

УДК 533.697+532.546

НАТЕКАНИЕ СВЕРХЗВУКОВОЙ НЕДОРАСШИРЕННОЙ СТРУИ НА ПРЕГРАДЫ РАЗЛИЧНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ

В. И. Запрягаев, А. В. Солотчин, И. Н. Кавун, Д. А. Яровский

Институт теоретической и прикладной механики им С. А. Христиановича СО РАН,
630090 Новосибирск
E-mail: zapr@itam.ru

Приведены результаты экспериментального исследования структуры течения и характеристик пульсаций потока, возникающих при натекании сверхзвуковой недорасширенной струи на преграды, изготовленные из пористого и непролиаеваемого материалов. Определены спектральные характеристики акустического поля в режиме нестационарного взаимодействия струи с преградой. Выявлено влияние пористости пористых преград на данные характеристики.

Ключевые слова: сверхзвуковая недорасширенная струя, пористая преграда, пористость, уровень акустических возмущений.

Взаимодействие сверхзвуковой недорасширенной струи с преградой, расположенной перпендикулярно натекающему потоку, относится к классу задач газовой динамики, которые остаются актуальными в течение длительного времени. Прежде всего это обусловлено возникновением автоколебаний струи, наличием интенсивных пульсаций давления на преграде и высоким уровнем акустических возмущений в окружающем пространстве. Автоколебания потока перед лицевой поверхностью преграды создают опасность возникновения резонансов, приводящих к сильным вибрациям и усталостному разрушению элементов конструкции, на которые воздействуют струя и акустическое поле. В данной работе представлены результаты экспериментов, свидетельствующие о возможности уменьшения пульсаций течения и устранения автоколебаний при натекании сверхзвуковой струи на преграду.

Эксперименты проводились в аэродинамической трубе Т-326 Института теоретической и прикладной механики СО РАН с использованием струйного модуля. На рис. 1 представлена схема установки, на которой проводились экспериментальные исследования взаимодействия сверхзвуковой недорасширенной струи с преградами различной пористости. В качестве рабочего газа использовался воздух с температурой торможения $T_0 \approx 283$ К. Диаметр выходного сечения осесимметричного сопла $d_a = 15$ мм, число Маха в выходном сечении $M_a = 1,72$, полуугол раствора конической сверхзвуковой части сопла $\varphi = 4^\circ$, число Рейнольдса, рассчитанное по параметрам выходного сечения сопла, $Re = 4 \cdot 10^5$.

Измерялись следующие величины: давление P_0 и температура T_0 в форкамере, давление в камере Эйфеля установки P_c , давление в струйном потоке P_t . В программу экспериментальных исследований входили измерения полного давления вдоль оси и радиуса свободной струи, а также частоты и амплитуды колебаний ближнего акустического поля струи, натекающей на преграды.

В экспериментальных исследованиях использовались три преграды: две пористые (пористые) и одна с пористостью, равной нулю (непролиаеваемая). Пористые прегра-

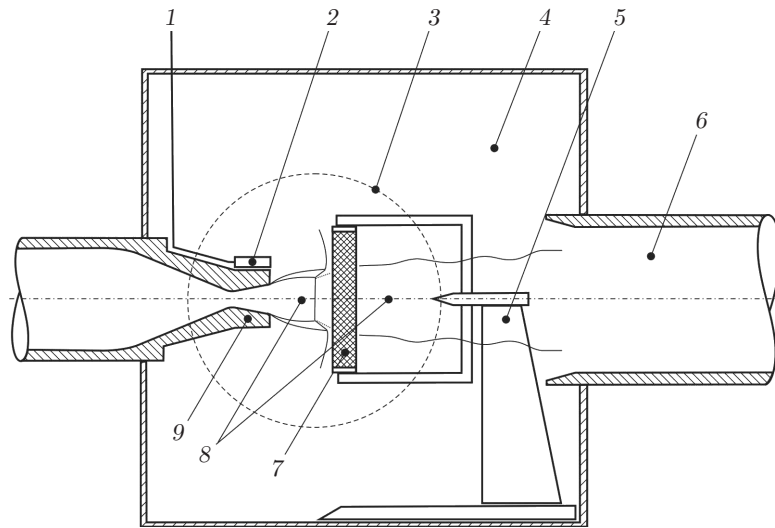


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования струйных потоков:

