамические параметры вихря (скорость, завихренность в ядре и т.д.) также изменяются вдоль траектории.

На рис. 6 представлены усредненные спектры шума. Из рис. 6, *a* видно, что даже на начальном участке траектории вихря удается выделить шум вихревого кольца на фоне структурного шума установки. Рис. 6, *б* демонстрирует смещение пика акустического давления в область низких частот при развитии движения вихревого кольца, что ранее также наблюдалось в исследованиях [31]. Полученные результаты говорят о хорошем акустическом качестве созданного генератора вихрей и введенной в эксплуатацию в ЛМГШиМА ПНИПУ акустической заглушенной камеры в целом.



a



б

Рис. 6. Усредненные по ансамблю реализаций спектры шума «с кольцом» (синяя кривая) и фонового шума (зеленая кривая): *a* – время задержки $\tau = 150$ мс; *б* – $\tau = 280$ мс

Использование современных методов обработки сигналов позволяет проследить также за эволюцией усредненных спектров шума вихревого кольца при его движении по траектории (рис. 7). Ярко выраженный узкополосный пик на рис. 7 в начальный момент времени $\tau = 120$ мс (индекс 1 на оси аппликат) соответствует сформировавшемуся вихревому кольцу, а резкое затухание шума при значении индекса >15 (ось аппликат) соответствует разрушению крупномасштабной структуры вихревого кольца после прохождения экрана с шелковинка-

ми. Данный пример показывает, что современные методы анализа акустических данных позволяют получать количественную информацию не только о квазистационарных процессах, но и о быстропротекающих процессах, характерных для динамики вихревого движения.

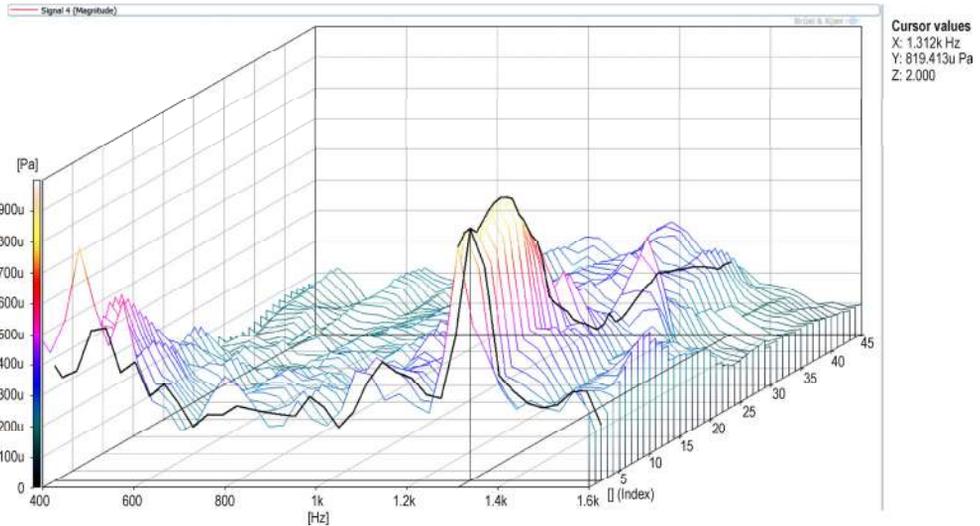


Рис. 7. Временная эволюция усредненного по ансамблю из 30 реализаций спектра шума вихревого кольца от момента времени $\tau = 120$ мс до распада кольца после удара об экран с шелковинками

Заключение

Таким образом, результаты проведенных акустических измерений показали, что созданная экспериментальная установка, включающая большую заглушенную камеру и предустановленный генератор турбулентных вихревых колец, позволяет изучать тонкие акустические эффекты, связанные с генерацией шума аэродинамического происхождения.

