

УДК 534.23

## Исследование акустического излучения расчетной сверхзвуковой струи в направлении вверх по потоку

*Миронюк Игорь Юрьевич<sup>(\*)</sup>*

mironyuck.ig@yandex.ru

*Бычков Олег Павлович**Копьев Виктор Феликсович**Фараносов Георгий Анатольевич*

ФАУ «ЦАГИ», Московский комплекс, Москва, Россия

**Аннотация.** В настоящей работе представлен анализ аэроакустических характеристик расчетной сверхзвуковой струи с числом Маха  $M = 2$ , истекающей из круглого сопла Лавалья, полученных путем численного моделирования методом LES. Приводятся спектры суммарного шума и отдельных азимутальных мод. Особое внимание уделяется акустическому излучению струи в направлении вверх по потоку, для которого отмечается наличие пиков в спектре суммарного шума и в спектрах отдельных мод. Показано, что возникновение таких пиков обуславливается собственными модами возмущений, существующими на начальном участке струи и резонансно усиливающимися в определенных частотных диапазонах.

**Ключевые слова:** сверхзвуковая струя, численное моделирование, расчетный режим, азимутальные моды

## Investigation of acoustic radiation of a supersonic jet at the designed mode in the upstream direction

*Mironyuk Igor Yurievich<sup>(\*)</sup>*

mironyuck.ig@yandex.ru

*Bychkov Oleg Pavlovich**Kopiev Victor Feliksovich**Faranosov Georgy Anatolyevich*

FAU TsAGI, Moscow Complex, Moscow, Russia

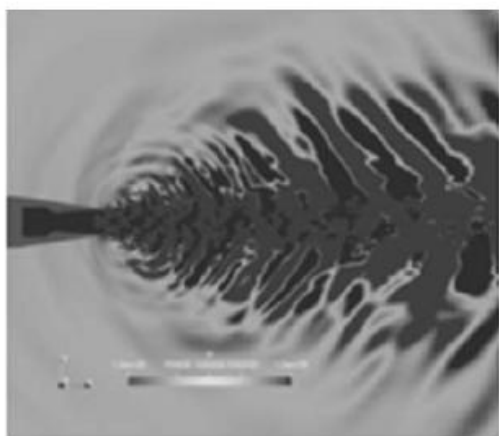
**Abstract.** This paper presents the results of modeling the aeroacoustic characteristics of a calculated supersonic jet with a Mach number  $M = 2$  flowing from a circular Laval nozzle obtained by numerical simulation using the LES method. The spectra of the total noise and individual azimuthal modes are given. Special attention is paid to the acoustic radiation of the jet in the upstream direction, for which the presence of peaks in the spectrum of total noise and in the spectra of individual modes is noted. It is shown that the occurrence of such peaks is caused by eigenmodes of perturbations that exist in the initial section of the jet and are resonantly amplified in certain frequency ranges.

**Keywords:** supersonic jet, numerical simulation, designed mode, azimuthal modes

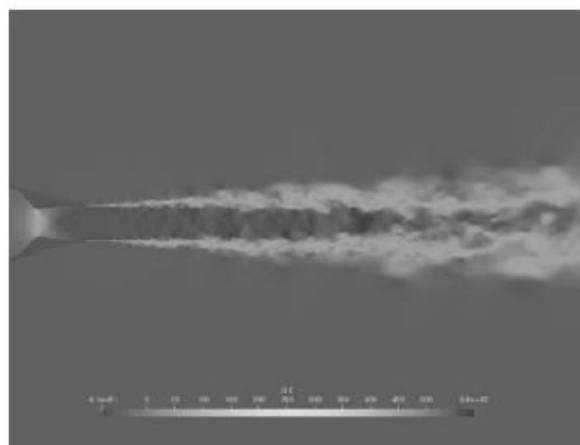
**Введение.** Шум высокоскоростной реактивной струи является доминирующей составляющей шума на местности самолетов, оснащенных двигателями с малой степенью двухконтурности. Такие двигатели могут использоваться на сверхзвуковых гражданских самолетах нового поколения. Таким образом, задача о механизмах генерации шума в высокоскоростных струях имеет прямое отношение к вопросу о разработке средств снижения шума для сверхзвуковых гражданских самолетов.