1 — выход на цифровую систему сбора данных; 2 — датчик пульсаций давления; 3 — смотровое окно; 4 — камера Эйфеля; 5 — пилон, перемещаемый вдоль оси струи; 6 — диффузор; 7 — сменная преграда; 8 — струя (сверхзвуковая недорасширенная перед преградой и дозвуковая за преградой); 9 — сопло

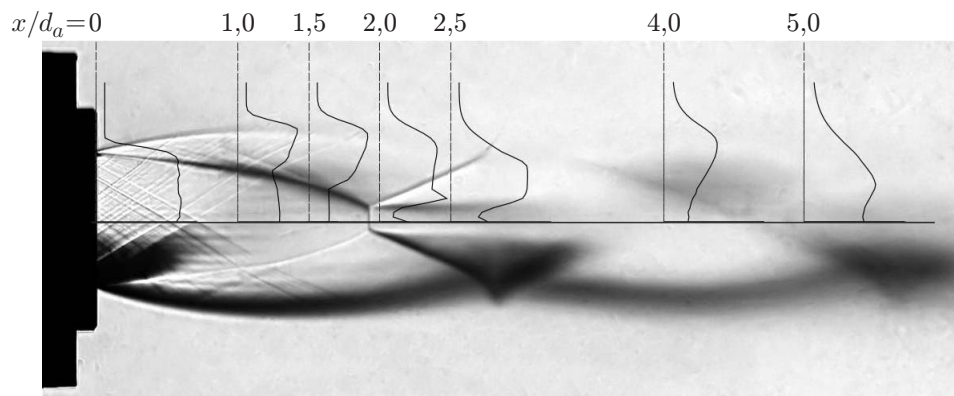


Рис. 2. Шлирен-фотография сверхзвуковой недорасширенной струи ($M_a = 1,72$, $n = 2,1$)

ды R1 и R2, а также непроницаемая преграда R3 выполнены в форме диска диаметром $d_w = 100$ мм и толщиной $\Delta l = 20$ мм. Преграды крепились на специальном координатнике, обеспечивающем перемещение их вдоль оси струи. Сверхзвуковая недорасширенная струя натекала на преграду по нормали к поверхности. Преграды устанавливались в поперечных сечениях, относительное расстояние до которых равно $x/d_a = 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 4,0; 5,0$. На рис. 2 приведены результаты шлирен-визуализации струи с параметрами в выходном сечении сопла $M_a = 1,72$, $n = 2,1$ ($n = P_a/P_c$ — степень нерасчетности струи, равная отношению статического давления в струе на срезе сопла P_a к давлению в окружающей струю воздухе P_c). Поперечные сечения задавались таким образом, чтобы первые четыре сечения располагались в первой “бочке” ячеистой структуры струи, остальные — во второй [1]. При таком положении преграды в струе развивается интенсивный автоколебательный процесс. Наиболее интенсивные автоколебания наблюдались в тех случаях, когда преграды располагались в поперечных сечениях первой “бочки” недорасширенной струи [2–4], поэтому исследования проводились на данном участке течения. На рис. 2 для

каждого поперечного сечения приведено распределение измеряемого давления Пито P_t по радиусу струи. Радиальные профили полного давления в исследуемых поперечных сечениях имеют характерную форму с максимумом на периферии струи, что обусловлено ударно-волновой структурой каждой “бочки” и особенностями течения в слое смешения [5]. Для всех радиальных профилей в поперечных сечениях, в которых проводились исследования взаимодействия струи с преградами, максимум полного давления находился не на оси струи.

Пористые преграды характеризуются пористостью и проницаемостью. Пористость проницаемых тел является величиной постоянной и определяется отношением объема пустот в теле V к общему объему пористой преграды V_0 : $\Pi = V/V_0$ [6]. В эксперименте пористость преград R1 и R2 составляла $\Pi_1 \approx 0,92$, $\Pi_2 \approx 0,56$. Проницаемость преград определяется величиной потерь полного давления при движении газа в пористом теле. В случае изотропного одномерного ламинарного течения через пористый материал перепад давления перед преградой и за ней ΔP вычисляется из уравнения [7]

