АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том 39 1993 Вып. 5

УДК 629.7.01+533.6

© 1993 г. Е. В. Власов, А. С. Гиневский, В. Г. Пимштейн

СНИЖЕНИЕ ШУМА СВЕРХЗВУКОВЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ СТРУЙ

Излагаются результаты экспериментального исследования снижения широкополосного шума и дискретных его составляющих сверхзвуковых изобарических и неизобарических турбулентных струй в дальнем поле. При этом исходная струя заменяется струйной системой, состоящей из центральной струи и окружающих ее тонких периферийных струек. Анализируется природа полученного эффекта.

Известно [1, 2], что при высокочастотном акустическом облучении дозвуковых турбулентных струй удается снизить генерируемый ими шум. Это связано с воздействием периодических возмущений на когерентные структуры в начальном участке струи и их влиянием на взаимодействие и разрушение этих структур. В качестве источника высокочастотного облучения можно использовать расположенные вокруг основной струи периферийные струйки с диаметром на порядок меньше диаметра основной струи и истекающие со скоростью, равной скорости истечения основной струи [3]. Такой источник излучает шум в довольно широком диапазоне частот, при этом максимум спектра его шума соответствует частоте, которая на порядок выше максимума спектра шума основной струи.

В работе [3] предложенная идея проверялась применительно к околозвуковым турбулентным струям. Проводились эксперименты с изотермическими и неизотермическими модельными струями, а также с реактивной струей натурного турбореактивного двигателя. Было установлено, что в случаях, когда число периферийных струек составляло $N = 3$, 6 или 12, достигается снижение суммарного шума в дальнем поле порядка 2,5 ... 3 дБ, причем наибольший эффект наблюдается в зоне максимального излучения шума, т. е. в направлении под углом $\varphi = 30°$ к оси струи. Показано, что наблюдаемое снижение шума струи не связано с аэродинамическим взаимодействием периферийных струек с центральной или с экранированием шума центральной струи периферийными струйками. С этой целью исследовались две струйные системы, отличающиеся направлением истечения периферийных струек. В первой — струйки истекали параллельно оси центральной струи, во второй — они были направлены под углом $\varphi_1 = 15°$ к этой оси, что исключало возможность аэродинамического взаимодействия, т. е. их перемешивания с центральной струей. В обоих случаях эффект воздействия струек оказался практически одинаковым. Таким образом, влияние аэродинамического взаимодействия в струйной системе незначительно.

Были также проведены измерения при истечении периферийных струй только из трех сопел, расположенных либо со стороны, где находится микрофон, либо с противоположной стороны. Оказалось, что в обоих случаях достигается одинаковое снижение шума, т. е. эффекты экранирования шума центральной струи периферийными струйками незначительны. Таким образом, было установлено, что для околозвуковых струй достигнутое снижение шума обусловлено акустическим облучением.

В настоящей работе сравнивается шум сверхзвуковых турбулентных струй, истекающих из одиночного сопла и системы сопел подобно тому, как это было сделано для околозвуковых турбулентных струй. Рассматриваются отдельно изобарические и неизобарические сверхзвуковые струи.

Сверхзвуковые изобарические (расчетные) струи во многом сходны с дозвуковыми турбулентными струями. Так, в обоих случаях параметры крупномасштабных когерентных структур слабо зависят от числа Рейнольдса. В то же время характерное число Струхаля, соответствующее когерентным структурам в конце начального участка, уменьшается от Sh = 0,5 при числе Маха истечения $M_0 = 0{,}5$ до Sh = 0,15 при $M_0 = 2{,}5$ [4]. Возможно, это отличие обусловлено большей длиной начального участка сверхзвуковых изобарических струй по сравнению с дозвуковыми струями, вследствие чего при сверхзвуковых скоростях истечения возрастает число попарных слияний вихревых структур. При исследовании акустического поля сверхзвуковых изобарических струй было установлено [5], что эволюция крупномасштабных упорядоченных структур определяет основной механизм генерации звука. Максимальные уровни шума, как и в дозвуковых струях, реализуются в направлении, составляющем около 30° с осью струи.