На сегодняшний день процессы генерации шума для источников шума, относящихся к области слоя смешения в высокоскоростных струях, согласно теоретическим и экспериментальным результатам, описываются путем рассмотрения развивающихся в слое смешения струи крупномасштабных структур — волн неустойчивости [1, 2]. В дозвуковых же низкоскоростных струях, напротив, среди доминирующих источников шума выделяют источники квадрупольного типа, связанные с динамикой мелкомасштабной турбулентности в слое смешения струи [3, 4]. Однако существует и такое акустическое излучение, которое не описывается приведенными выше моделями генерации шума — это акустическое излучение в направлении вверх по потоку. В рамках настоящей работы особое внимание уделено именно такому акустическому излучению.

**Методы исследования.** В работе проведено численное моделирование струи, истекающей из сопла Лавалья на расчетном режиме с числом Маха  $M = 2.0$  (рис. 1). Экспериментальная база данных для анализа и валидации результатов численного моделирования представляет из себя результаты измерений аэроакустических характеристик струй, полученные в различное время в заглушенной камере АК-2 [2, 3, 5–7]. Моделирование производилось методом крупных вихрей (LES), реализованным на базе CABARET [8, 9] на расчетных сетках с умеренным числом ячеек ~13 млн, аналогичным по структуре сеткам, использованным в работе [10]. Дальнее звуковое поле рассчитывалось методом Фокса Вильямса — Хоукингса [11].



