

УДК 533.6.011.5

ОСОБЕННОСТИ АВТОКОЛЕБАНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ОБТЕКАНИИ ОГРАНИЧЕННОЙ ПРЕГРАДЫ СВЕРХЗВУКОВОЙ НЕДОРАСШИРЕННОЙ СТРУЕЙ

Г. Ф. Горшков, В. Н. Усков

Балтийский государственный технический университет, 198005 Санкт-Петербург

Исследовано влияние размера преграды на структуру течения и особенности нестационарных режимов, возникающих при обтекании нормально расположенной ограниченной плоской преграды сверхзвуковыми недорасширенными струями.

Совместное влияние геометрических и газодинамических факторов на структуру течения и параметры автоколебаний при взаимодействии сверхзвуковых струй с нормально расположенной плоской безграничной или ограниченной преградой проявляется через обобщенный параметр подобия $x_* = 2M_a(\gamma n)^{0,5}$. При изменении значения отношения $h/x_* = H$, где h — расстояние от среза сопла до преграды (здесь и далее все линейные размеры отнесены к радиусу среза сопла r_a), в системе струя — преграда чередуются стационарные и нестационарные режимы обтекания. Принято считать, что геометрический фактор (радиус преграды r_p) оказывает значительное влияние на области существования автоколебаний. Однако последние интересные данные о возникновении так называемых «зон молчания» [1] (прекращение автоколебаний при определенных комбинациях размера преграды r_p и расстояния h для сверхзвуковых струй с нерасчетностью $n = 3; 5$ и числом Маха $M_a = 1,5; 2$) позволяют иначе объяснить существующий феномен струйного взаимодействия. В этой связи, развивая представления, заложенные [1], в настоящей работе исследуются особенности течения и влияние размера преграды на нестационарные режимы обтекания плоской ограниченной преграды в широком диапазоне изменения ее радиуса.

Экспериментальные исследования проводились в сверхзвуковой аэродинамической трубе с баллонной системой подачи воздуха (температура торможения $T_0 = 290$ К). Установка снабжена координатником, обеспечивающим перемещение преграды (цилиндра с плоским торцом) вдоль оси струи. Пройденное расстояние определялось электрическим отметчиком пути. Сверхзвуковые струи формировались установленным в ресивере коническим соплом Лавалья с геометрическим числом $M_a = 1,5$, углом полураствора 5° и радиусом выходного сечения $r_a = 5$ мм.

Измерение пульсаций давления $p(\tau)$ на преграде производилось пьезоэлектрическим датчиком давления ЛХ-611 (полоса частот датчика $10 \div 5 \cdot 10^4$ Гц). Мгновенная величина пульсаций с датчика, усиленная микрофонным усилителем 00 011 шумомера 01 021 фирмы RFT (полоса пропускания 200 кГц), записывалась на ленту магнитографа НО 67 (диапазон воспроизводимых частот 40 кГц). В ходе эксперимента определялся также интегральный уровень пульсаций давления (на выходе блока индикации 02 022) $\Delta L^0 = 20 \lg(\sigma/p_w) - L_n$, где σ — эффективное значение $p(\tau)$; $p_w = 2 \cdot 10^{-5}$ Па — звуковое давление порога слышимости; L_n — уровень широкополосных шумов. Частотный диапазон динамического тракта датчик — шумомер — магнитограф составляет не менее 40 кГц при неравномерности амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) для указанного диапазона частот ± 3 дБ.

Качественная картина обтекания преграды недорасширенной струей получена с помощью прибора Теплера ИАБ-451 с последующим ее фотографированием на пленку.

Методика проведения эксперимента состояла в следующем. При фиксированных параметрах газа на срезе сопла преграда плавно удалялась от него вдоль оси струи (запись сигнала с датчика осуществлялась непрерывно), радиус преграды варьировался. Во второй части эксперимента натекание струи на преграду происходило при фиксированном удалении h ($h = 5$ для нерасчетности $n = 3$ и $h = 7$ для $n = 5$; стационарная продувка). Радиус преграды также варьировался, запись сигнала с датчика осуществлялась в процессе продувки. Для анализа АЧХ автоколебаний использовался комплект аппаратуры и методика обработки данных, аналогичные описанным в [2]. Исследования проводились в следующих диапазонах параметров: $\gamma = 1,4$; $M_a = 1,5$; $n = 3; 5$; $r_p = 2,5; 2,8; 3,45; 3,8; 4,6; 5,28; 5,72; 6,27; 6,9; 7,45$; $h = 3 \div 16$.