Акустическое излучение *сверхзвуковых неизобарических струй* существенно отличается как от излучения сверхзвуковых изобарических струй, так и, в еще большей степени,— дозвуковых струй [6, 7]. Главное отличие обусловлено тем, что в сверхзвуковых неизобарических струях возникают скачки уплотнения и появляются новые источники шума, обусловленные неустойчивостью струи, а также взаимодействием крупномасштабных вихрей со скачками уплотнения [8]. Помимо широкополосного шума такие струи генерируют дискретные составляющие.

Аэродинамический шум сверхзвуковых струй определяется числом Маха истечения M_0, степенью нерасчетности $n = p_a/p_\infty$ и рядом других факторов. Так, например, возбуждение дискретного тока зависит от температуры струи, наличия отражающих поверхностей вблизи сопла, конденсированной фазы в струе, влажности окружающей среды и т. д. [7].

Рассмотрим еще два аспекта поставленной задачи. Во-первых, поскольку шум периферийных струек при сверхзвуковых скоростях истечения может воздействовать на центральную струю, подобно тому как это имеет место в дозвуковых струях, представляет интерес механизм воздействия акустического облучения на сверхзвуковые струи. В работе [9] показано, что при поперечном акустическом облучении сверхзвуковых ($M_0 = 2$) нерасчетных ($n = 0{,}5...2{,}0$) струй с уровнем возбуждения $(\langle p'^2 \rangle)^{1/2}/p_0 \simeq 0{,}1 \ldots 0{,}2\%$ от полного давления в струе образуются возмущения на облучаемой стороне струи, причем сверхзвуковая струя излучает звук на частоте внешнего воздействия. При этом сколько-нибудь заметного влияния частоты внешнего воздействия на расширение сверхзвуковой струи не наблюдается. Важно также подчеркнуть, что отмеченное выше воздействие звука на сверхзвуковую струю наблюдается только при облучении присопловой части струи. Облучение других участков сверхзвуковой струи никак не влияет на ее структуру даже при очень высоких уровнях звукового давления.

Во-вторых, при принятой в настоящей работе схемы компоновки с относительно большим расстоянием между осями соседних периферийных сопел дискретные составляющие шума истекающих из них струй излучаются независимо [7].

Акустические характеристики одиночной струи и струйной системы измерялись в заглушенной камере. На рис. 1 представлена схема струйного устройства — центрального сопла (диаметр критического сечения $d_{1кр} = 50$ мм) и окружающих его 6 периферийных сопел ($d_{2кр} = 5$ мм; $D_2 = 120$ мм). Контур сопел был близок к соплу Лаваля, что обеспечивает на расчетном режиме истечения ($n = 1$) получение сверхзвуковой почти изобарической струи с числом Маха $M_0 = 2$. При этом число Рейнольдса, определенное по диаметру критического сечения $d_{1кр}$, равно $\mathrm{Re}_1 = 2{,}4 \cdot 10^6$. Изменяя давление в ресивере, можно было реализовать в проведенных опытах степень нерасчетности струи в пределах $n = 0{,}5...1{,}5$. Струйное устройство крепилось к ресиверу, диаметр торца которого $D_1 = 250$ мм. Спектры шума в дальнем поле измерялись в третьоктавных и узких ($\Delta f = 6$ и