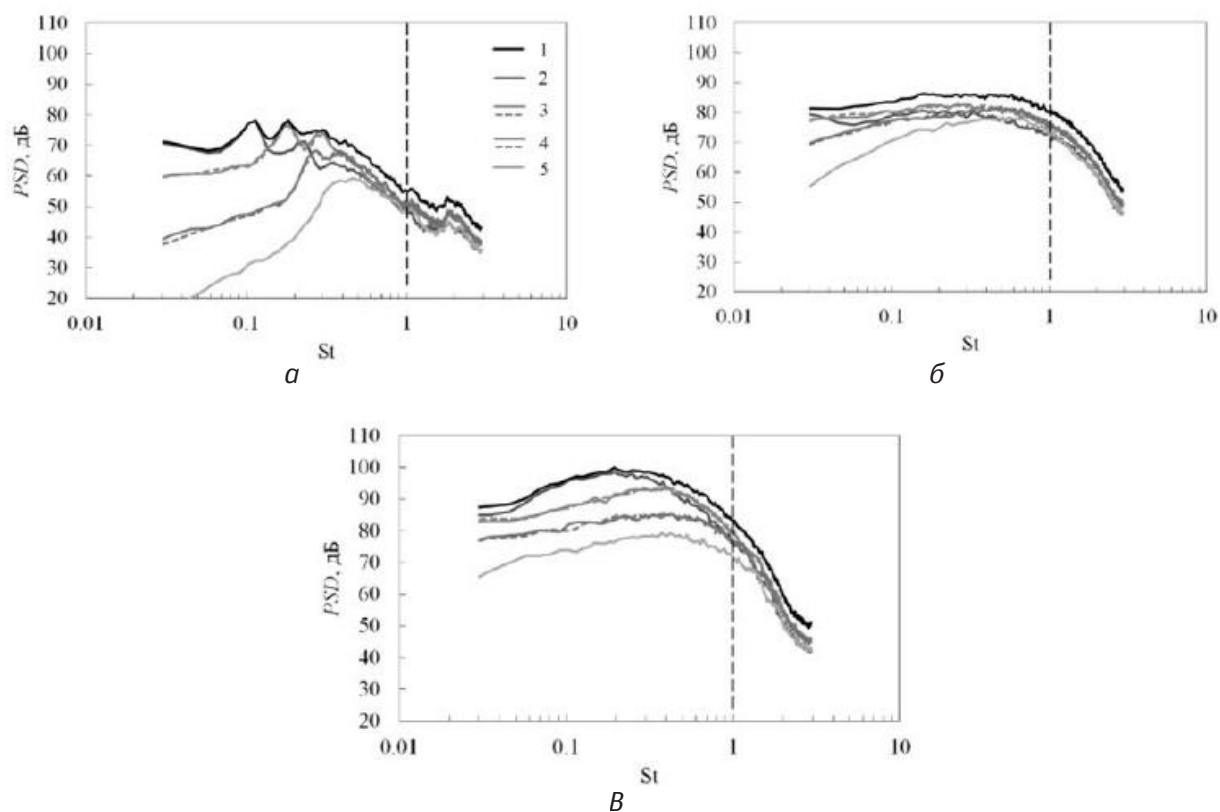
а



б

Рис. 1. Мгновенное поле давления (а) и скорости (б)

**Результаты.** На рис. 2 приведены спектры как для суммарного шума, так и для отдельных азимутальных мод для трех характерных значений продольной координаты, отнесенной к диаметру сопла  $D = 0,03$  м:  $x/D = -77$  (направление вверх по потоку);  $x/D = 7$  (боковое направление) и  $x/D = 40$  (направление вниз по потоку — область максимального излучения). Для излучения вверх по потоку ( $x/D < 0$ ) можно отметить наличие пиков в спектре суммарного шума, при этом различные пики относятся к различным азимутальным модам (рис. 2, *а*). Такой результат находится в согласии с результатами работ [12, 13], в которой наличие пиков связывается с модами возмущений, существующими на начальном участке струи и резонансно усиливающимися в определенных частотных диапазонах, что и приводит к излучению шума в направлении вверх по потоку.

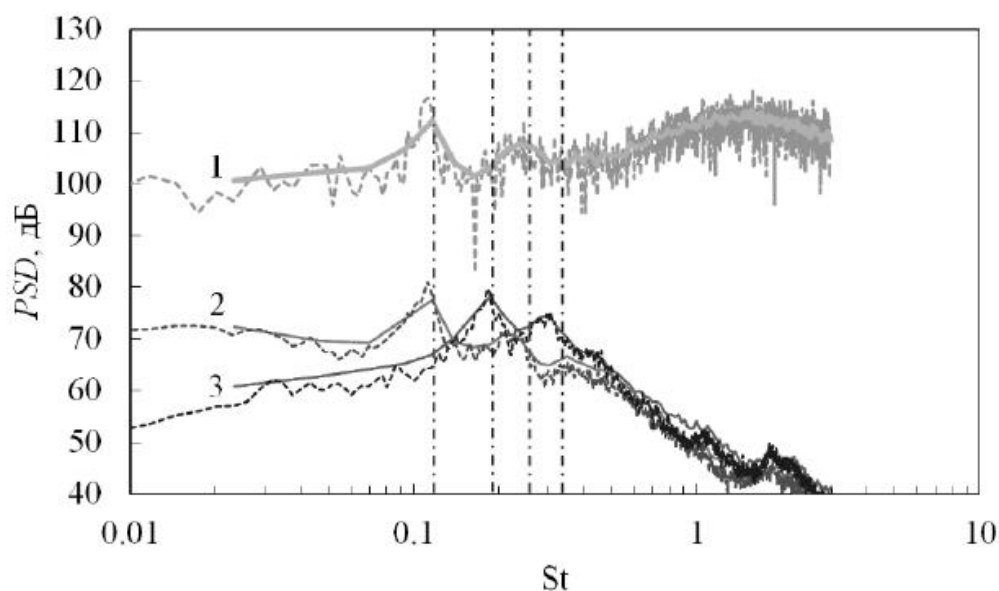


**Рис. 2.** Спектры суммарного шума (1) и отдельных азимутальных мод (2 — мода  $n=0$ , 3 — синус- и косинус-моды  $n=1$ , 4 — синус- и косинус-моды  $n=2$ , 5 — мода  $n=3$ ):

