

УДК 533.6.011.5

АВТОКОЛЕБАНИЯ В СВЕРХЗВУКОВЫХ ПЕРЕРАСШИРЕННЫХ ИМПАКТНЫХ СТРУЯХ

Г. Ф. Горшков, В. Н. Усков

Балтийский государственный технический университет "Военмех",
198005 Санкт-Петербург

Экспериментально и теоретически исследовано влияние геометрических и газодинамических параметров на структуру течения и параметры автоколебаний в сверхзвуковых перерасширенных струях, взаимодействующих с нормально расположенной плоской ограниченной преградой. Установлено, что на процесс взаимодействия существенное влияние оказывают геометрическое число Маха и полуугол раствора сопла. Сопоставление экспериментальных и расчетных данных позволило установить возможную причину возникновения автоколебаний в перерасширенных импактных струях.

В работах [1, 2] показано, что в перерасширенных импактных струях (в отличие от недорасширенных) автоколебания существуют только при больших числах Маха ($M_a = 4$ [2]). Следует отметить, что большинство известных результатов получено для струй, истекающих из конических сопел с полууглом раствора $\theta_a \leq 10^\circ$, когда угол наклона к оси вектора скорости потока, вытекающего из сопла, не оказывает существенного влияния на ударно-волновую структуру струи. Известно также, что увеличение полуугла раствора θ_a существенно влияет на характер течения и ударно-волновую структуру свободной струи [3, 4]. В связи с этим в настоящей работе исследуются особенности течения и влияние полуугла раствора θ_a на автоколебания, возникающие в перерасширенных импактных струях.

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 электроконтактным методом. Сверхзвуковые струи формировались установленным в ресивере коническим соплом Лавала с геометрическим числом $M_a = 3$, полууглом раствора $\theta_a = 15^\circ$ и радиусом выходного сечения $r_a = 9$ мм.

Измерение пульсаций давления $p(\tau)$ на преграде производилось пьезоэлектрическим датчиком давления ЛХ-611 (диапазон частот датчика $10 \div 5 \cdot 10^4$ Гц). Мгновенное значение пульсаций, усиленное микрофонным усилителем 00 011 шумомера 01 021 фирмы RFT (полоса пропускания 200 кГц), записывалось на ленту магнитографа НО-67 (диапазон воспроизводимых частот 40 кГц). В ходе эксперимента определялся также интегральный уровень пульсаций давления в точке торможения преграды (на выходе блока индикации 02 022) $\Delta L^0 = 20 \lg(\sigma/p_w) - L_n$ (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 отклонении амплитудно-частотной характеристики ± 3 дБ. Картина обтекания преграды перерасширенной струей, полученная с помощью прибора Теплера ИАБ-451, фотографировалась на пленку или фиксировалась с помощью цифровой камеры.

На первом этапе исследований при неизменных параметрах газа на срезе сопла преграда плавно удалялась от него вдоль оси струи (запись сигнала с датчика осуществлялась непрерывно). Определялись расстояния h , при которых имеют место автоколебания (здесь и далее все линейные размеры отнесены к радиусу среза сопла r_a), затем осуществлялись продувки при фиксированных значениях h с целью исследования характеристик автоколебательного процесса. Радиус преграды $r_{пр}$ варьировался.

Для анализа амплитудно-частотной характеристики автоколебаний использовались комплект аппаратуры и методика обработки данных, аналогичные описанным в [5]. Исследования проводились при следующих значениях определяющих параметров: диаметр сопла $d_a = 18$ мм; показатель адиабаты $\gamma = 1,4$; $M_a = 3$; нерасчетность $n = 0,38 \div 0,8$; $r_{пр} = 1,56; 1,92; 4,14$; $h = 2 \div 6$.

На рис. 1 показана ударно-волновая картина в импактной перерасширенной струе при различных значениях параметра h . Из анализа результатов визуализации следует, что постепенное увеличение h приводит к скачкообразному разрушению стационарного течения: в импактной системе перерасширенная струя — преграда возникают автоколебания, сопровождающиеся значительным увеличением интегрального уровня пульсаций ΔL^0 (рис. 2) (X_M — расстояние до диска Маха в свободной затопленной струе).