В совокупности с детальным исследованием пульсаций вихревого кольца с помощью современного инструментария (высокоскоростная съемка, высокоскоростная система измерения нестационарного поля скорости TR PIV) многоканальные акустические измерения, включающие в себя и метод фазовой локализации источника шума – бимформинг, должны привести к определению физического механизма излучения и возможности сопоставить экспериментальные дан-

ные с развиваемой теорией излучения звука вихревым кольцом на всех этапах его развития (формирование, автомодельное движение, распад).

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Правительства РФ по договору № 14.Z50.31.0032.

Библиографический список

1. Белоцерковский С.М., Гиневский А.С. Моделирование турбулентных струй и следов на основе метода дискретных вихрей. – М.: Физматлит, 1995. – 368 с.
2. Ламб Г. Гидродинамика. – М.: Гостехиздат, 1947. – 928 с.
3. Бэтчелор Д. Введение в динамику жидкости. – М.: Мир, 1973. – 760 с.
4. Saffman P.G. Vortex dynamics. – Cambridge: University press, 1992. – 311 p.
5. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Проблемы гидродинамики и их математические модели. – М.: Наука, 1977. – 407 с.
6. Shariff K., Leonard A. Vortex rings // Annu. Rev. Fluid Mech. – 1992. – Vol. 24. – P. 235–279.
7. Сэффмэн Ф. Динамика завихренности // Современная гидродинамика. Успехи и проблемы. – М.: Мир, 1984. – С. 77–90.
8. Онуфриев А.Т. Теория движения вихревого кольца под действием силы тяжести. Подъем облака атомного взрыва // Прикладная механика и техническая физика. – 1967. – № 2. – С. 3–15.
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. Maxworthy T. The structure and stability of vortex rings // J. Fluid Mech. – 1972. – Vol. 51. – P. 15–32.
11. Maxworthy T. Turbulent vortex rings // J. Fluid Mech. – 1974. – Vol. 64, № 2. – P. 227–239.
12. Maxworthy T. Some experimental studies of vortex rings // J. Fluid Mech. – 1977. – Vol. 81. – P. 465–489.
13. Владимиров В.А., Тарасов В.Ф. Структура турбулентности вблизи ядра кольцевого вихря // Докл. АН СССР. – 1979. – Т. 245, № 6. – С. 1325–1328.

14. Ахметов Д.Г., Кисаров О.П. Гидродинамическая структура кольцевого вихря // Прикладная механика и техническая физика. – 1966. – № 4. – С. 120–123.
15. Glezer A., Coles D. An experimental study of a turbulent vortex ring // J. Fluid Mech. – 1990. – Vol. 211. – P. 243–284.
16. Tung C., Ting L. Motion and decay of a vortex ring // Phys. Fluids. – 1967. – Vol. 10, № 5. – P. 901–910.
17. Saffman P.G. The velocity of viscous vortex rings // Stud. Appl. Math. – 1970. – Vol. 49, № 4. – P. 371–380.
18. Johnson G.M. An empirical model on the motion of turbulent vortex rings // AIAA Journal. – 1971. – Vol. 9. – P. 763–764.
19. Тарасов В.Ф. Оценка некоторых параметров турбулентного вихревого кольца // Динамика сплошной среды: сб. науч. тр. / СО РАН СССР. – 1973. – Вып. 14. – С. 120–127.
20. Ван-Дайк М. Альбом течений жидкости и газа. – М.: Мир, 1986. – 184 с.
21. Владимиров В.А., Луговцов Б.А., Тарасов В.Ф. Подавление турбулентности в ядрах концентрированных вихрей // Прикладная механика и техническая физика. – 1980. – № 5. – С. 69–76.
22. Weigand A., Garib M. On the evolution of laminar vortex rings // Exp. Fluids. – 1997. – Vol. 22. – P. 447–457.
23. Gan L., Nickels T.B. An experimental study of turbulent vortex rings during their early development // J. Fluid Mech. – 2010. – Vol. 649. – P. 467–496.
24. Gan L., Nickels T.B., Dawson J.R. An experimental study of a turbulent vortex ring: a three-dimensional representation // Exp. Fluids. – 2011. – Vol. 51. – P. 1493–1507.
25. Ran H., Colonius T. Numerical simulation of the sound radiated from a turbulent vortex ring // Int. J. Aeroacoustics. – 2010. – Vol. 8, № 4. – P. 317–336.
26. Kambe T. Vortex sound with special reference to vortex rings: theory, computer simulations, and experiments // Int. J. Aeroacoustics. – 2010. – Vol. 9, № 1–2. – P. 51–89.
27. Shariff K., Verzicco R., Orlandi P. A numerical study of the threedimensional vortex ring instabilities: viscous corrections and early nonlinear stage // J. Fluid Mech. – 1994. – Vol. 279. – P. 351–375.

