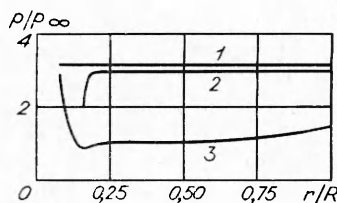


Р и с. 5



Р и с. 4

три. Основание этому — серия расчетов и результаты эксперимента, показавшие, что наиболее целесообразно иметь выдуваемую струю с несколькими распределенными по радиусу частицами-лидерами, как на рис. 3. Особенно это важно при обтекании заостренных тел. Ввиду двумерности задачи частицы представляли собой ободы с поперечным сечением в одну расчетную ячейку и располагались соответственно при $r = 0, R/4, R/2$.

Так же как при использовании стрелы, при выдуве струи газа с частицами (режим 6, рис. 4) характерная температура торможения потока на торце цилиндра уменьшалась по сравнению с режимом 5 в 1,5 раза. Данное обстоятельство важно при полете тел с большими сверхзвуковыми скоростями, когда возникает необходимость снизить тепловые потоки к стенкам летательного аппарата, а применение стрелы становится технически невозможным.

В заключение отметим, что идея исследования влияния выдува струи газа с твердыми частицами навстречу набегающему сверхзвуковому потоку для изменения аэродинамических характеристик обтекаемого тела была предложена сотрудником ИТПМ СО АН СССР С. С. Кацнельсоном в 1980 г. Экспериментальные работы по этой проблеме проводились под руководством сотрудника этого же института В. П. Фомичева, любезно предоставившего из своего архива теплерограмму обтекания головной части модели НВ-1, помещенную на рис. 3.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гриднев Н. П. Структура течения при вязком взаимодействии ударной волны с летящей частицей // ПМТФ.— 1987.— № 2.
2. Чжен П. Управление отрывом потока.— М.: Мир, 1979.
3. Гриднев Н. П. Разностная схема 3-го порядка точности для расчета сложных газодинамических и магнитогидродинамических течений // Вопросы магнитной газодинамики.— Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР, 1979.
4. Гриднев Н. П., Кацнельсон С. С., Фомичев В. П. Неоднородные МГД-течения с Т-слоем.— Новосибирск: Наука, 1984.
5. Краснов Н. Ф., Кошевой В. Н., Данилов А. Н., Захарченко В. Ф. Аэродинамика ракет.— М.: Высш. шк., 1968.

г. Новосибирск

Поступила 27/X 1989 г.

УДК 532.525.2 : 533.6.011.72

Г. Ф. Горшков, В. Н. Усков, А. П. Ушаков

АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ РЕЖИМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НЕДОРАСШПРЕННОЙ СТРУИ С ПРЕГРАДОЙ ПРИ НАЛИЧИИ СВЕРХЗВУКОВОГО СПУТНОГО ПОТОКА

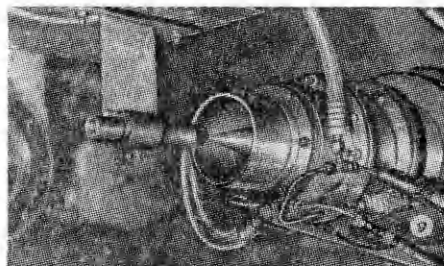
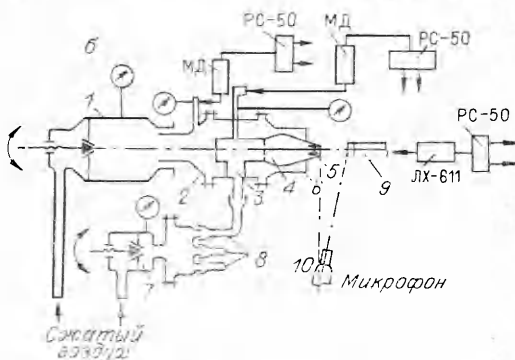
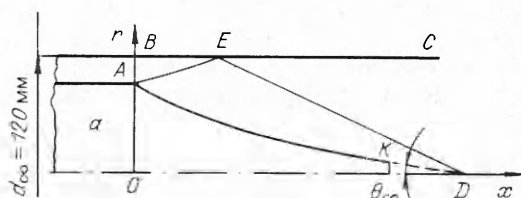
Нестационарные течения являются, пожалуй, одним из наиболее интересных феноменов газовой динамики. Их характерным примером может служить автоколебательный режим взаимодействия сверхзвуковой струи с плоской преградой. Вот почему интерес исследователей к его изучению не ослабевает с течением времени. Свидетельст-