*а* —  $x/D = -77$ ; *б* —  $x/D = 7$ ; *в* —  $x/D = 40$ . Вертикальные линии обозначают примерную границу корректно разрешаемых в расчете частот

Действительно, при рассмотрении спектров пульсаций давления на оси струи в ее потенциальном ядре вблизи сопла можно указать на наличие пиков и привести соответствующие им пики в дальнем поле. На рис. 3 показаны спектр пульсаций давления на оси струи в ее потенциальном ядре и спектры осесимметричной и первой азимутальных мод в направлении вверх по потоку ( $x/D = -77$ ). Для лучшего разрешения узкополосных пиков стоит рассматри-

вать спектры с повышенным частотным разрешением, которое может быть получено за счет удлинения временной реализации для последующего преобразования Фурье, притом необходимо сокращение числа осреднений при оценке спектральной плотности по методу [14], что влечет за собой некую «изрезанность» спектров. Спектры с высоким разрешением позволяют отметить характерную форму пиков с более крутым правым склоном, что является типично для указанного механизма [12, 13]. Поскольку пульсации на оси струи соответствуют осесимметричной моде [15], то пики, наблюдаемые в спектре на оси струи, соответствуют пикам для спектра именно моды  $n=0$  в дальнем поле. На рис. 3 также показаны верхние границы для резонансного усиления мод  $n=0$  и  $n=1$ , рассчитанные для струи  $M=2$  на основе модели тангенциального разрыва [13], которые, как видно, хорошо совпадают с расположением пиков в соответствующих спектрах шума и пульсаций.



**Рис. 3. 1** — спектр пульсаций давления на оси струи при  $x/D=1.2$ ; 2, 3 — спектры шума в дальнем поле при  $x/D=-77$  для мод  $n=0$  и  $n=1$  соответственно. Для каждого случая показаны спектры с частотным разрешением  $\Delta St = 0,023$  (сплошные линии)  $\Delta St = 0,003$  (пунктир). Вертикальными линиями отмечены границы резонансного усиления моды  $n=0$  (красный) и  $n=1$  (синий), рассчитанные для струи  $M=2$  на основе модели тангенциального разрыва [12]

Также был построен частотно-волновой спектр для пульсаций поля давления на оси рассматриваемой струи (рис. 4) и показано, что области резонансного усиления внутренних волн, локализованные в окрестности зон нулевой групповой скорости возмущений, соответствуют частотам, на которых наблюдаются пики в спектрах шума в дальнем поле, что подтверждает существование резонансного взаимодействия между дальним акустическим полем и внутренними волнами в сверхзвуковой струе.

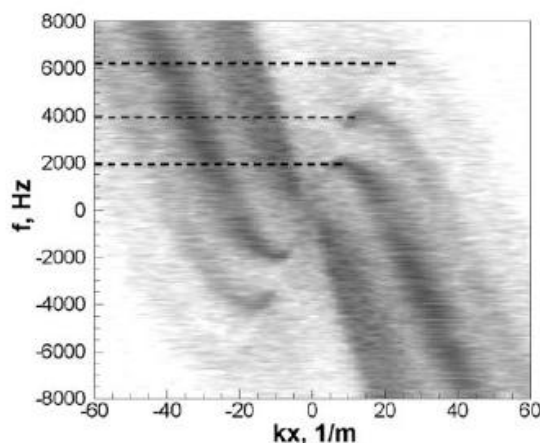


Рис. 4. Частотно-волновой спектр пульсаций давления на оси струи

**Заключение.** В работе выполнено численное моделирование аэроакустических характеристик затопленной сверхзвуковой струи, истекающей из сопла Лавала на расчетном режиме (число Маха  $M = 2$ ). Представлены результаты расчетов методом крупных вихрей на сетке умеренного объема, содержащей около 13 млн. ячеек. Полученные в расчете аэродинамические и акустические характеристики струи сопоставлены с имеющимися экспериментальными данными.