28. Numerical simulation and PIV study of compressible vortex ring evolution / T. Murugan, S. De, C.L. Dora, D. Das // *Shock Waves*. – 2012. – Vol. 22. – P. 69–83.

29. Ghosh D., Baeder J.D. High-order accurate incompressible Navier–Stokes algorithm for vortex-ring interactions with solid wall // *AIAA Journal*. – 2012. – Vol. 50, № 11. – P. 2408–2422.

30. Копьев В.Ф., Чернышев С.Л. Развитие методов вычислительной аэроакустики в ЦАГИ // Параллельные вычисления и задачи управления РАСО'2012: тр. 6-й Междунар. конф. – М., 2012. – Т. 3. – С. 254–265.

31. Излучение звука турбулентным вихревым кольцом / М.Ю. Зайцев, В.Ф. Копьев, А.Г. Мунин, А.А. Потокин // Докл. АН СССР. – 1990. – Т. 312, № 5. – С. 1080–1083.

32. Копьев В.Ф., Зайцев М.Ю. Исследование структуры узкополосного сигнала в шуме вихревого кольца // *Акустика неоднородных сред* / СО РАН. – 1992. – Вып. 105. – С. 167–170.

33. Зайцев М.Ю., Копьев В.Ф. О механизме излучения звука турбулентным вихревым кольцом // *Акустический журнал*. – 1993. – Т. 39, № 6. – С. 1068–1074.

34. 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.

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

References

1. Belotserkovskiy S.M., Ginevskiy A.S. Modelirovane turbulentnykh struy i sledov na osnove metoda diskretnykh vikhrey [Simulation of turbulent jets and wakes based on discrete vortex technique]. Moscow: Fizmatlit, 1995. 368 p.

