

ШУМ ОБТЕКАНИЯ КРУГОВОГО ЦИЛИНДРА И ЦИЛИНДРА С ПЛОСКИМ ДОННЫМ СРЕЗОМ: ЭКСПЕРИМЕНТ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

**В.Ф. Копьев¹, И.В. Беляев¹, М.Ю. Зайцев¹, М.Л. Шур²,
А.К. Травин², М.Х. Стрелец²**

¹ФАУ «ЦАГИ», Москва, vkopiev@mktsagi.ru

²ФГАОУ ВО СПбПУ, Санкт-Петербург, strelets@cfd.spb.ru

Определение уровня и спектрального состава шума, генерируемого при обтекании кругового цилиндра, является классической задачей аэроакустики и, в то же время, представляет большой практический интерес, поскольку цилиндрические тела входят в конструкции многих аэродинамических объектов (типичным примером таких объектов является шасси самолета). Как следствие, в литературе активно исследуются различные способы снижения шума обтекания цилиндра, такие, например, как использование пористых материалов [1], спиральных нитей [2] или плазменных актуаторов [3].

Альтернативный метод, состоящий в модификации поперечного сечения кругового цилиндра путем удаления его небольшого сегмента (цилиндр с плоским донным срезом) был предложен в ЦАГИ [4]. Его эффективность была подтверждена в экспериментах, выполненных в АК-2 ЦАГИ, измерения шума в которых проводились с помощью метода азимутальной декомпозиции. Теоретическое объяснение наблюдаемого эффекта снижения шума предложено в работах [5, 6]. Метод был также проверен в испытаниях с одиночными цилиндрами при числах Рейнольдса до $Re \approx 8 \cdot 10^4$ [7], помещенными в круглую турбулентную струю, которые показали, что шум при обтекании цилиндра с плоским донным срезом на ≈ 5 дБ ниже, чем при обтекании круглого цилиндра, как в турбулентной, так и в ламинарной части набегающего на цилиндр потока (область смещения и начальная область струи, соответственно) в широком диапазоне частот. Влияние числа Рейнольдса на эффективность данного метода было далее исследовано в АК-2 ЦАГИ для

цилиндров различного диаметра, соответствовавших числам Рейнольдса от $8 \cdot 10^4$ до $2.6 \cdot 10^5$ [8]. Эти эксперименты показали, что эффект снижения шума сохраняется при увеличении числа Рейнольдса, хотя для самых больших из рассмотренных его значений данный вывод нельзя считать твердо установленным, так как для них диаметр цилиндра составлял 25% диаметра струи, что приводило к значительному возмущению набегающего на цилиндр потока. Наконец, в работе [9] эффективность данного метода снижения шума была продемонстрирована применительно к «подкосу» натурной модели шасси, установленному в следе за основной стойкой шасси, при испытаниях в большой заглушенной установке FL-17 CARDC, которые соответствовали числам Рейнольдса $1.5 \cdot 10^5 - 3.5 \cdot 10^5$, рассчитанным по диаметру подкоса шасси.

Тем не менее, не во всех испытанных конфигурациях использование цилиндра с плоским донным срезом приводило к снижению шума по сравнению с круговым цилиндром. Так, при испытаниях в FL-17 CARDC для подкоса шасси, расположенного не в следе за основной стойкой, а сбоку от нее (в ламинарном потоке), и для некоторых конфигураций, исследовавшийся в АК-2 ЦАГИ, снижения шума не наблюдалось. Кроме того, при значениях числа Рейнольдса близких к $8 \cdot 10^4$, отсутствовала повторяемость эффекта снижения или проявлялось влияние способа закрепления цилиндра (консольное или двухстороннее).

Для ответа на вопрос, имеет ли место снижение шума при обтекании бесконечного цилиндра с плоским донным срезом однородным потоком, было проведено соответствующее численное исследование, в котором рассматривалось обтекание обеих конфигураций при двух числах Рейнольдса ($4.5 \cdot 10^4$ и $1.4 \cdot 10^5$) в предположении о турбулентном характере течения в пограничном слое на обтекаемой поверхности вверх по потоку от точки отрыва. При этом для определения аэродинамических и пульсационных характеристик турбулентного течения использовался глобальный гибридный RANS-LES подход DDES [10] в сочетании с адаптированным к слоям смешения линейным подсеточным масштабом [11], а шум в дальнем поле рассчитывался с помощью метода Фокса Уильямса – Хоукинга. Размер расчётной области в направлении вдоль оси цилиндра составлял $10D$ (D – диаметр

цилиндра), и на соответствующих границах использовались условия периодичности. Диаметр расчетной области в плоскостях, нормальных к оси цилиндра, составлял $200D$.