Анализ рис. 1, 2 показал, что возникновение автоколебаний (теплогограммы 2, 3, 6, 7 на рис. 1) возможно не только при $M_a = 4$ (см. [2]), но и при $M_a = 3$ и $\theta_a = 15^\circ$ (в [1, 2] в указанном выше диапазоне нерасчетностей n значения θ_a меньше). Так же как в недорасширенных импактных струях, автоколебания характеризуются существенным изменением ударно-волновой структуры и колебаниями давления на преграде с большой амплитудой и сравнительно низкой частотой (колебания имеют ярко выраженный периодический характер). В частотных спектрах пульсаций давления на преграде появляются дискретные составляющие, значительно превышающие общий уровень сплошного шума струи.

Участки изменения интегрального уровня $\Delta L^0 = \Delta L^0(h)$ (см. рис. 2, а), как и в случае недорасширенных струй, имеют четко выраженные границы, соответствующие возникновению и окончанию автоколебаний. Переход от нестационарного взаимодействия к течению с невозмущенной первой бочкой соответствует образованию перед преградой стационарной ударно-волновой структуры (теплогограммы 4, 8 на рис. 1) и резкому увеличению значения ΔL^0 (см. рис. 2, а).

На рис. 3 показаны границы областей существования автоколебаний в обобщенных координатах $h/(r_{пр} M_a^{0,5})$, $n M_a^{0,5}/r_{пр}^2$. Предельные расстояния h определялись по увеличению и уменьшению значений ΔL^0 , а также сопоставлением кривых $\Delta L^0(h)$ с ударно-волновой картиной обтекания преграды. Анализ данных, представленных на рис. 3, показал, что несмотря на некоторые различия протяженности зон нестационарного обтекания, определенной ранее для недорасширенных импактных струй, полученные результаты удовлетворительно согласуются с известными представлениями о механизме автоколебаний и хорошо коррелируют с результатами исследований [2] при $M_a = 4$.

Для выявления взаимосвязи между ударно-волновой картиной, возникающей в импактной струе, и различными режимами течения проведены теоретический расчет и параметрический анализ характеристик свободной перерасширенной струи. Течение в сопле и области изоэнтропического течения затопленной струи при $n \leq 1$ моделировалось течением от сверхзвукового сферического источника. Падающий на ось скачок уплотнения строится на основе дифференциальных условий динамической совместности на скачке [7], которые при известных параметрах течения от источника позволяют описать скачок обтекания