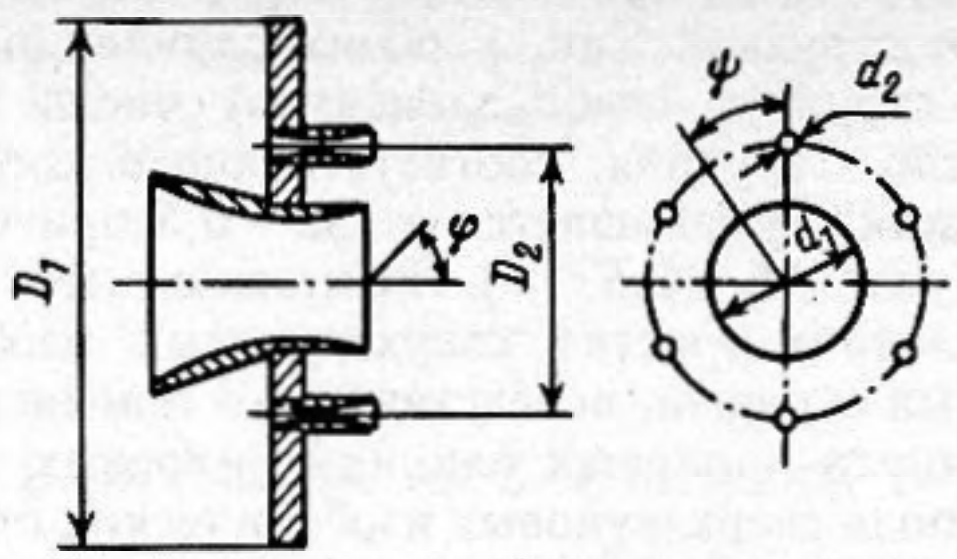

Рис. 1. Схема многосоплового устройства

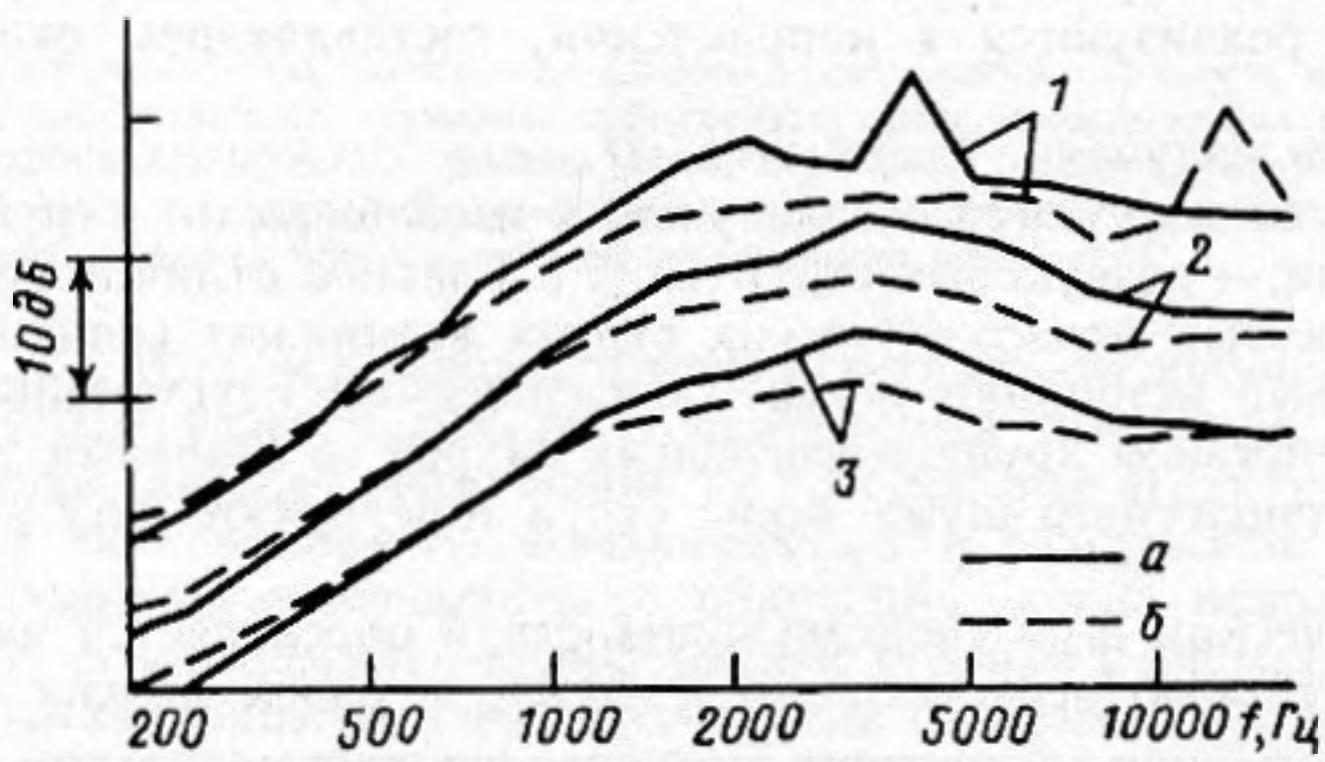

Рис. 2. Третьоктавные спектры шума одиночной струи и струйной системы в дальнем звуковом поле при $\varphi = 30°$ и $M_1 = 2$ *а* — $M_2 = 0$, *б* — $M_2 = 2$; *1* — $n = 0{,}75$; *2* — $n = 1{,}0$; *3* — $n = 1{,}5$

12 Гц) полосах частот для струйной системы при различном числе периферийных струек $N = 1$, 3 и 6.