Рассмотрим полученные результаты. Исследованиями подтверждены как существование известной ранее последовательности смены режимов обтекания [2–4] при непрерывном удалении преграды от среза сопла, так и возникновение «зон молчания» автоколебаний [1]. Выявлены особенности, ранее не описанные в литературе (в частности, в [3, 4]). Остановимся подробнее на их анализе.

Последовательная смена режимов представлена на рис. 1 кривыми изменения интегрального уровня пульсаций давления на преграде ΔL^0 в зависимости от расстояния h и H при $n = 5$ ($r_p = 5,28$ (рис. 1,а) и $r_p = 2,8$ (рис. 1,б)). Для ряда точек этих кривых, отмеченных стрелками, отдельными фрагментами приводятся: I — спектры колебаний давления (зависимость относительного уровня ΔL от частоты f); II — форма колебаний давления $p(\tau)$ (изменение давления во времени).

Точки 1, 2 (рис. 1,а) соответствуют первому автоколебательному режиму (АКР). В частотных спектрах, соответствующих этим точкам, появляются кратные дискретные составляющие, а колебания давления имеют ярко выраженную периодическую структуру. Точки 3–9 соответствуют течению с центральной циркуляционной зоной. В частотных спектрах для этих точек кратных дискретных составляющих не существует (за исключением высокочастотной области), а пульсации давления сильно модулированы. В частотных спектрах, соответствующих точкам 10–12, появляется единственная дискретная составляющая. Пульсации $p(\tau)$ также периодичны. Эти точки отвечают второму нестационарному режиму взаимодействия. В частотном спектре (точка 13) дискретные составляющие отсутствуют, а пульсации $p(\tau)$ носят случайный характер. Точка 13 соответствует области взаимодействия с невозмущенной первой бочкой. Расстояние H_5 (штриховые линии), отвечающее этому режиму, достаточно точно определяется зависимостью из [5].

В ходе эксперимента получены кривые изменения интегрального уровня пульсаций давления на преграде ΔL^0 как функции H при вариации радиуса преграды r_p для струи с $n = 3$ (рис. 2,а) и $n = 5$ (рис. 2,б); кривые 1–9 соответствуют следующим преградам: $r_p = 2,5; 2,8; 3,45; 3,8; 4,6; 5,28; 5,72; 6,27; 7,45$. Видно, что плавное увеличение h всегда приводит к внезапному разрушению стационарного течения: в системе струя — преграда возникают автоколебания, сопровождающиеся значительным увеличением интегрального уровня ΔL^0 . Возникновение же второго нестационарного режима (точки 10, 11 на рис. 1,а) происходит уже на высоком уровне ΔL^0 и осуществляется «вяло» по сравнению с первым режимом.

Кроме того, из анализа полученных данных следует, что для фиксированных параметров на срезе сопла γ , M_a , n существует такое расстояние h (сплошная вертикальная линия на рис. 2), когда автоколебания не возникают (первая «зона молчания» по [1]). Например, для $n = 3$ это расстояние $h = 5$ ($H = 0,81$) (кривые 2, 3 на рис. 2,а). Для кривой 2 положение преграды радиуса $r_p = 2,8$ соответствует началу возникновения авто-