во тому — публикации [1—6], рассматривающие стержневой, на наш взгляд, вопрос в автоколебаниях: о каналах прямой и обратной связи, через которые осуществляется поддержка колебаний. Одни авторы полагают, что механизм обратной связи определяется акустическими волнами, распространяющимися от преграды в окружающем пространстве и воздействующими на устье струи [3]. Другие утверждают, что эта связь носит ударно-волновой характер и реализуется в ударном слое перед преградой [1, 5, 6].

Не отрицая влияния внешней акустической связи на амплитудно-частотные характеристики автоколебательного режима взаимодействия струи с преградой, авторы настоящего исследования делают попытку показать, что не она играет главную роль в возникновении нестационарного течения в ударном слое.

1. Методика проведения эксперимента и обработки данных. Экспериментальное исследование проводилось на сверхзвуковой аэродинамической трубе с баллонной системой подачи воздуха и открытой рабочей частью. Общий вид установки, пневмоэлектрическая схема связей ее с трубой приведены на рис. 1. Спутный и струйный коаксиальные сверхзвуковые потоки формировались сопловым блоком 2, закрепленным на основной ресивер 1 аэродинамической трубы. Спутный поток создавался кольцевым соплом с образующими в виде цилиндрического насадка 6 и профиля наружной поверхности центрального тела-сопла 4, 5 (о его профилировании речь пойдет ниже), струйный — коническим соплом Лавалля 5. Подача рабочего тела (воздух с температурой торможения $T_0 = 290$ К) в периферийное сопло осуществлялась непосредственно из основного ресивера, в центральное сопло — из вспомогательного ресивера 7 по трем магистралям 8 через три пустотелые пилона 3. Плоская преграда 9 представляла собой цилиндр с плоским торцом диаметром $d_{\text{п}} = 28$ мм, закрепленный в державке на координатном столе (рис. 1, в), который с помощью электропривода имел возможность непрерывного перемещения в продольном направлении с линейной скоростью 1 мм/с. В центре преграды размещался пьезоэлектрический датчик давления ЛХ-611 с мембраной рабочей поверхности 6 мм.

Описанная конструкция установки предполагала создание практически равномерного расчетного спутного потока. Для профилирования центрального тела-сопла использовались результаты расчетов методом характеристик, опубликованные в [7], где рассмотрено истечение газа из кольцевого сопла (рис. 1, а) с равномерным звуковым потоком на входе (на линии AB), образованным прямой линией стенкой BC и линией тока AD . Здесь AB и AE — начальная и конечная характеристики расширяющегося потока, ED — характеристика, за которой достигается расчетная скорость потока. Профиль центрального тела построен для геометрического параметра $A = 0,76$ ($A = OA/OB < 1$). Однако реальный профиль AK отличается от теоретического, так как его образующая не достигает точки $r = 0$. Обрыв профиля



Р и с. 1

необходим для размещения выходного сечения сопла центральной струи. Результаты экспериментов по запуску периферийного сопла показали, что в плоскости среза центрального сопла давление $P_{0\infty}/P_n \approx 14$ при заданном (контролируемом) наружном давлении затопленного пространства P_n соответствует практически расчетному режиму истечения из кольцевого сопла (степень нерасчетности $n_\infty = P_{0\infty}/P_n = 1$, где $P_{0\infty}$ — статическое давление среза периферийного сопла, для $M_\infty = 2,365$). Внешний диаметр периферийного сопла (диаметр спутного потока) $d_\infty = 120$ мм. Сопло центральной струи коническое с параметрами: $M_a = 2$, $d_a = 10$ мм, $d_* = 7,68$ мм (d_a и d_* — диаметр выхода и критического сечения), толщина острой кромки среза $\sim 0,4$ мм, угол полураствора сопла $\phi_a = 5^\circ$.