Были рассмотрены три случая: а) в отсутствие периферийных струек ($M_2 = 0$) — струя истекала только из центрального сопла, б) при истечении струи из центрального и N периферийных сопел ($N = 1$, 3 и 6) и в) при истечении струй только из периферийных сопел ($M_1 = 0$).

На рис. 2 представлены третьоктавные спектры шума сверхзвуковых струй в дальнем поле при $M_1 = 2$, $M_2 = 0$ и 2 и $n = 0{,}75$; 1,0 и 1,5 при угле $\varphi = 30°$. Сравнение этих спектров при $M_1 = 2$, $M_2 = 0$ со случаем $M_1 = 2$, $M_2 = 2$ позволяет оценить снижение шума, достигаемое при наличии периферийных струек. Отсюда можно заключить, что при расчетном режиме истечения ($n = 1$), когда дискретная составляющая не образуется, снижение уровня широкополосного шума в присутствии периферийных струек достигает 5 дБ. При нерасчетных режимах истечения ($n \neq 1$) основное снижение шума, вызванное периферийными струйками, обусловлено подавлением дискретной составляющей. В отдельных случаях, однако, наблюдается смещение дискретной составляющей в область больших частот. Снижение шума здесь может достигать ~ 10 дБ.

Были также измерены узкополосные спектры струйной системы и центральной струи при $\varphi = 30°$, $M_1 = 2$ и $M_2 = 0$ и 2 и $n = \mathrm{var}$. На рис. 3 они представлены для случаев $n = 0{,}75$; 1,0 и 1,5.

Анализ узкополосных спектров подтверждает предыдущие выводы, сделанные при рассмотрении третьоктавных спектров. Так, на *расчетных* режимах истечения (изобарические струи) при наличии периферийных струек происходит заметное, до 5—7дБ, снижение шума, главным образом в области низких частот. При больших частотах эффект исчезает.

На *нерасчетных* режимах истечения (неизобарические струи) влияние периферийных струек при частотах $f < 12$ кГц приводит к снижению широкополосного шума примерно на 5дБ и подавлению дискретных составляющих, пре-