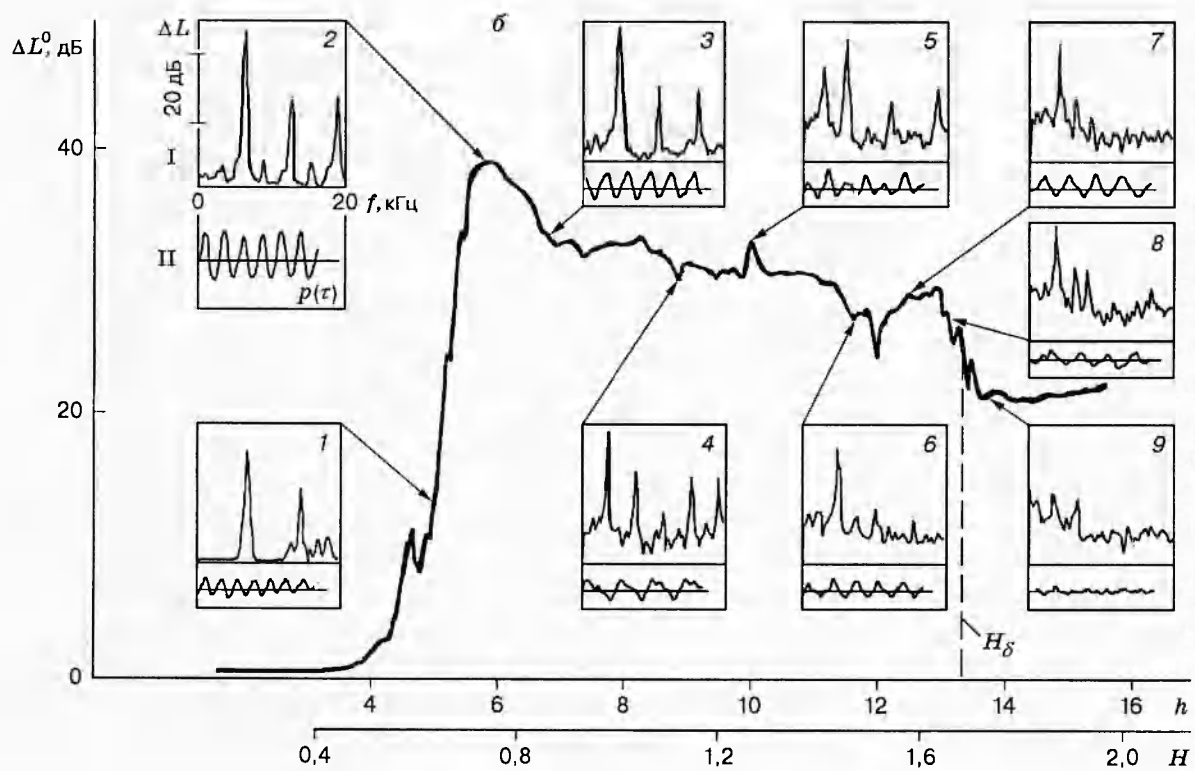
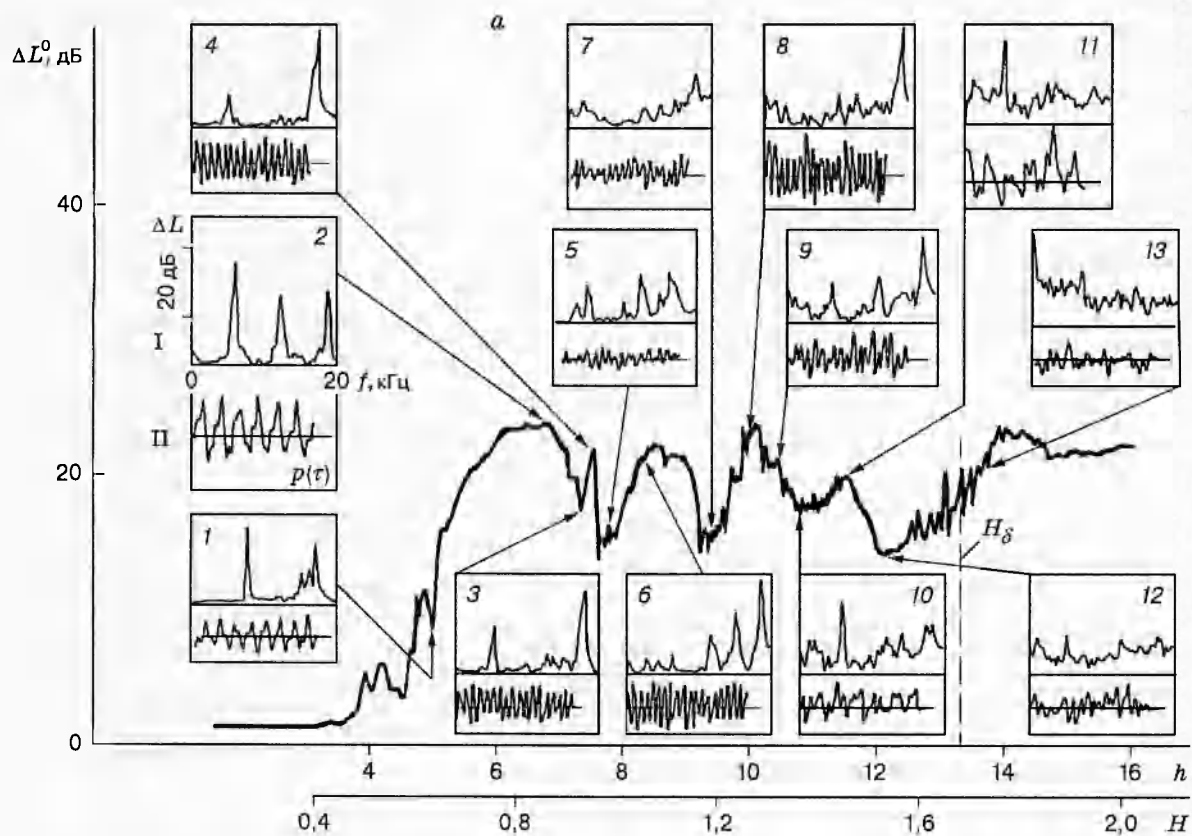