2. Lamb G. *Gidrodinamika* [Hydrodynamics]. Moscow: Gostekhizdat, 1947. 928 p.

3. Betchelor D. *Vvedenie v dinamiku zhidkosti* [Introduction to fluid dynamics]. Moscow: Mir, 1973. 760 p.

4. Saffman P.G. Vortex dynamics. Cambridge: University press, 1992. 311 p.
5. Lavrentev M.A., Shabat B.V. Problemy gidrodinamiki i ikh matematicheskie modeli [Hydrodynamics problems and their mathematic models]. Moscow: Nauka, 1977. 407 p.
6. Shariff K., Leonard A. Vortex rings. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 1992, vol. 24, pp. 235-279.
7. Seffmen F. Dinamika zavikhrennosti [Vorticity dynamics]. *Sovremennaya gidrodinamika. Uspekhi i problemy*. Moscow: Mir, 1984, pp. 77-90.
8. Onufriev A.T. Theory of the motion of a vortex ring under gravity. Rise of the cloud from nuclear explosion. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1967, vol. 8, iss. 2, pp. 1-7.
9. Lugovtsov B.A. O dvizhenii turbulentnogo vikhrevogo koltsa i perenose im passivnoy primesi [On motion of vortex ring and its carrying passive admixture]. *Nekotorye problemy matematiki i mekhaniki*. Leningrad: Nauka, 1970, pp. 76-93.
10. Maxworthy T. The structure and stability of vortex rings. *J. Fluid Mech.*, 1972, vol. 51, pp. 15-32.
11. Maxworthy T. Turbulent vortex rings. *J. Fluid Mech.*, 1974, vol. 64, no. 2, pp. 227-239.
12. Maxworthy T. Some experimental studies of vortex rings. *J. Fluid Mech.*, 1977, vol. 81, pp. 465-489.
13. Vladimirov V.A., Tarasov V.F. Struktura turbulentnosti vblizi yadra koltsevogo vikhrya [Turbulence structure near ring vortex core]. *Doklady Akademii nauk SSSR*, 1979, vol. 245, no. 6, pp. 1325-1328.
14. Akhmetov D.G., Kissarov O.P. Hidrodynamic structure of a vortex ring. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1966, vol. 7, iss. 4, pp. 87-90.
15. Glezer A., Coles D. An experimental study of a turbulent vortex ring. *J. Fluid Mech.*, 1990, vol. 211, pp. 243-284.
16. Tung C., Ting L. Motion and decay of a vortex ring. *Phys. Fluids*, 1967, vol. 10, no. 5, pp. 901-910.
17. Saffman P.G. The velocity of viscous vortex rings. *Stud. Appl. Math.*, 1970, vol. 49, no. 4, pp. 371-380.
18. Johnson G.M. An empirical model on the motion of turbulent vortex rings. *AIAA Journal*, 1971, vol. 9, pp. 763-764.

19. Tarasov V.F. Otsenka nekotorykh parametrov turbulentnogo vikhrevogo koltsa [Evaluation of some parameters of the turbulent vortex ring]. *Sbornik nauchnykh trudov "Dinamika sploshnoy sredy"*. Sibirskoe otdelenie Rossiyskoy akademii nauk, 1973, iss. 14, pp. 120-127.

20. Van Dyke M. An album of fluid motion. California: Parabolic Press, 1982. 176 p.

21. Vladimirov V.A., Lugovtsov B.A., Tarasov V.F. Suppression of turbulence in the cores of concentrated vortices. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1980, vol. 21, no. 5, pp. 632-637.

22. Weigand A., Garib M. On the evolution of laminar vortex rings. *Exp. Fluids.*, 1997, vol. 22, pp. 447-457.

23. Gan L., Nickels T.B. An experimental study of turbulent vortex rings during their early development. *J. Fluid Mech.*, 2010, vol. 649, pp. 467-496.

24. Gan L., Nickels T.B., Dawson J.R. An experimental study of a turbulent vortex ring: a three-dimensional representation. *Exp. Fluids.*, 2011, vol. 51, pp. 1493-1507.

25. Ran H., Colonius T. Numerical simulation of the sound radiated from a turbulent vortex ring. *Int. J. Aeroacoustics*, 2010, vol. 8, no. 4, pp. 317-336.

26. Kambe T. Vortex sound with special reference to vortex rings: theory, computer simulations, and experiments. *Int. J. Aeroacoustics*, 2010, vol. 9, no. 1-2, pp. 51-89.

27. 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, pp. 351-375.

28. Murugan T., De S., Dora C.L., Das D. Numerical simulation and PIV study of compressible vortex ring evolution. *Shock Waves*, 2012, vol. 22, pp. 69-83.

29. Ghosh D., Baeder J.D. High-order accurate incompressible Navier-Stokes algorithm for vortex-ring interactions with solid wall. *AIAA Journal*, 2012, vol. 50, no. 11, pp. 2408-2422.

30. Kopev V.F., Chernyshev S.L. Razvitiye metodov vychislitelnoy aeroakustiki v TsAGI [Development of computational aeroacoustics in TsAGI]. *Trudy 6-y mezhdunarodnoy konferentsii "Parallelnye vychisleniya i zadachi upravleniya PACO'2012"*, Moscow, 2012, vol. 3, pp. 254-265.

31. Zaytsev M.Yu., Kopev V.F., Munin A.K., Potokin A.A. Izlucheniye zvuka turbulentnym vikhrevym koltsom [Acoustic radiation by turbulent vortex ring]. *Doklady Akademii nauk SSSR*, 1990, vol. 312, no. 5, pp. 1080-1083.