Измерение величин полных давлений в периферийном $P_{0\infty}$ и центральном тракте P_0 , а также синхронизация работы всей регистрирующей аппаратуры проводились с помощью созданного на базе мини-ЭВМ «Искра 1256» измерительно-вычислительного комплекса (ИВК). Организация связей между аппаратными единицами комплекса построена по принципу общего интерфейса. В предложенной реализации ИВК использовался комбинированный режим обработки результатов. В процессе проведения эксперимента данные о P_0 и $P_{0\infty}$ по измерительной цепи: потенциометрический датчик МД-Т, ИВК запоминались в оперативной памяти ЭВМ, а информация о величине пульсаций давления на преграде (в окружающем пространстве) во времени $p(\tau)$ после прохождения измерительных цепей — пьезоэлектрический датчик ЛХ-611 (полдьюмовый конденсаторный микрофон МК-221 фирмы RFT, который удален на расстоянии 1 м от среза сопла и направлен к центру преграды — рис. 1, б, позиция 10), микрофонный усилитель 00 011 (RFT), шумомер 01 021 (RFT) — в аналоговом виде записывалась на ленту магнитографа НО 67 (диапазон воспроизводимых частот до 40 кГц) без обработки. Фоторегистрация эволюции ударно-волновой картины (УВК) потока осуществлялась автоматической фотокамерой РФК-5 (время экспозиции 1/50 с) посредством оптического прибора ИАБ-451. Для идентификации момента замера при записи информации на ленту магнитного регистратора на один из его входов подавался импульс управляющей ЭВМ. Одновременно он являлся командным для РФК-5. После проведения эксперимента данные о P_0 и $P_{0\infty}$ из оперативной памяти ЭВМ (после соответствующего пересчета с использованием результатов ранее проведенной тарировки) выводились на печать в виде протокола эксперимента. Информация о динамических параметрах процесса в дальнейшем с ленты магнитографа обрабатывалась на узкополосном анализаторе спектра СК 4—72/2 в диапазоне частот 0,05—20 кГц. Регистрация спектрограмм проводилась на двухкоординатном самописце Endim 622.01/1. Частотный диапазон динамического тракта датчик (микрофон) — магнитограф не хуже 20 кГц. Точность измерения давлений P_0 , $P_{0\infty}$, $p(\tau)$ 2—5 %.

В процессе эксперимента давления в центральной и периферийной камерах установки выдерживались постоянными и устанавливались с помощью регулировочных вентелей по образцовым манометрам класса точности 0,5 (работа происходила на «полках» давлений) в соответствии с циклограммой проведения опытов. Она предусматривала следующий порядок: выход на режим центральной струи, запуск периферийного сопла, движение преграды и регистрация параметров процесса. Отметим, что изучение взаимодействия струи с преградой происходило при непрерывном удалении ее от среза сопла вниз по потоку.

Исследование выполнено в диапазоне параметров: $M_a = 2$, $P_0/P_n = 51$, $M_\infty = 2,365$, $D_n = d_n/d_a = 2,8$, расстояние среза сопла до преграды $H = h/r_a = 4,4 - 12,7$ (r_a — радиус среза сопла струи), $X = h/x_x = 0,595 - 1,716$ ($x_x = 37$ мм — расстояние вдоль оси спутной свободной струи от среза сопла до точки регулярного отражения висячего скачка уплотнения от оси (рис. 2, б)).