Рис. 1

колебаний, а для кривой 3 положение преграды радиуса $r_p = 3,45$ — прекращению АКР. Аналогично для $n = 5$, $h = 7$ ($H = 0,88$) (кривая 5 на рис. 2, б) при $r_p = 4,6$ положение преграды соответствует прекращению АКР. При этом комплекс $R_p = r_p/n^{0,5} = 1,6 \div 2,06$ соответствует данным [1].

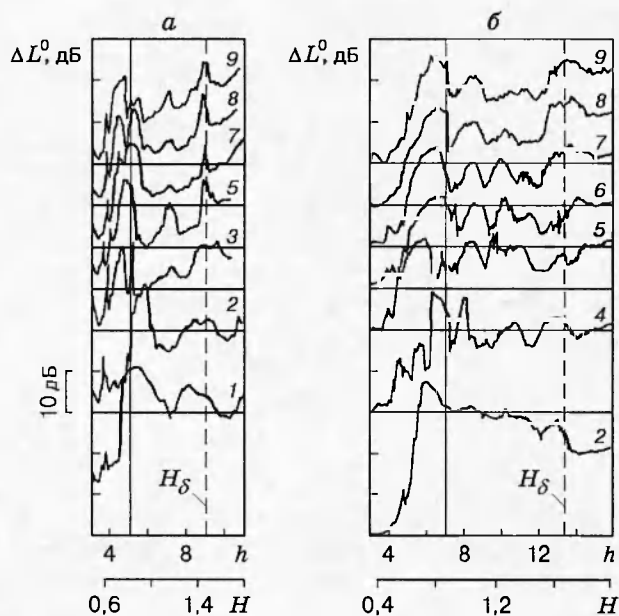


Рис. 2

Однако любой сдвиг преграды от указанных выше расстояний h (вправо или влево) для тех же размеров r_p вновь приводит к возникновению автоколебаний, т. е. при фиксированных значениях M_a , γ , n и r_p «зона молчания» характерна только для данного удаления h . Таким образом, размер преграды все же сдвигает автоколебания на границу области их существования.

Вторая «зона молчания» при $R_p = 3 \div 3,5$ не обнаружена. Об этом свидетельствуют как данные, представленные на рис. 2, так и анализ зависимости относительной спектральной мощности пульсаций давления P^0 в точке торможения на частоте основного тона как функции R_p , построенной обработкой экспериментальных спектров мощность — частота. Для указанного выше диапазона параметров зафиксирован

лишь локальный минимум в распределении P^0 .

С помощью зависимостей $\Delta L^0 = f(H)$ определены границы существования нестационарных режимов обтекания на плоскости $\{H_{in}, H_{ik}, R_p\}$, где H_{in} , H_{ik} — расстояния, соответствующие началу и концу возникновения нестационарных режимов (рис. 3). Отметим, что возникновение (затухание) нестационарных режимов фиксировалось по появлению (исчезновению) в спектре пульсаций давления дискретных составляющих (см. рис. 1). Оказалось, что при $R_p \geq 2$ размер преграды практически не влияет на их расположение, т. е. значение комплекса $R_p \approx 2$ является граничным.