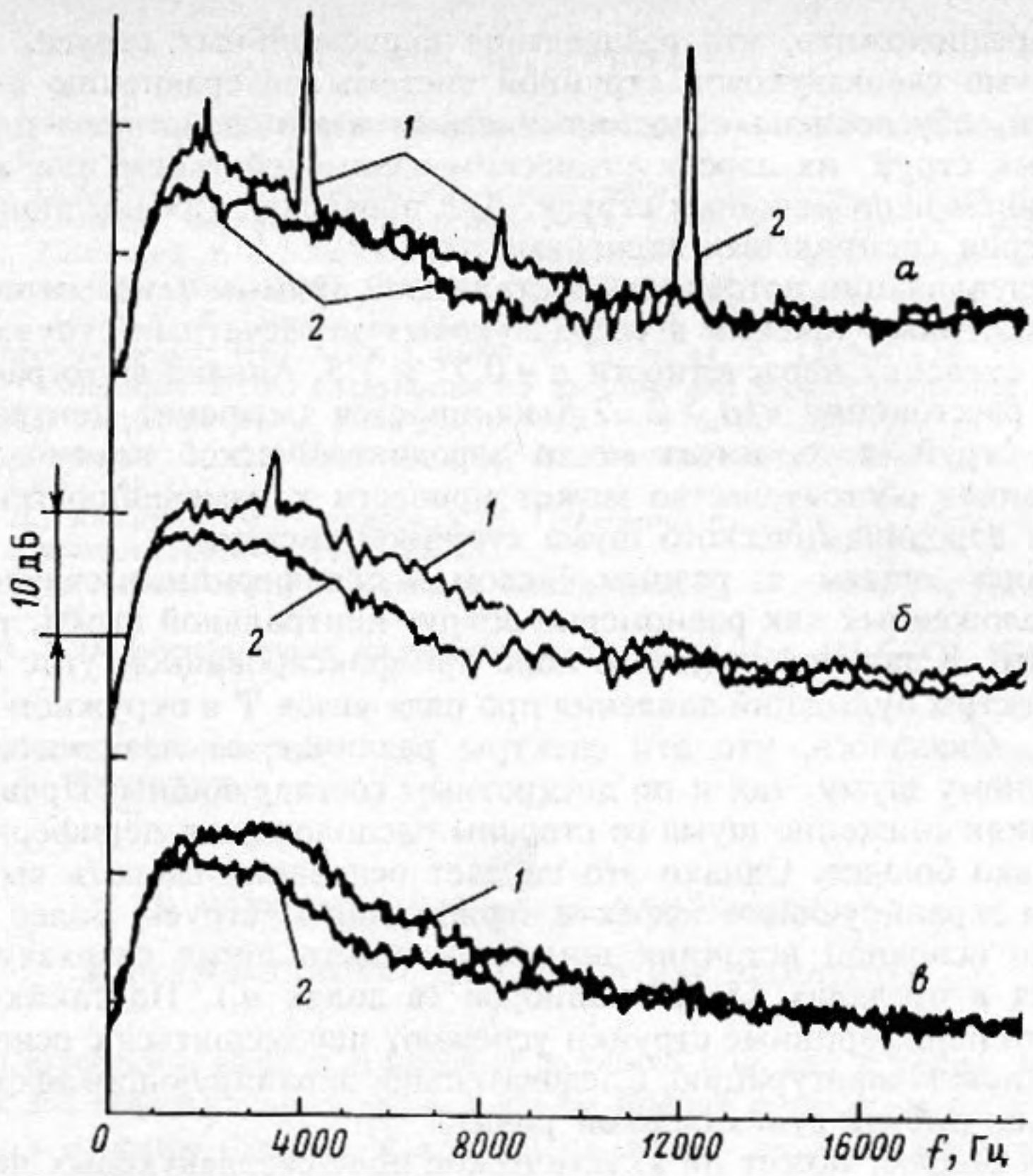

Рис. 3. Узкополосные спектры шума одиночной струи и струйной системы в дальнем поле при $\varphi = 30°$ и $M_1 = 2{,}0$. *а* — $n = 0{,}75$; *б* — $n = 1$; *в* — $n = 1{,}5$; *1* — $M_2 = 0$; *2* — $M_2 = 2$