2. Результаты и обсуждение. Вначале опишем структуру свободной струи, поскольку она играет важную роль в формировании условий течения в ударном слое перед преградой. На рис. 2 представлены шликрен-фотографии затопленной струи и струи, истекающей в спутный поток при постоянном давлении торможения в центральном тракте $P_0/P_H = 51$. Для затопленной струи нерасчетность $n_H = P_a/P_H = 6,52$ соответствует нерегулярному отражению висячего скачка уплотнения 2 (рис. 2, а) от оси симметрии с образованием маховского диска 3. Во втором случае рис. 2, б) для $P_{0\infty}/P_H = 14,75$ и статического давления в окрестности кромки сопла K (рис. 1, а) $P_{a\infty}/P_H = 1,07$ спутный поток встречается с потоком из конического сопла под углом 13° . В результате взаимодействия потоков в точке K возникают газодинамические разрывы, параметры которых могут быть рассчитаны в рамках локальной теории интерференции с использованием традиционных условий динамической совместности на разрывах [8]. Проведенный анализ показал, что при заданных исходных параметрах потоков возникают: в спутном потоке скачок уплотнения 5, в струе — волна разрежения ω , между ними — тангенциальный разрыв 1, который является границей раздела периферийного и центрального потоков. Интенсивности ударной волны $J_5 = P^0/P_{a\infty}$ и волны разрежения $J_\omega = P^0/P_a$ должны обеспечить равенство статических давлений P^0 за волнами по обе стороны тангенциального разрыва, т. е.

$$(2.1) \quad J_5 P_{a\infty} = P_a J_\omega.$$

Условие коллинеарности векторов скорости за скачком и волной разрежения в точке K связывает углы поворота потоков β_5 и β_ω :

$$(2.2) \quad \beta_5 - \beta_\omega = 13^\circ.$$

Известные зависимости $\beta_{\sigma, \omega}(J, M, \gamma)$ позволяют с помощью соотношений (2.1) и (2.2) рассчитать соответствующие им интенсивности J_5 и J_ω . Так, $J_5 = 3,5$, а $J_\omega = 0,574$. Найденные с их помощью значения углов наклона к оси симметрии фронта скачка ($\sigma_5 = 40,5^\circ$) и границы струи 1 ($\theta = 14,5^\circ$) хорошо совпадают с отвечающими углами на фотографиях. Нерасчетность центральной струи, определенная по статическому давлению за скачком 5 ($n = P_a/P^0 = J_\omega^{-1} = 1,74$), отвечает регулярному отражению висячего скачка уплотнения 2 от оси симметрии в случае истечения струи в затопленное пространство. Этот результат находится в соответствии с данными работы [9], в которой отмечается, что при $M_\infty > 2$ центральная струя имеет очень маленький маховский диск.

Следует отметить, что условия зарождения и формирования висячего скачка уплотнения связаны с неравномерностью течения в струе и параметрами на границе. В нашем случае спутный поток до кромки K неравномерен, а струя истекает из конического сопла на нерасчетном режиме. Данные факторы приводят к криволинейности фронта скачка 5 и границы струи 1, а также к непостоянству статического давления вдоль границы