$$\frac{\Delta P}{\Delta l} = \frac{\mu}{\alpha} u + \beta \frac{\rho u^2}{2},$$

где μ — динамическая вязкость воздуха, Па·с; ρ — плотность воздуха, кг/м³; u — скорость воздуха на выходе из пористой преграды, м/с; Δl — толщина пористой преграды, м; α — коэффициент проницаемости, м²; β — инерциальный параметр, м⁻¹. В проведенных экспериментах использовались пористые материалы, коэффициенты α и β которых в осевом и радиальном направлениях равны и составляют: для преграды R1 $\alpha_1 \approx 10^{-8}$ м², $\beta_1 \approx 10^2$ м⁻¹, для преграды R2 $\alpha_2 \approx 10^{-9}$ м², $\beta_2 \approx 10^3$ м⁻¹. Таким образом, потери полного давления в потоке, прошедшем через пористую преграду R2, больше соответствующих значений в потоке, прошедшем через преграду R1. Следовательно, пористая преграда R1 имеет большую проницаемость.

Результаты исследования, полученные при натекании недорасширенной струи на проницаемые преграды, сопоставлялись с результатами, полученными при натекании струи на непроницаемую преграду, что позволило определить влияние пористости материала на измеряемые характеристики.

С помощью оптического прибора ИАБ-451 проведена визуализация процесса натекания недорасширенной струи на преграды. Теневые фотографии исследуемого объекта поступали на цифровую видеокамеру JAI CV-M10 с разрешением 640 × 480 пикселей. Время экспозиции кадров составляло 2 мкс.

На рис. 3 приведены фотографии струи, натекающей на преграды. Преграды располагались на расстоянии $x = 30$ мм ($x/d_a = 2$) от сопла. Фотографии получены при вертикальном положении ножа Фуко [8] в фокальной плоскости оптической системы. На рис. 3,б,в видны интенсивные возмущения в форме сферических волн, распространяющихся в направлении к соплу от границ веерной струи, растекающейся по поверхности преград. Картина течения на рис. 3,а, соответствующая натеканию на преграду R1, отличается от картин течения на рис. 3,б,в тем, что на ней отсутствует распространение в окружающем пространстве сферических волн, создаваемых веерной струей. Другая особенность течения, зафиксированная на рис. 3,а, заключается в том, что внешняя граница веерной струи образует угол с поверхностью преграды, приближенно равный 25°.

Измерения пульсаций давления в ближнем акустическом поле выполнены пьезоэлектрическим датчиком И-2141, установленным вблизи среза сопла на расстоянии $h = 35$ мм ($h/d_a = 2,33$) от его оси. Чувствительная поверхность (мембрана) датчика направлена в сторону преграды. Внешний диаметр датчика равен 4 мм, диапазон измерений частоты не превышал 50 кГц (резонансная частота датчика составляет 100 кГц). Выходной сигнал