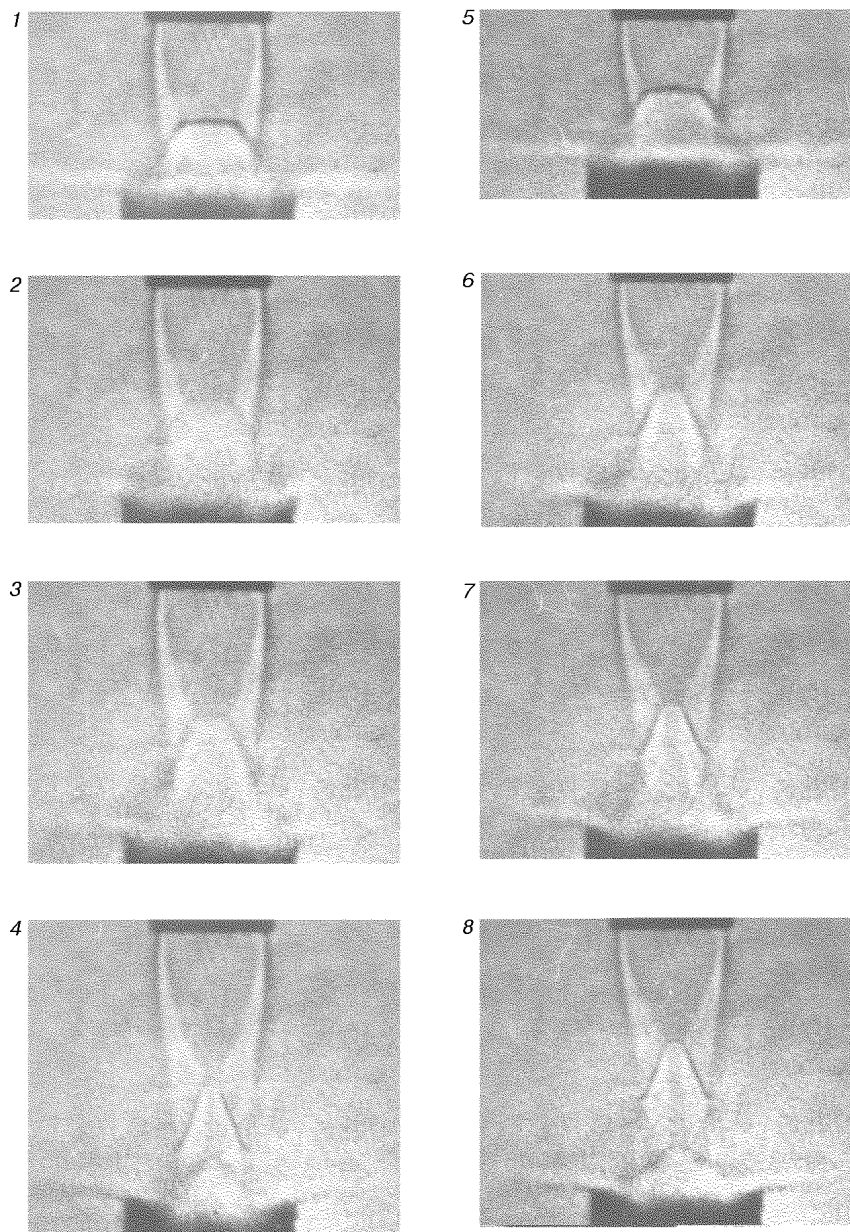


Рис. 1. Ударно-волновая картина обтекания преграды сверхзвуковой перерасширенной струей:

1-4 — $n = 0,6$ (1 — $h = 3$; 2 — $h = 3,75$; 3 — $h = 4,43$; 4 — $h = 4,87$); 5-8 — $n = 0,45$
(5 — $h = 2,5$; 6 — $h = 4,02$; 7 — $h = 4,25$; 8 — $h = 4,75$)

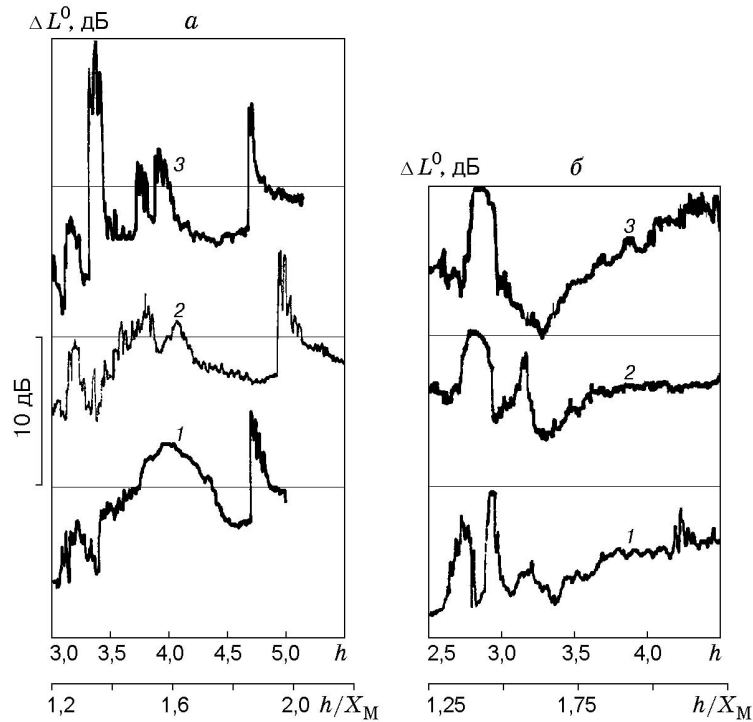


Рис. 2. Интегральный уровень пульсаций давления в центре ограниченной преграды:

1 — $r_{\text{пр}} = 1,56$; 2 — $r_{\text{пр}} = 1,92$; 3 — $r_{\text{пр}} = 4,14$; а — $n = 0,6$; б — $n = 0,45$

новенным дифференциальным уравнением. Используя данную методику, можно в каждой точке скачка по известному полю течения произвести расчет тройных конфигураций скачков уплотнения. Диск Маха в затопленной струе определяется как стационарная маховская конфигурация, в которой главный скачок является прямым [7].