32. Kopev V.F., Zaytsev M.Yu. Issledovanie struktury uzkopolosnogo signala v shume vikhrevogo koltsa [Research of narrow-band signal of vortex ring noise]. *Akustika neodnorodnykh sred. Sibirskoe otdelenie Rossiyskoy akademii nauk*, 1992, iss. 105, pp. 167-170.

33. Zaytsev M.Yu., Kopev V.F. O mekhanizme izlucheniya zvuka turbulentnym vikhrevym koltsom [On mechanism of acoustic radiation of turbulent vortex ring]. *Akusticheskii zhurnal*, 1993, vol. 39, no. 6, pp. 1068-1074.

34. Zaytsev M.Yu., Kopev V.F. O smeshchenii pika v spektre izlucheniya vikhrevogo koltsa [On shift of the peak in vortex ring radiation spectrum]. *Uchenye zapiski Tsentralnogo aerogidrodinamicheskogo instituta*, 1998, vol. XXIX, no. 3-4, pp. 83-91.

35. Khramtsov I.V., Pisarev P.V., Palchikovskiy V.V., Bulbovich R.V., Pavlogradskiy V.V. Razrabotka generatora vikhrevykh kolets so smennymi soplovyimi nasadkami [Designing vortex ring generator with exchangeable nozzles]. *International conference "Aktualnye problemy sovremennogo mashinostroeniya"*. Yurga, 2014, pp. 194-199.

Об авторах

Копьев Виктор Феликсович (Москва, Россия) – доктор физико-математических наук, профессор, начальник акустического отделения (НИО-9) Центрального аэрогидродинамического института им. профессора Н.Е. Жуковского (105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17, e-mail: vkoriev@tsagi.ru); научный руководитель лаборатории механизмов генерации шума и модального анализа ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29).

Зайцев Михаил Юрьевич (Москва, Россия) – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник акустического отделения (НИО-9) Центрального аэрогидродинамического института им. профессора Н.Е. Жуковского (105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17, e-mail: aeroacoustics@tsagi.ru); ведущий научный сотрудник лаборатории механизмов генерации шума и модального анализа ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29).

Пальчиковский Вадим Вадимович (Пермь, Россия) – старший преподаватель кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: vvpal@bk.ru).

Храмцов Игорь Валерьевич (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы», младший научный сотрудник лаборатории механизмов генерации шума и модального анализа ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: igorhrs92@mail.ru).

Берснев Юлий Владимирович (Пермь, Россия) – ведущий инженер лаборатории механизмов генерации шума и модального анализа ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: bersenev@avid.ru).

About the authors

Victor F. Kopiev (Moscow, Russian Federation) – Doctor in Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of Acoustic Department, Central Aerohydrodynamic Institute (17, Radio st., Moscow, 105005, Russian Federation, e-mail: vkopiev@tsagi.ru); Head of Laboratory of Noise Generation Mechanisms and Modal Analysis, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation).

Mikhail Yu. Zaytsev (Moscow, Russian Federation) – Ph. D. in Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, Acoustic Department, Central Aerohydrodynamic Institute (17, Radio st., Moscow, 105005, Russian Federation, e-mail: aeroacoustics@tsagi.ru); Leading Researcher, Laboratory of Noise Generation Mechanisms and Modal Analysis, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation).

Vadim V. Palchikovskiy (Perm, Russian Federation) – Senior Lecturer, Department of Rocket and Space Engineering and Power Generating Systems, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: vvpal@bk.ru).

Igor V. Khramtsov (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Rocket and Space Engineering and Power Generating Systems, Junior Researcher, Laboratory of Noise Generation

Mechanisms and Modal Analysis, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: igorhrs92@mail.ru).

Yuliy V. Bersenev (Perm, Russian Federation) – Lead Engineer, Laboratory of Noise Generation Mechanisms and Modal Analysis, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: bersenev@avid.ru).

Получено 07.04.2016