Анализ амплитудно-частотных характеристик пульсаций давления в точке торможения преграды (рис. 3: а — $r_p = 3,45$, б — $r_p = 7,45$ для $n = 5$; сплошные кривые соответствуют интегральному уровню ΔL^0 ; темные точки — частотам основного тона f_r ; штриховые вертикальные линии разделяют начало и конец нестационарных режимов; штрихпунктирная соответствует радиальному течению с невозмущенной первой бочкой струи H_δ ; цифрами I и II обозначены первый и второй режимы), а также границ существования нестационарных режимов позволил установить два типоразмера преград:

— тип «малых преград» ($R_p < 2$), для которого существуют оба нестационарных режима (рис. 3, а), занимающие непрерывно всю область расстояний H до момента возникновения течения с невозмущенной первой бочкой (штрихпунктирная линия H_δ);

— тип «больших преград», при котором существуют также оба нестационарных режима, разделенные областью течения с центральной циркуляционной зоной (рис. 3, б).

Для типа «малых преград» переход от первого режима ко второму происходит скачком (на это указывают и данные [6] для разреженных струй, взаимодействующих с нормально расположенной плоской ограниченной преградой). В литературе существовало мнение [3, 4], что для плотных струй (в пределах расстояний $h \leq H_\delta$) имеется только один АКР.

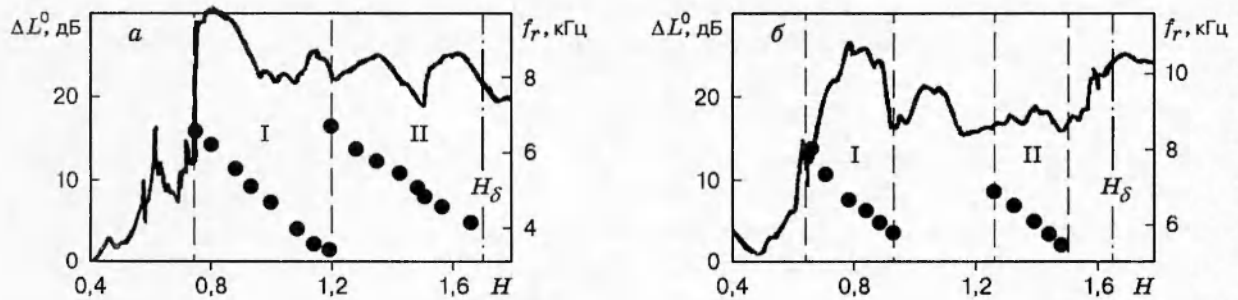


Рис. 3

К тому же в [4] под «малыми преградами» понимались преграды, для которых обобщенный параметр $M_a/r_p^2 > 0,1$ (область существования АКР в этом случае замкнута). Отсюда для $M_a = 1,5$ и $n = 3; 5$ комплекс $R_p < 15/n^{0,5} = 2,23 \div 1,73 \approx 1,98$ (средняя величина), что и имеет место в настоящем эксперименте. Также для «малых преград» области существования обоих режимов, построенные в обобщенных координатах $\{h/(r_p M_a^{0,5}); (n M_a^{0,5}/r_p^2)\}$, сливаются в единую область.

По-видимому, необнаружение второго режима, например в [3], на ранних этапах исследования АКР связано прежде всего с несовершенством используемых методов и приборов.

Для указанных типов преград первый режим автоколебаний характеризуется наличием в частотном спектре нескольких дискретных составляющих (наряду с основным тоном присутствуют обертоны до 40 дБ, превышающие общий уровень сплошного шума струи) (см. кривые I, соответствующие точкам 1, 2 на рис. 1,а и точкам 1–5 на рис. 1,б); мощным колебанием ударно-волновых структур и давления на преграде (соответствующие кривые под спектрами) с большой амплитудой и сравнительно низкой частотой. Колебания имеют ярко выраженную периодическую структуру.