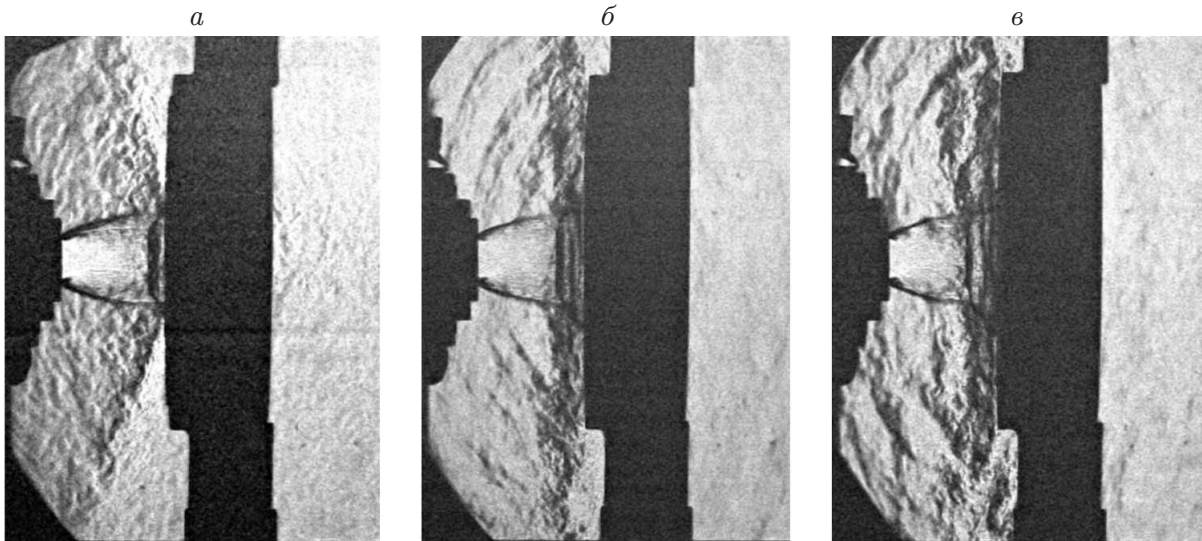


Рис. 3. Фотографии струи, натекающей на различные преграды:
 а — пористая преграда R1; б — пористая преграда R2; в — непроницаемая преграда R3

с датчика подавался на аналого-цифровую плату, частота дискретизации сигнала равна 400 кГц, в каждом эксперименте регистрировалось $2 \cdot 10^6$ сигналов с датчика.

Среднеквадратичное значение величины пульсаций давления в ближнем акустическом поле струи вычислялось по формуле

$$\bar{P}' = \left[\frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} (P'(t))^2 dt \right]^{1/2},$$

где $P'(t)$ — величина пульсаций давления в измеряемой точке в момент времени t ; $\tau = 5,24$ с — время, в течение которого проводились измерения.

На рис. 4 показана область автоколебаний, возникающих при натекании сверхзвуковой недорасширенной струи с числом Маха $Ma = 1,72$ на дискообразную непроницаемую преграду, относительный размер которой равен $d_w/d_a = 6,67$, что в случае истечения струи при заданных степенях нерасчетности равносильно “бесконечно” большому размеру преграды. В переменных $(n; x/d_a)$ автоколебания происходят в узкой полузамкнутой области, в которой доминируют два частотных диапазона $[2, 4]$. На рис. 4 приведены также результаты измерения характеристик ближнего акустического поля при натекании струи на пористые преграды. При степени нерасчетности истечения струи $n = 2,1$ измерения проведены для шести значений расстояния между преградой в струе и срезом сопла (темные точки), при $n = 3,82$ — для одного значения x/d_a (светлая точка).

В полосе частот $0 \div 44$ кГц определены спектры акустических возмущений, распространяющихся от преграды в сторону сопла. На рис. 5 приведены спектры возмущений, измеряемых вблизи выходного сечения сопла (Sh — число Струхалия, определяемое по формуле $Sh = fd_a/a_h$; a_h — скорость звука в окружающем пространстве). Модуль спектральной функции вычисляется по формуле

$$L(f) = 20 \lg \left(\frac{P'(f)}{P_{00}} \right),$$

где

$$P'(f) = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} P'(t) \exp(-2\pi i f t) dt,$$

$P_{00} = 2 \cdot 10^{-5}$ Па — порог слышимости.

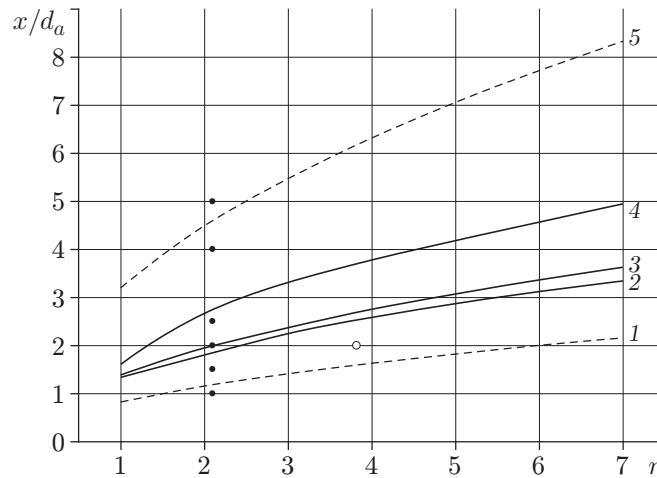


Рис. 4. Область автоколебаний, возникающая при натекании сверхзвуковой недорасширенной струи ($M_a = 1,72$) на дискообразную непроницаемую преграду: области между линиями 1 и 2, 4 и 5 — области высокочастотных колебаний, область между линиями 2 и 4 — область низкочастотных колебаний, полученная по экспериментальным данным [9]; 1, 3, 5 — границы областей высокочастотных колебаний, полученные по эмпирическим зависимостям [2]; темные точки — положения преград при $n = 2,1$, светлая точка — положение преграды при $n = 3,82$

Спектральный состав пульсаций давления ближнего акустического поля для исследуемых преград различен. На частотах, кратных первому дискретному тону, зарегистрировано несколько дискретных составляющих, наличие которых в спектрах указывает на развитие многомодовых колебаний струи. По изменению величины пульсаций давления и частоты первого (основного) дискретного тона определялось влияние пористости на акустические характеристики взаимодействия струи с преградой.

