ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ШУМА НАГРЕТЫХ ДОЗВУКОВЫХ И СВЕРХЗВУКОВЫХ СТРУЙ

И.В. Беляев, **О.П. Бычков**, В.Ф. Копьев, И.Ю. Миронюк, Г.А. Фараносов, С.А. Чернышев

ФАУ ЦАГИ, Москва, oleg.bychkov@tsagi.ru

Исследование шума турбулентных струй продолжается уже около 70-ти лет, однако общепринятая теория процесса шумообразования до сих пор отсутствует. При этом особый интерес представляет исследование шума нагретых струй, поскольку именно при таких условиях работают настоящие реактивные двигатели. В большинстве экспериментальных исследований в заглушенных камерах и при построении соответствующих моделей источников шума, ввиду сложности организации процесса подогрева, рассматривались изотермические, так называемые «холодные» струи (например, [1-3]). Поэтому, хотя для нагретых струй накоплен определенный экспериментальный материал и выявлены основные тенденции влияния температуры на их акустические характеристики [4], степень детализации проведенных исследований остается весьма низкой по сравнению с таковой для холодных струй.

В рамках модернизации уникальной научной установки «Заглушенная камера с потоком АК-2» ФАУ «ЦАГИ», проведенной в 2021-2023 гг. при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, реализована возможность детального исследования характеристик шума струй в широком диапазоне скоростей их истечения и температур нагрева (рис. 1). В работе представлены результаты предварительного исследования акустических характеристик струй в диапазоне чисел Маха $0.4 \leq M \leq 2$ и температур торможения $298K \leq T^* \leq 523K$.

Первичный анализ полученных экспериментальных данных продемонстрировал основные известные тренды по изменению шума струи при её нагреве. Впервые была выполнена подробная азимутальная декомпозиция шума нагретых струй. Показано, что для сверхзвуковой струи, истекающей из сопла с расчетным числом Маха $M = 2$, нагревание от температуры $T^* = 298$ K до

$T^* = 498$ K при фиксированном расчетном перепаде давления $\pi_s = 7.82$ приводило к равномерному увеличению шума в дальнем поле без изменения в азимутальном составе (рис. 2). При этом постепенный сдвиг максимума излучения в область больших углов θ от оси струи, как и увеличение общего уровня шума, связано с увеличением фактической скорости истечения струи при её нагреве.

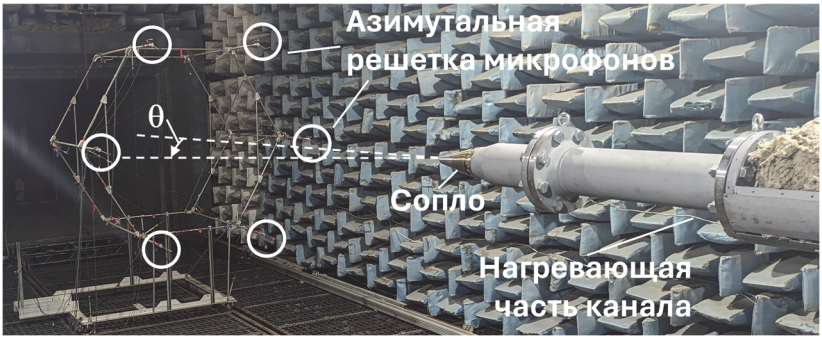

Рис. 1. Экспериментальное исследование шума турбулентной нагреваемой струи в заглушенной камере АК-2 ЦАГИ с помощью метода азимутальной декомпозиции

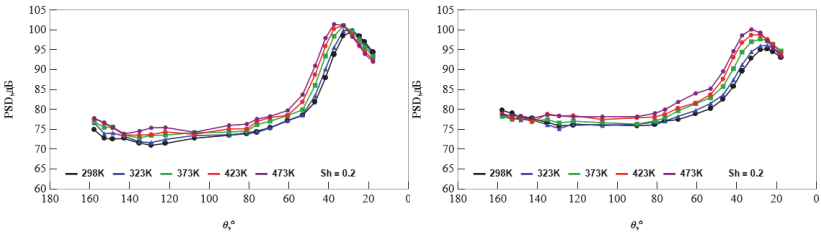

Рис. 2. Изменение направленности азимутальных мод на цилиндрической поверхности в дальнем поле для числа Струхаля $St = 0.2$ при различной температуре струи (на графиках указана полная температура в струе). Слева – осесимметричная мода; справа – первая азимутальная мода. $M = 2$, расчетный режим.

Для дозвуковых струй в эксперименте имелась возможность сравнения акустических характеристик холодной и нагретой струи при фиксированной скорости истечения. Таким образом было получено, что для струи малой скорости её нагрев приводит к модификации азимутального состава так, что увеличивается осесимметричная мода вниз и вверх по потоку (оставаясь неизменной в

боковом направлении), а первая мода, наоборот, увеличивается преимущественно в боковом направлении. Такой характер изменения азимутальной направленности был получен впервые и сигнализирует о появлении нового дополнительного источника шума дипольного характера в случае нагретой струи.

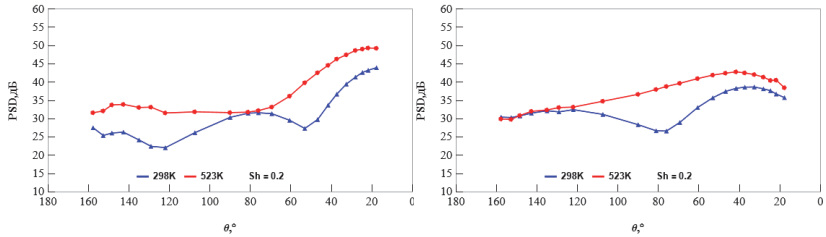

Рис. 3. Изменение направленности азимутальных мод на цилиндрической поверхности в дальнем поле для числа Струхаля St = 0.2 при различной температуре струи. Слева – осесимметричная мода; справа – первая азимутальная мода. Акустическое число Маха $M_a = 0.4$.

В акустическом отделении ЦАГИ также проводится численное моделирование шума нагретых струй, что при тщательной валидации собственного кода на полученных новых экспериментальных данных позволит получить дополнительную информацию, в том числе о тонких характеристиках энтропийного источника шума.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант 21-71-30016).

Литература

1. V. Kopiev, S. Chernyshev. Correlation model of quadrupole noise sources in turbulent jet: effect of refraction. AIAA paper. 2015. 2015-3130.
2. A.V. Cavalieri, P. Jordan, T. Colonius, Y. Gervais. Axisymmetric superdirectivity in subsonic jets. J. Fluid Mech, v. 704., 2012, pp. 388-420.
3. Бычков О.П., Зайцев М.Ю., Копьев В.Ф., Фараносов Г.А., Чернышев С.А. О двух подходах к моделированию шума низкоскоростных дозвуковых струй, т.506, №1, 2022, с. 16-25.
4. A. Khavaran, D.C. Kenzakowski, A.F. Mielke-Fagan. Hot jets and sources of jet noise. IJA, v. 9, No.4-5, 2010, pp. 491-532.