На основе полученных численных решений была рассчитана азимутальная структура шума, генерируемого рассмотренными цилиндрами, включая энергетические спектры отдельных азимутальных мод (от нулевой до третьей) и диаграммы направленности удельной энергии мод в различных частотных диапазонах. Анализ полученных результатов показал, что во всех случаях доминирующими являются первая азимутальная и осесимметричная моды шума, представляющие собой диполи, ассоциированные соответственно с колебаниями подъемной силы и силы сопротивления цилиндров. При этом расчетные уровни шума, генерируемого при обтекании цилиндров с плоским донным срезом, снижаются по сравнению с шумом круговых цилиндров на величину не более 1 дБ.

Таким образом, значительное снижение шума или наоборот его отсутствие, обнаруженное в экспериментах ЦАГИ, может быть связано с особенностями условий обтекания, реализуемых в эксперименте, не учитываемыми в рамках идеализированной постановки расчетного исследования, что говорит о важности правильного учета особенностей обтекания как в эксперименте, так и в численном моделировании. В результате, для ответа на вопрос о влиянии особенностей обтекания, условий закрепления и роли числа Рейнольдса на степень снижения шума цилиндра, достигаемой путем удаления его небольшого сегмента, требуются постановка и проведение дополнительных согласованных экспериментальных и расчетных исследований.

Работа была выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант РНФ №21-71-30016). Экспериментальная часть работы с маломасштабными моделями шасси была выполнена на базе УНУ «Заглушенная камера с потоком АК-2» ФАУ ЦАГИ, модернизируемой при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по соглашению №075-11-2021-066. Расчеты были проведены с использованием вычислительных ресурсов Суперкомпьютерного центра «Политехнический» СПбПУ.

Литература

1. E.J. Arcondoulis, Y. Liu, Z. Li, Y. Yang, Y. Wang. Structured porous material design for passive flow and noise control of cylinders in uniform flow. *Materials*, 2019, v.12(18), 2905.
2. L. Li, P. Liu, Y. Xing, H. Guo, Experimental investigation on the noise reduction method of helical cables for a circular cylinder and tandem cylinders. *Applied Acoustics*, 2019, v.152, pp. 79-87.
3. V.F. Kopiev, P.N. Kazansky, V.A. Kopiev, I.A. Moralev, M.Y. Zaytsev. HF DBD plasma actuators for reduction of cylinder noise in flow. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2017, v. 50(47), 475204.
4. V.F. Kopiev, M.Yu. Zaytsev, N.N. Ostrikov, S.A. Tchernushev, Aerodynamic noise reducing method (variants) and low-noise structural element for operating in a fluid medium stream, US Patent 2009/0256027, 2009.
5. V.F. Kopiev, M.Yu. Zaitsev, R.K. Karavosov, Experimental Investigation of Azimuthal Structure of Dipole Noise for Rigid Cylinder Inserted in Turbulent Jet, in: 10th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 10-12 May 2004, Manchester, United Kingdom, AIAA Paper 2004-2927.
6. M. Yu. Zaitsev, V. F. Kopiev, Mechanism of Sound Radiation by Turbulence near a Rigid Body, *Fluid Dyn.*, 43 (1) (2008) 86–96.
7. V. Kopiev, M. Zaitsev, N. Ostrikov, New noise source mechanism of flow/surface interaction as applied to airframe noise reduction, in: 12th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 8-10 May 2006, Cambridge, Massachusetts, USA, AIAA Paper 2006-2717.
8. V. Kopiev, M. Zaitsev, N. Ostrikov, Reynolds number effect in a problem of sound generation by round and truncated cylinder streamlined by turbulent flow, *Prog. Flight Phys.*, 3 (2012) 421- 428.
9. Kopiev V., Belyaev I., Zaytsev M., Zhao K. Experimental study of truncated-cylinder struts for noise reduction of large-scale landing gears. *J. Sound Vib.*, 2021, v. 511, 116362.
10. P.R. Spalart, S. Deck, M.L. Shur, K.D. Squires, M.Kh. Strelets, A. Travin. A new version of detached-eddy simulation, resistant to ambiguous grid densities. *Theor. Comput. Fluid Dyn.*, 2006, v. 20, pp. 181-195.
11. M.L. Shur, P.R. Spalart, M.Kh. Strelets, A.K. Travin. An enhanced version of DES with rapid transition from RANS to LES in separated flows. *Flow, Turbulence and Combustion*, 2015, v. 95, No. 4, pp 709-737.