Анализ излучения отдельных азимутальных компонент шума в дальнем поле для широкого диапазона углов наблюдения, превышающего доступный в экспериментах, показал, что для направления вверх по потоку существуют резонансно усиливающиеся в определенных частотных диапазонах моды в области начального участка струи. Заметим, что модель описания данного механизма генерации шума еще не является развитой в достаточной мере.

#### Список источников

- [1] Tam C.K.W., Burton D.E., Sound generated by instability waves of supersonic flows: part 2. Axisymmetric jets. *J. Fluid Mech.*, 1984, vol. 138, pp. 273–295.
- [2] Kopiev V., Chernyshev S., Zaitsev M., Kuznetsov V., Experimental validation of instability wave theory for round supersonic jet. 12th AIAA/CEAS aeroacoustics conference. AIAA paper, 2006, pp. 2006–2595.
- [3] Копьев В.Ф., Чернышев С.А., Новая корреляционная модель каскада турбулентных пульсаций как источника шума в струях. *Акустический журнал*, 2012, т. 58, № 4, с. 482–497.
- [4] Бычков О.П., Зайцев М.Ю., Копьев В.Ф., Фараносов Г.А., Чернышев С.А. О двух подходах к моделированию шума низкоскоростных дозвуковых струй. *Доклады РАН. Физика, Технические Науки*, 2022, т. 506, № 1, с. 16–25.
- [5] Копьев В.А., Панкратов И.В., Копьев В.Ф., Ульяницкий В.Ю., Разработка плазменного актуатора на основе барьерного разряда для управления шумом турбулентной струи, истекающей из сверхзвукового сопла. *Всерос. аэроакустический форум: сб. тез. Жуковский, ЦАГИ*, 2021, вып. 2807, с. 110–111.

- [6] Бычков О.П., Фараносов Г.А. Экспериментальное исследование и теоретическое моделирование шума взаимодействия струи и крыла самолета. *Акустический журнал*, 2018, т. 64, № 4, с. 437–453.
- [7] Бычков О.П., Фараносов Г.А., Оценка пульсаций давления в ближнем поле струи при наличии спутного потока на основе результатов термоанемометрических измерений. *Акустический журнал*, 2024, т. 70, № 1, с. 77–91.
- [8] Faranosov G.A. et al. CABARET method on unstructured hexahedral grids for jet noise computation. *Computers & Fluids*, 2013, vol. 88, pp. 165–179.
- [9] Markesteijn A.P., Semiletov V.A., Karabasov S.A. GPU CABARET Solver Extension to Handle Complex Geometries Utilizing snappyHexMesh with Asynchronous Time Stepping. 23rd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. Denver, CO, 2017, pp. 2017–4184. <https://doi.org/10.2514/6.2017-4184>
- [10] Бычков О.П., Миронюк И.Ю., Солнцев И.А., Фараносов Г.А., Юдин М.А., Анализ аэроакустических характеристик расчетной сверхзвуковой струи на основе данных численного моделирования. *Акустический журнал*, 2024, т. 70, № 3, с. 110–124.
- [11] Faranosov G.A., Goloviznin V.M., Karabasov S.A., Kondakov V.G., Kopiev V.F., Zaitsev M.A. CABARET method on unstructured hexahedral grids for jet noise computation. *Computers & Fluids*, 2013, vol. 88, pp. 165–179.
- [12] Towne A., Cavalieri A.V., Jordan P., Colonius T., Schmidt O., Jaunet V., Brès G.A. Acoustic resonance in the potential core of subsonic jets. *J. Fluid Mech.*, 2017, vol. 825, pp. 1113–1152.
- [13] Bogey C. Tones in the acoustic far field of jets in the upstream direction. *AIAA Journal*, 2022, vol. 60, no. 4, pp. 2397–2406.
- [14] Welch P. The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: a method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Trans. Audio Electroacoust.*, 1967, vol. 15, no. 2, pp. 70–73.
- [15] Cavalieri A.V.G., Rodriguez D., Jordan P., Colonius T., Gervais Y. Wavepackets in the velocity field of turbulent jets. *J. Fluid Mech.*, 2013, vol. 730, pp. 559–592.