Второй режим, значительно меньший по протяженности (в 2–5 раз по отношению к первому), характеризуется единственной дискретной составляющей (порядка 40 ÷ 30 дБ) частотного спектра (кривые I, соответствующие точкам 10, 11 на рис. 1,а и точкам 6–8 на рис. 1,б); умеренным колебанием ударно-волновых структур и давления на преграде (соответствующие кривые II).

В режимах нестационарного обтекания преграды увеличение расстояния приводит к монотонному уменьшению частоты основного тона, а при переходе от первого режима ко второму происходит ее некоторое увеличение (см. рис. 3). Однако лишь для «малых преград» это увеличение «восстанавливает» частоту f_r до значений, характерных для начала возникновения автоколебаний (рис. 3,а).

Анализ частот нестационарных процессов показал, что на участках возникновения и прекращения режима автоколебаний в частотных спектрах присутствует только одна дискретная составляющая (например, кривые, соответствующие точкам 1, 3 на рис. 1,а), уровень превышения которой над широкополосным фоном также значителен (15 ÷ 25 дБ). Наличие в частотном спектре нескольких (кратных) дискретных составляющих — следствие нелинейного характера пульсаций давления, вызванных ударно-волновыми процессами в области между центральным скачком уплотнения (ЦСУ) и преградой.

Параметры системы ЦСУ — преграда оказывают влияние на частоту пульсаций давления f_r . Увеличение отхода ЦСУ от преграды Δ с ростом расстояния H , а также с увеличением n и числа M_a [2–4] для обоих режимов сопровождается уменьшением частоты f_r . Учитывая сказанное и вводя комплекс $d_a n^{0,5}$, где $d_a = 2r_a$, в качестве поперечного

размера ударного слоя, частотные характеристики обоих режимов можно обобщить (с ошибкой не более 10 %) универсальной эмпирической зависимостью вида

$$\text{Sh}_r^{-1} = a_0 / (f_r d_a n^{0,5}) = A_i \Delta / (d_a n^{0,5}) + B_i,$$

где $A_1 = 4,1$; $B_1 = 0,6$ (первый режим); $A_2 = 1,8$; $B_2 = 0,4$ (второй); a_0 — скорость звука заторможенного потока; Δ — расстояние от преграды, около которого колеблется ЦСУ перед ней (среднее положение Δ взято из [4]).

Вторая часть исследований струйного обтекания преград проводилась при фиксированном расстоянии h ($h = 5$ для $n = 3$ и $h = 7$ для $n = 5$). Радиус преграды варьировался. Остановимся подробнее на этих результатах. Как отмечено выше, экспериментально подтверждено существование только первой «зоны молчания» ($R_p \simeq 2$).

Влияние радиуса преграды на частотные характеристики нестационарных режимов для «малых преград» проявляется в уменьшении числа Струхала ($\text{Sh}_r = 0,365 = \text{const}$) по сравнению с «большими преградами» ($\text{Sh}_r = 0,4 = \text{const}$). Значение безразмерного комплекса $R_p \simeq 2$ является также граничным.

Важную особенность струйного взаимодействия составляют явления, сопровождающие моменты «запуска» нестационарного режима и прекращения его. В данном исследовании это относится к обтеканию преграды на расстояниях h слева и справа от «зоны молчания». Так, для фиксированного значения обобщенного параметра H установлено, что, несмотря на наличие в осредненном спектре пульсаций давления дискретной составляющей (~ 15 дБ), мгновенные колебания газа носят релаксационный характер. Это проявляется следующим образом:

1) существенно изменяется во времени амплитуда колебаний давления (минимальное значение амплитуды близко к нулю, максимальное соответствует амплитуде развитых автоколебаний, т. е. амплитуда модулирована);

2) меняется частота колебаний (от сравнительно низкой до высокой, соответствующей частотному спектру шума струи);

3) ударно-волновая структура перед преградой, фиксируемая ИАБ-451 (время экспозиции фотоаппарата много больше периода колебаний), «неподвижна», а в окружающем пространстве между соплом и преградой возникают стоячие волны (чередующаяся последовательность светлых и темных полос, радиально расходящихся от преграды).

В заключение отметим ряд особенностей растекания газа по поверхности преграды и выскажем предположения о появлении «зоны молчания» для определенных размеров преград. Авторами [1] в рамках модельных представлений об автоколебаниях дано объяснение этого аномального явления. Однако простое совпадение (близость) численных значений r_p , при которых существуют эти зоны, с численными значениями координат r , при которых возникают разрывы в распределении акустического потенциала $\varphi(r)$, не является физической причиной прекращения автоколебаний.