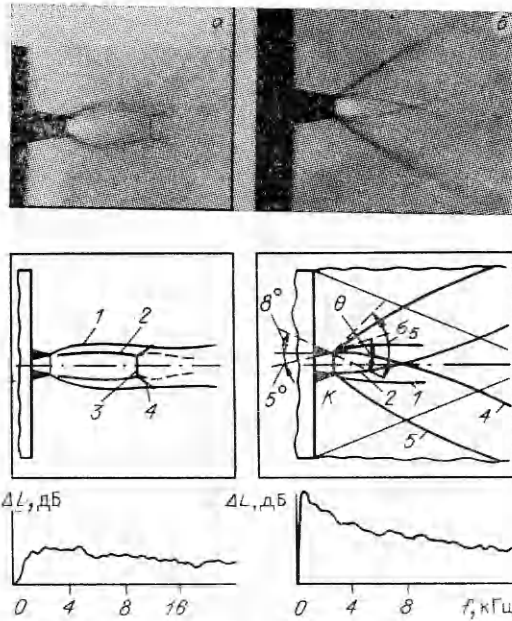


Рис. 2

раздела. На кромке сопла после взаимодействия потоков существенно изменяются числа Маха за скачком ($M_s^0 = 1,42$) и за волной разрежения ($M_w^0 = 2,35$). Интенсивность происходящего вдоль границы смещения потоков зависит от разницы их скоростей и, в свою очередь, определяет условия прохождения отраженного от оси симметрии скачка уплотнения 4 во внешний поток. Использование для анализа этого процесса решения задачи о взаимодействии скачка уплотнения с тангенциальным разрывом [8] показывает, что интенсивность отраженного разрыва будет невелика. Вероятно, с этим связана потеря периодичности спутной струи, отмечаемая в ряде работ (см., например, [9]).

Качественная картина взаимодействия струи с преградой ограниченных размеров без спутного потока достаточно подробно описана в [1—3]. Напомним, что при фиксированных значениях M_a и n удаление среза сопла от преграды сопровождается последовательной сменой режимов взаимодействия: 1) стационарный — радиальный режим растекания, 2) нестационарный — автоколебательный режим, 3) стационарный с невозмущенной первой бочкой. В случае натекания струи на безграничную преграду [4] после нестационарного режима, названного режимом сильной неустойчивости, возникают еще два: течение с центральной циркуляционной зоной и второй нестационарный режим слабой неустойчивости. При этом в режиме стационарного обтекания удаление среза сопла от преграды приводит к увеличению отхода центрального скачка уплотнения (ЦСУ) от преграды.

Наличие спутного потока сопровождается трансформацией качественной картины обтекания. Это можно проследить по шпирен-фотографиям, представленным на рис. 3 ($M_a = 2$, $P_0/P_H = 51$, $M_\infty = 2,365$, $P_{0\infty}/P_H = 14,75$, $n = 1,74$), где 1 — граница струи, 2 — висячий скачок уплотнения, 3 — ЦСУ, 4 — отраженный скачок уплотнения, 5 — присоединенная ударная волна, 6 — отошедшая ударная волна, 7 — результирующий ударный фронт, а позиции a — k соответствуют следующим комбинациям удалений среза сопла от преграды: $H = 5/X = 0,676$; $6,1/0,824$; $6,3/0,851$; $6,9/0,932$; $7,2/0,973$; $7,5/1,014$; $8,06/1,089$; $8,6/1,162$; $9,8/1,324$; $10,2/1,378$. Отметим, что УВК в центральной части струи качественно остается без изменений (аналогичной случаю отсутствия спутного потока). Так, в результате торможения потока на преграде перед ней возникает отошедший ЦСУ, отход которого Δ от преграды с ростом расстояния H при постоянстве M_a и n подчиняется закономерностям, установленным выше и описанным ранее в [1—4]. Однако веерная струя, сходящая с поверхности преграды, является препятствием для сверхзвукового спутного потока. В результате обтекания ее периферийным потоком в последнем формируется отошедшая ударная волна, а сама струя деформируется. Заметим, что волна 5, сходящая с кромки сопла, не претерпевает изменения (не меняется угол наклона ее к оси струи) при установке в поток преграды во всем исследованном диапазоне удалений H . Интерференция ударных волн 5 и 6 приводит к образованию единого газодинамического разрыва 7 на периферии спутного течения. Таким образом, взаимодействие центральной струи с преградой происходит в узкой возмущенной области, ограниченной ударными фронтами 5—7 и поверхностью преграды. Описанная выше УВК соответствовала стационарному режиму обтекания преграды (в дальнейшем — радиальный режим растекания, характеризующийся стационарной УВК и отсутствием колебаний давления на преграде).