На рис. 6 представлено распределение по безразмерной продольной координате числа Струхала, определенного по частоте первого дискретного тона. Для того чтобы выделить низкочастотный диапазон неустойчивости струи, натекающей на сплошную преграду “бесконечного” диаметра, на рис. 6 приведены данные работ [9, 10]. При смещении преград в направлении от сопла происходит скачкообразный переход высокочастотных автоколебаний к низкочастотным, а затем вновь к высокочастотным, что согласуется с результатами, приведенными на рис. 4. На рис. 6 на оси абсцисс указано расстояние от сопла до преград, отнесенное к расстоянию от сопла до центрального скачка уплотнения свободной недорасширенной струи $x^* = d_a M_a (kn)^{0,5}$ (k — показатель адиабаты) [11]. При взаимодействии струи со сплошной преградой низкочастотные пульсации давления возникают в диапазоне значений безразмерной продольной координаты от $x/x^* \approx 0,52$ до $x/x^* = 1$ (область, выделенная штриховыми линиями). При натекании струи на пористую преграду R2 при $x = 22,5$ мм ($x/d_a = 1,5$; $x/x^* = 0,737$) возникают низкочастотные пульсации, при натекании струи на пористую преграду R1 регистрируются только высокочастотные пульсации на относительном расстоянии до преграды $x/x^* \geq 1$.

На рис. 7 представлено распределение суммарного уровня звукового давления L_Σ (в децибелах) по безразмерной продольной координате x/d_a при степени нерасчетности истечения струи $n = 2,1$:

$$L_\Sigma = 20 \lg (\bar{P}'/P_{00}).$$

Точками 1–3 показаны уровни звукового давления, полученные в эксперименте с теми же преградами, но при степени нерасчетности истечения струи $n = 3,82$.