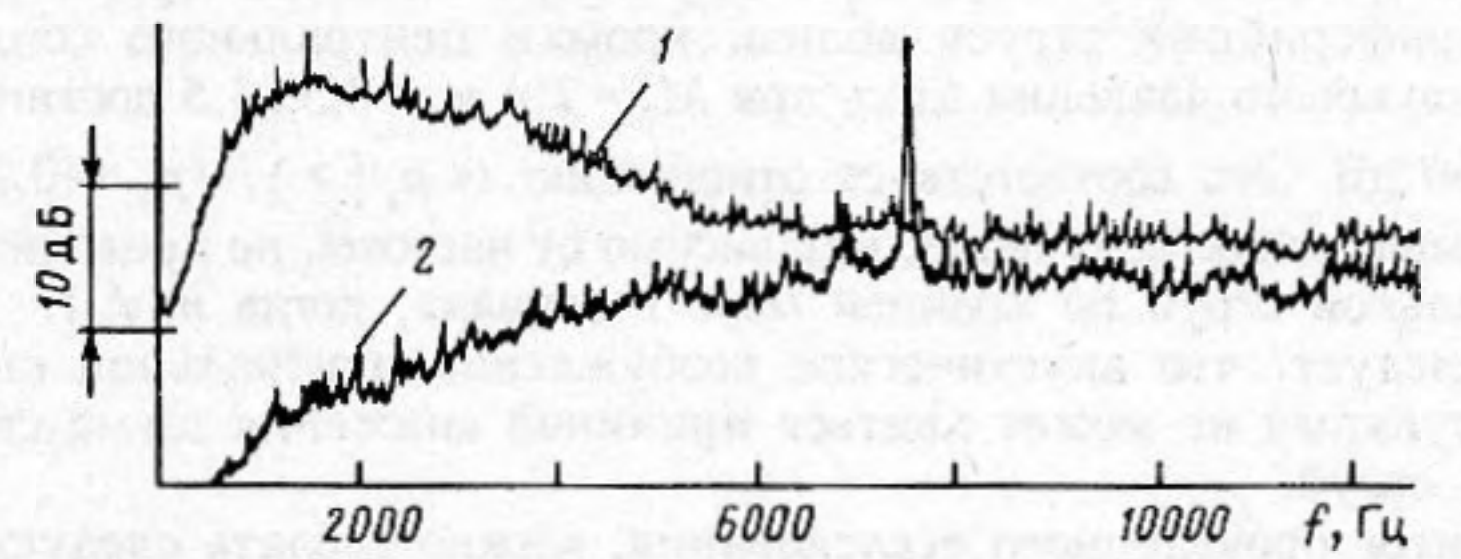

Рис. 4. Узкополосные спектры шума в дальнем звуковом поле струй, истекающих из центрального сопла (*1*) при $M_1 = 2$ и $n = 1{,}5$ и из системы шести периферийных струй (*2*) при $M_2 = 2$ и $n = 1{,}5$

вышающих уровень сплошного шума на 10...15 дБ. В то же время истечение периферийных струек в ряде случаев сопровождается образованием высокочастотных дискретных составляющих, превышающих уровень сплошного шума на 15...20дБ.

На рис. 4 представлены характерные спектры шума струи, истекающей из центрального сопла (1), и системы, состоящей только из шести периферийных струек (2). Из сопоставления графиков на рис. 3 и 4 отчетливо видно, что широкополосный шум системы периферийных струек ($N = 6$) гораздо ниже шума как одиночной центральной струи, так и всей исследованной системы в целом. В то же время система периферийных струек генерирует дискретную составляющую шума на высоких частотах.

Можно предположить, что воздействие периферийных струек, вызывающих снижение шума сверхзвуковой струйной системы по сравнению с шумом одиночной струи, обусловлено аэродинамическим взаимодействием центральной и периферийных струй, их аэроакустическим взаимодействием или же экранирующим действием периферийных струек. Для проверки этих предположений была проведена серия специальных экспериментов.

Путем визуализации потока, осуществляемой прямым теневым методом, были получены картины течения в сверхзвуковых нерасчетных струях при $M_1 = 2$; $M_2 = 0$ и 2 и степенях нерасчетности $n = 0{,}75$ и 1,5. Анализ фотографий показал, что уже на расстояниях $x/d_1 > 2...2{,}5$ начинается смешение центральной и периферийной струй, т. е. имеет место аэродинамическое взаимодействие этих струй. Указанное обстоятельство может привести к изменению генерации низкочастотного аэродинамического шума струйной системой.

Проводились опыты с разным числом N периферийных струек (например, $N = 3$), расположенных как равномерно вокруг центральной струи, так и по одну сторону от нее. В дальнем звуковом поле при фиксированном угле $\varphi = 30°$ были измерены спектры пульсаций давления при ряде углов Ψ в окружном направлении (см. рис. 1). Оказалось, что эти спектры различаются незначительно как по широкополосному шуму, так и по дискретным составляющим. Правда, в отдельных измерениях снижение шума со стороны расположения периферийных струек было несколько больше. Однако это не дает оснований сделать вывод о значительной роли экранирующего эффекта периферийных струек. Более того, хорошо известно, что основной источник широкополосного шума сверхзвуковых струй располагается в пределах 15...20 калибров (в долях d_1). На таких расстояниях от среза сопла периферийные струйки успевают перемешаться с основной струей, образуя сложную конфигурацию. Следовательно, экранирующий эффект не может играть сколько-нибудь существенной роли.