Проведенный в [8, 9] параметрический анализ тройных конфигураций показал, что среди них существуют оптимальные тройные конфигурации, в которых отношения некоторых газодинамических переменных (полных давлений, скоростных напоров и т. п.) за отраженным и главным скачками достигают экстремальных значений. В работах [8, 9] аналитически определены интенсивности приходящих в точку ветвления скачков, которые вызывают появление оптимальных тройных конфигураций.

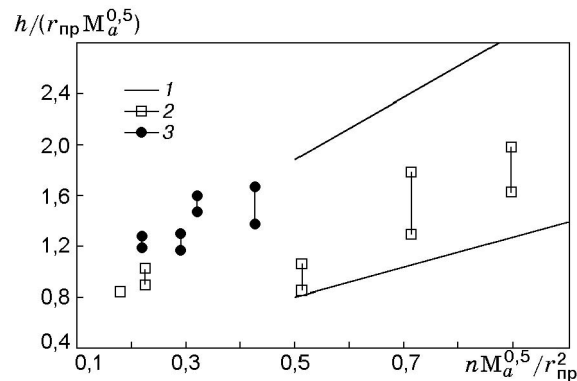


Рис. 3. Области существования автоколебаний:

1 — данные [6]; 2 — данные [2]; 3 — данные настоящей работы

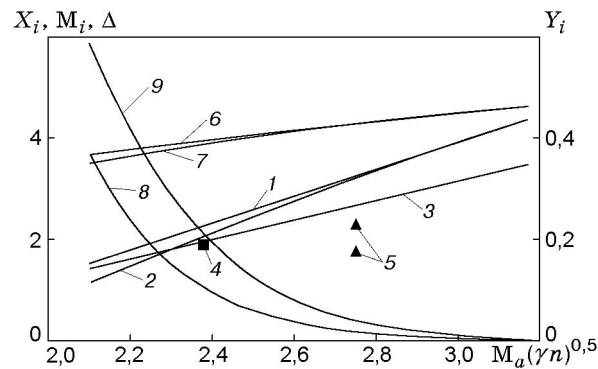


Рис. 4. Положения тройных конфигураций ударных волн в сверхзвуковой перерасширенной затопленной струе и соответствующие характерные числа Маха M_i :

1 — X_{stat} ; 2 — X_{opt} ; 3 — X_M ; 4, 5 — расстояние Δ (4 — $n = 0,45$; 5 — $n = 0,6$); 6 — M_{stat} ; 7 — M_{opt} ; 8 — Y_{stat} ; 9 — Y_{opt}

Использование методик построения падающего скачка, расчета тройных конфигураций и выделения оптимальных тройных конфигураций позволило провести анализ ударно-волновой структуры в импактной перерасширенной струе. Анализ показал, что в осесимметричной затопленной струе при $M_a > 2,5$ и $n \leq 0,8$ стационарная маховская конфигурация возникает ниже по течению относительно оптимальной тройной конфигурации.

Таким образом, при постоянных M_a , n , γ , θ_a и определенных значениях h отошедший от преграды центральный скачок уплотнения попадает в область оптимальной тройной конфигурации и обеспечивает периферийный максимум переменных в тройной точке. Такая ситуация способствует запираанию центральной зоны течения, что согласно [10] является основной причиной возникновения автоколебаний.

Сопоставление экспериментальных данных, при которых реализуются автоколебания, с результатами расчета оптимальных тройных конфигураций представлено на рис. 4. Расчеты показывают, что оптимальные тройные конфигурации всегда находятся перед стационарными маховскими конфигурациями. На рис. 4 приводится сравнение положения стационарной маховской конфигурации с положением диска Маха X_M , найденным экспериментально для свободной затопленной перерасширенной струи (кривая 3), в широком диапазоне значений параметра подобия $M_a(\gamma n)^{0,5}$, а также среднее расстояние Δ между центральным скачком уплотнения и преградой в режиме автоколебаний при перемещении ее от сопла (точки 4, 5).