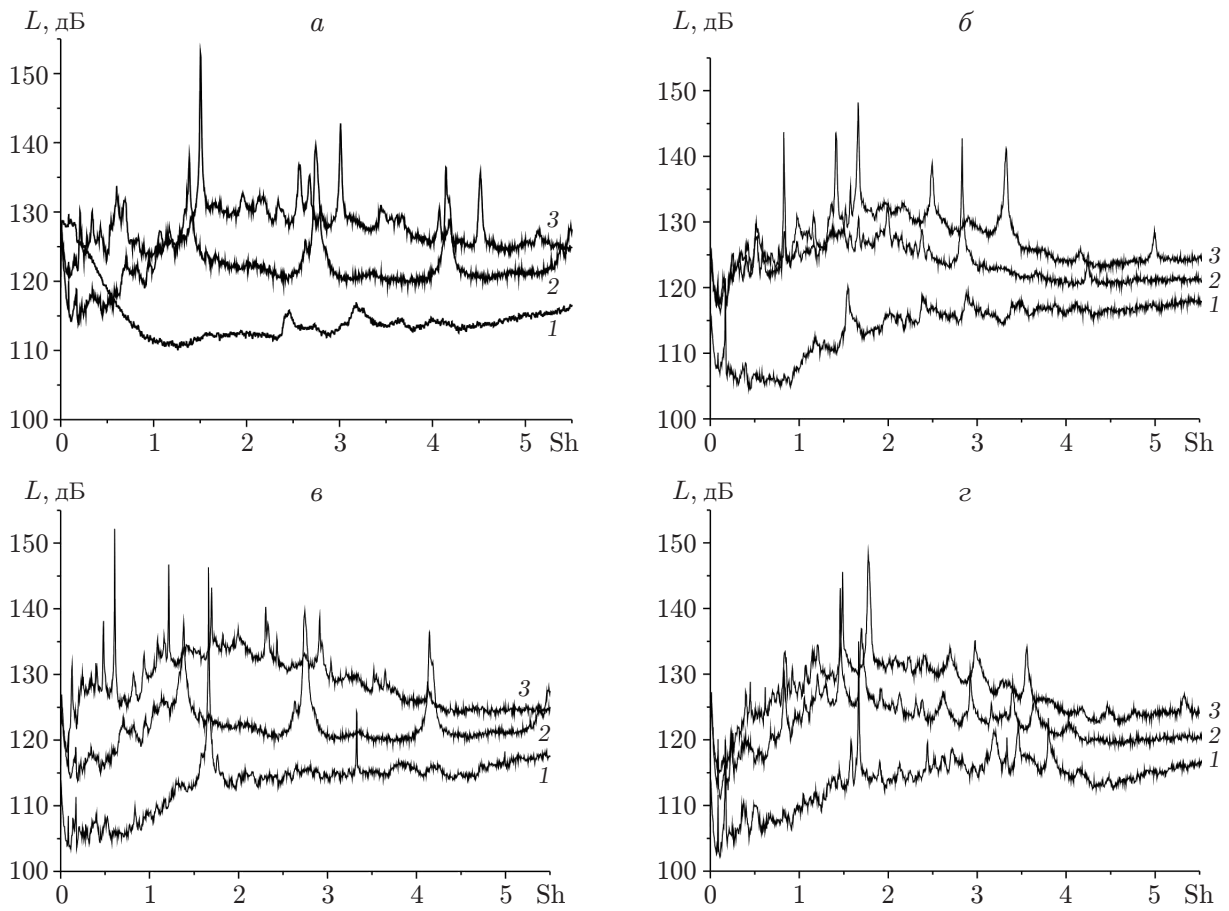


Рис. 5. Спектрограммы акустического поля сверхзвуковой недорасширенной струи, натекающей на различные преграды:
a — $x/d_a = 1,0$, *б* — $x/d_a = 1,5$, *в* — $x/d_a = 2,0$, *г* — $x/d_a = 2,5$; 1 — преграда R1, 2 — преграда R2, 3 — преграда R3

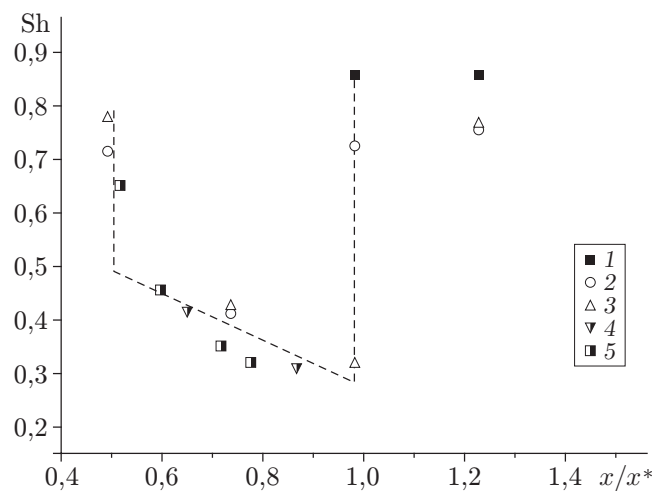


Рис. 6. Распределение числа Струхали Sh по безразмерной продольной координате:
 1 — проникаемая преграда R1; 2 — проникаемая преграда R2; 3 — непроницаемая преграда R3; 4 — данные [10]; 5 — данные [9]; штриховые линии — границы области низкочастотных автоколебаний

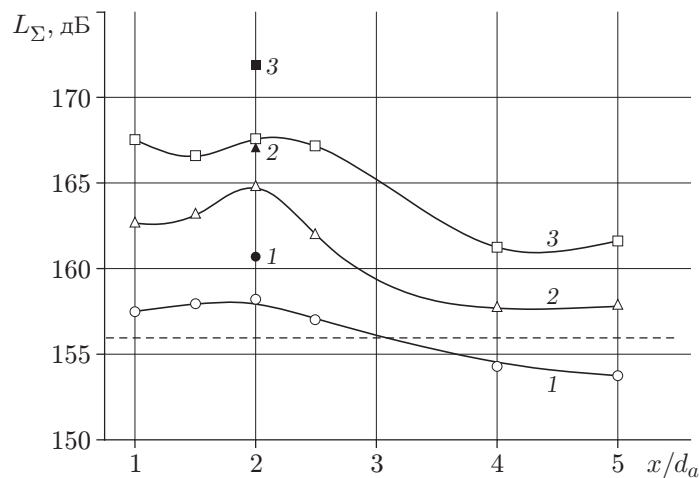


Рис. 7. Изменение суммарного уровня звукового давления акустического поля вблизи выходного сечения сопла при $n = 2,1$ (линии 1–3) и $n = 3,82$ (точки 1–3): 1 — преграда R1, 2 — преграда R2, 3 — преграда R3; штриховая линия — суммарный уровень звукового давления свободной струи