Возникает вопрос, может ли акустическое поле сверхзвуковых периферийных струек как-то воздействовать на слой смешения основной струи вблизи выходного сечения сопла подобно тому, как это наблюдается в дозвуковых и околозвуковых струях. Как известно, именно эта часть слоя смешения в наибольшей степени восприимчива к внешнему акустическому облучению. Измерения шума сверхзвуковых периферийных струек вблизи кромки центрального сопла показали, что уровень звукового давления здесь при $M_2 = 2$ и $n_2 = 0{,}5...1{,}5$ достигает величины $L = 145$ ... 160 дБ. Это соответствует отношению $(< p_s'^2 >)^{1/2}/p_0 \approx 0{,}2\%$. Как уже отмечалось выше, такое облучение, независимо от частоты, не приводит к снижению шума центральной струи по крайней мере в случаях, когда $n_1 \neq 1$.

Отсюда следует, что акустическое возбуждение центральной струи периферийными струйками не может явиться причиной снижения шума сверхзвуковых нерасчетных струй.

Подводя итог проведенного исследования, можно сделать следующие выводы. Во-первых, обнаружен эффект снижения шума сверхзвуковых изобарических и неизобарических турбулентных струй при замене одиночного круглого сопла многотрубчатой системой сопел (центральное сопло диаметром d_1, окруженное равномерно расположенными по окружности малыми соплами диаметром $d_2 \simeq 0{,}1d_1$). Показано, что при этом происходит снижение как широкополосного шума, так и низкочастотных дискретных составляющих. Во-вторых, на основе специальной серии экспериментов изучен механизм снижения шума в многосопловой компоновке. Показано, что при сверхзвуковых скоростях потока указанное снижение шума обусловлено в основном эффектом аэродинамического взаимодействия, т. е. перемешиванием этих струек с центральной струей. Таким образом, при использовании многосопловой схемы организации истечения струй механизмы снижения шума при дозвуковых и сверхзвуковых скоростях истечения существенно различаются. Если в первом случае преобладает эффект аэроакустического взаимодействия, то во втором случае — эффект аэродинамического взаимодействия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Власов Е. В., Гиневский А. С.* Проблема аэроакустических взаимодействий//Акуст. журн. 1980. Т. 26. № 1. С. 1—12.
2. *Власов Е. В., Гиневский А. С.* Когерентные структуры в турбулентных струях и следах//Итоги науки и техники. Сер. «Механика жидкости и газа». Т. 20. М.: ВИНИТИ, 1986. С. 3—84.
3. *Власов Е. В., Гиневский А. С., Загузов И. С., Каравосов Р. К.* Акустический глушитель шума реактивной струи//Тр. ЦИАМ. М.: 1991. № 1287. С. 76—83.
4. *Lepicovsky J., Ahuja K. K., Brown W. H., Burrin R. H.* Coherent large-scale structure in high Reynolds number supersonic jets//AIAA J. 1987. V. 25. № 11. P. 1419—1425.
5. *Troutt T. R., Melaughlin D. K.* Experiments on the flow and acoustic properties of a moderate-Reynolds-number supersonic jet//J. Fluid Mech. 1982. V. 116. P. 123—156.
6. *Мунин А. Г., Кузнецов В. М., Леонтьев Е. А.* Аэродинамические источники шума. М.: Машиностроение, 1981. 248 с.
7. *Антонов А. Н., Купцов В. М., Комаров В. В.* Пульсации давления при струйных и отрывных течениях. М.: Машиностроение, 1990. 272 с.
8. *Devis M. R.* Identification of vortex motion in turbulent mixing of choked jets//Exp. Fluids. 1988. № 5. P. 335—343.
9. *Пимштейн В. Г.* О действии звука на сверхзвуковую струю//Изв. АН СССР. МЖГ. 1989. № 6. С. 170—173.

Центральный аэрогидродинамический институт им. Н. Е. Жуковского

Поступила в редакцию 18.02.93

E. V. Vlasov, A. S. Ginevskii, V. G. Pimshtein

SUPERSONIC TURBULENT. JET NOISE REDUCTION

The results of experimental study of reduction of broadband noise and its discrete components from supersonic isobaric and nonisobaric turbulent jets in the far field are presented. In the process the initial jet is replaced by a jet system composed of a central jet and thin peripheral jets surrounding it. The nature of the obtained effect is analyzed.