Из анализа рис. 4 следует:

— различие кривых 1 и 3 может достигать 15–28 % при изменении нерасчетности в диапазоне $n = 0,45 \div 0,8$ и связано с принятой идеализацией течения в перерасширенной свободной струе (моделирование сферическим источником);

— числа Маха M_i перед стационарной маховской конфигурацией (кривая 6) и оптимальной тройной конфигурацией (кривая 7) достигают существенных значений: $M_{stat} = 3,63 \div 4,66$, $M_{opt} = 3,46 \div 4,67$;

— поперечный размер стационарной маховской конфигурации Y_{stat} (радиус диска Маха) для полуугла раствора $\theta_a = 15^\circ$ при $n = 0,65 \div 0,7$ пренебрежимо мал; область экстремальных параметров расположена в сжатом слое свободной струи (кривая 9 лежит существенно выше кривой 8);

— автоколебания возникают в том случае, когда отошедший от преграды центральный скачок уплотнения попадает в область, близкую к диску Маха свободной струи (точ-

ки 4, 5), в которой согласно рассматриваемой модели находятся области экстремальных параметров сжатого слоя (области оптимальных тройных конфигураций).

Таким образом, предложенная модель позволяет объяснить появление автоколебаний при $M_a < 4$. Установлено, что полуугол раствора сопла, а также диаметр преграды [11] и параметр h/X_M характеризуют процесс взаимодействия струи с преградой и должны учитываться при построении моделей возникновения и поддержания нестационарных режимов.

Авторы выражают благодарность М. В. Чернышову за выполненные расчеты тройных конфигураций.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Анцупов А. В., Благосклонов В. И., Пимштейн В. Г.** Взаимодействие перерасширенной струи газа с плоской преградой // Учен. зап. ЦАГИ. 1973. Т. 4, № 1. С. 84–87.
2. **Серов Ю. В., Соболев А. В.** Экспериментальные исследования взаимодействия сверхзвуковой перерасширенной струи с преградой // Газодинамика и акустика струйных течений. Новосибирск: Ин-т теорет. и прикл. механики СО АН СССР, 1979. С. 23–36.
3. **Филатов В. В.** Определение структуры перерасширенной газовой струи на начальном участке // Гидромеханика и теория упругости. 1971. Вып. 13. С. 3–11.
4. **Авдеевский В. С., Ашратов Э. А., Иванов А. В., Пирумов У. Г.** Сверхзвуковые неизобарические струи газа. М.: Машиностроение, 1985.
5. **Горшков Г. Ф., Усков В. Н., Фаворский В. С.** Особенности нестационарного обтекания безграничной преграды недорасширенной струей // ПМТФ. 1993. Т. 34, № 4. С. 58–65.
6. **Набережная Г. В., Нестеров Ю. Н.** Неустойчивое взаимодействие расширяющейся сверхзвуковой струи с преградой. М., 1976. (Тр. ЦАГИ; Вып. 1765).
7. **Адрианов А. Л., Старых А. Л., Усков В. Н.** Интерференция стационарных газодинамических разрывов. Новосибирск: Наука. Сиб. издат. фирма, 1995.
8. **Тао Ган, Усков В. Н.** Оптимальные трехскачковые конфигурации // Течения газа и плазмы в соплах, струях и следах: Тез. докл. XVIII Междунар. семинара, Санкт-Петербург, 21–23 июня 2000 г. СПб.: Балт. гос. техн. ун-т “Военмех”, 2000. С. 76.
9. **Тао Ган.** Тройные конфигурации скачков уплотнения в неравномерных сверхзвуковых потоках: Автореф. дис. . . канд. техн. наук. СПб., 2000.
10. **Семилетенко Б. Г., Собколов Б. Н., Усков В. Н.** Схема ударно-волновых процессов при неустойчивом взаимодействии струи с преградой // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. 1972. № 13, вып. 3. С. 39–41.
11. **Горшков Г. Ф., Усков В. Н.** Особенности автоколебаний, возникающих при обтекании ограниченной преграды сверхзвуковой недорасширенной струей // ПМТФ. 1999. Т. 40, № 4. С. 143–149.

Поступила в редакцию 14/1 2002 г.