Кривая 3 характеризует изменение суммарного уровня звукового давления при натекании струи на непроницаемую преграду. Максимальное значение, равное $L_\Sigma = 167,5$ дБ, соответствует положению преграды в струе на расстоянии от среза сопла $x/d_a = 2$, при котором на частоте первого дискретного тона регистрируются интенсивные пульсации давления. При проницаемости пористого материала преграды R2 $\Pi_2 \approx 0,56$ суммарная величина пульсаций давления уменьшается, но максимальное значение также соответствует координате $x/d_a = 2$. Увеличение проницаемости пористого материала до значения $\Pi_1 \approx 0,92$ (преграда R1) приводит к более существенному уменьшению величины пульсаций давления. При $x/d_a \geq 3$ значение L_Σ становится меньше соответствующего значения в свободной струе (штриховая линия на рис. 7).

Из результатов экспериментальных исследований, приведенных в работе, следует, что, используя проницаемые преграды, изготовленные из материала с пористостью, близкой к единице, можно уменьшить интенсивность звукового поля, возникающего при взаимодействии сверхзвуковой недорасширенной струи с препятствием. При этом суммарное звуковое давление уменьшается в 3,6 раза по сравнению с соответствующими значениями в случае сплошной преграды и при удалении от сопла становится ниже звукового давления в свободной струе. Протяженность области низкочастотных пульсаций по продольной координате значительно уменьшается. Стационарная структура течения изменяется, что приводит к образованию веерной струи, внешняя граница которой направлена под определенным углом к поверхности преграды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дулов В. Г. Газодинамика процессов истечения / В. Г. Дулов, Г. А. Лукьянов. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1984.
2. Семилетенко Б. Г., Собколов Б. Н., Усков В. Н. Особенности неустойчивого взаимодействия сверхзвуковой струи с безграничной преградой // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. 1972. № 13, вып. 3. С. 39–41.
3. Набережнова Г. В., Нестеров Ю. Н. Неустойчивое взаимодействие расширяющейся сверхзвуковой струи с преградой. М., 1976. (Тр. Центр. аэрогидродинам. ин-та; Вып. 1765).

4. **Остапенко В. А., Солотчин А. В.** О критериях моделирования поля течения сверхзвуковой струи при наличии преграды // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. 1974. № 8, вып. 2. С. 66–74.
5. **Анцупов А. В., Благосклонов В. И.** О структуре сверхзвуковой струи, истекающей в затопленное пространство. М., 1976. (Тр. Центр. аэрогидродинам. ин-та; Вып. 1681).
6. **Белов С. В.** Пористые металлы в машиностроении. М.: Машиностроение, 1981.
7. **Lucas Y., Panfilov M., Bues M.** High velocity flow through fractured and porous media: the role of flow non-periodicity // Europ. J. Mech. B. Fluids. 2007. V. 26, iss. 2. P. 295–303.
8. **Холдер Д.** Теневые методы в аэродинамике / Д. Холдер, Р. Норт. М.: Мир, 1966.
9. **Солотчин А. В.** Экспериментальное исследование натекания сверхзвуковой недорасширенной струи на плоскую преграду: Дис. . . . канд. техн. наук. Новосибирск, 1982.
10. **Глазнев В. Н., Демин В. С.** Полуэмпирическая теория генерации дискретных тонов сверхзвуковой недорасширенной струей, натекающей на преграду. Новосибирск, 1976. (Препр. / Ин-т теорет. и прикл. механики СО АН СССР; № 1).
11. **Льюис С., Карлсон Д.** Положение центрального скачка уплотнения в недорасширенной газовой струе и в струе газа с твердыми частицами // Ракет. техника и космонавтика. 1964. Т. 2, № 4. С. 239–241.

*Поступила в редакцию 26/X 2010 г.,
в окончательном варианте — 6/XII 2010 г.*