На наш взгляд, это явление можно объяснить особенностями растекания газа по поверхности плоской преграды. Например, анализ характера движения газа вдоль нее, проведенный с помощью тепловых фотоаппаратов ударно-волновых структур, показал, что при одной и той же величине H ограниченная плоская преграда по-разному отклоняет поток после его разгона от точки торможения. При этом разворот газа на острой кромке преграды в зависимости от ее размера r_p может происходить с образованием:

- веерной струи, отклоненной вниз по потоку (тип «малых преград»);
- свободной сверхзвуковой радиальной струи, перпендикулярной оси основного течения (как правило, для типа «малых преград»);
- пристеночной радиальной сверхзвуковой струи (радиальное растекание газа преимущественно вдоль преграды — тип «больших преград»).

Кроме того, в пристеночном пограничном слое преграды существуют концентрические зоны (жгуты) периодического отрыва и присоединения потока — так называемые ячейковые вихри с интенсивным возвратным течением газа [7, 8], причем отрыв пограничного слоя происходит в области дозвукового или слабого сверхзвукового течения. Взаимодействие пристеночного и внешнего по отношению к нему потоков может привести к появлению указанной аномалии. Однако данная гипотеза нуждается в дальнейшей проверке.

Таким образом, обобщенный радиус преграды R_p и безразмерная величина расстояния H (параметр подобия h/x_*) являются значимыми управляющими факторами [9] процессов автоколебаний и должны быть учтены при построении физических и математических моделей АКР.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глазнев В. Н., Попов В. Ю. Влияние размера плоской преграды на автоколебания, возникающие при ее обтекании сверхзвуковой недорасширенной струей // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 1992. № 6. С. 164–168.
2. Горшков Г. Ф., Усков В. Н., Фаворский В. С. Особенности нестационарного обтекания безграничной преграды недорасширенной струей // ПМТФ. 1993. Т. 34, № 4. С. 58–65.
3. Набережнова Г. В., Нестеров Ю. Н. Неустойчивое взаимодействие расширяющейся сверхзвуковой струи с преградой // Тр. ЦАГИ. 1976. Вып. 1765.
4. Остапенко В. А., Солотчин А. В. Силовое воздействие сверхзвуковой недорасширенной струи на плоскую преграду // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. 1974. № 13, вып. 3. С. 26–32.
5. Семилетенко Б. Г., Усков В. Н. Экспериментальные зависимости, определяющие положение ударных волн в струе, натекающей на преграду, перпендикулярную ее оси // Инж.-физ. журн. 1972. Т. 23, № 3. С. 453–458.
6. Gorshkov G. F., Uskov V. N. On self-sustained oscillations in supersonic impact jets // Fundamental research in aerospace science: Book abstracts intern. conf., Sept. 22–24, 1994, Zhukovsky (Russia). TsAGI. 1994. Sect. 3. P. 65–67.
7. Белов И. А., Гинзбург И. П., Зазимко В. А. и др. Влияние турбулентности струи на теплообмен ее с преградой // Тепло- и массообмен: Материалы III Всесоюз. совещ. по тепло- и массообмену, Минск, 1968 г. Минск: Ин-т тепломассообмена АН БССР, 1969. Т. 11. С. 167–186.
8. Белов И. А., Гинзбург И. П., Горшков Г. Ф. и др. Вопросы теплообмена струи с преградой // Тепломассообмен: Материалы IV Всесоюз. совещ. по тепло- и массообмену, Минск, 1972 г. Минск: Ин-т тепломассообмена АН БССР, 1972. Т. 1, ч. 2. С. 271–281.
9. Горшков Г. Ф., Усков В. Н. Управление структурой течения и параметрами автоколебаний сверхзвуковых импактных струй // Струйные и нестационарные течения в газовой динамике: Тез. докл. XVI Всерос. семинара. Новосибирск: Ин-т теорет. и прикл. механики СО РАН, 1995. С. 21, 22.

Поступила в редакцию 9/IX 1997 г.,
в окончательном варианте — 26/I 1998 г.