При некотором положении преграды относительно среза сопла ($0,973 \leq X < 1,378$) радиальный режим растекания может нарушиться. Устанавливается автоколебательный тип взаимодействия (рис. 3, $\partial - u$), характеризующийся колебанием УВК и давления на преграде $p(\tau)$. Возникновение нестационарного режима, как и в случае отсутствия спутного потока [2, 4], наступает при достижении преграды точки x_x снизу — $X < 1$. Однако установление факта режима автоколебаний возможно толь-

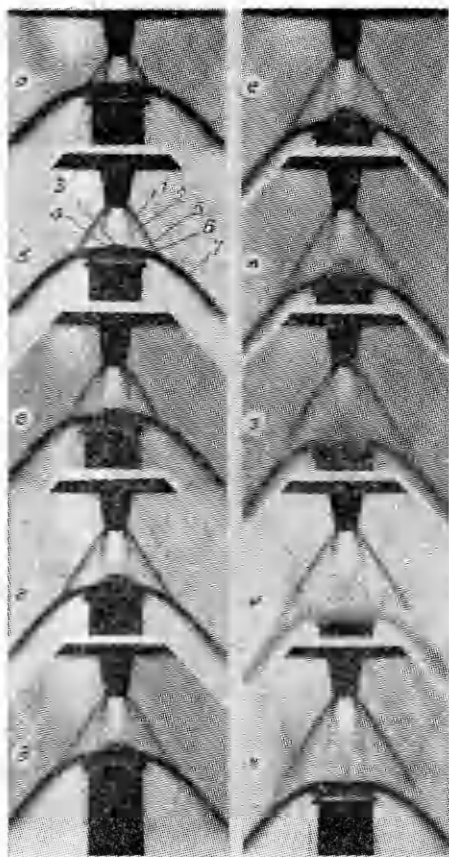


Рис. 3

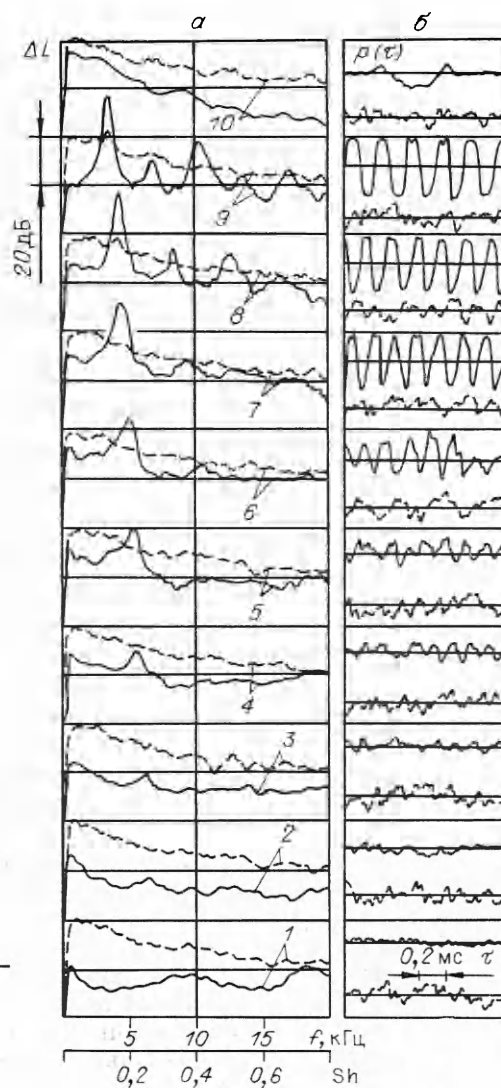


Рис. 4

ко после тщательного сопоставления шпирен-фотографий с результатами спектральных измерений пульсаций давления на преграде и в окружающем пространстве (рис. 4). Поскольку при фиксированных параметрах струи и спутного потока тип взаимодействия определяется только положением преграды относительно среза сопла, рассмотрим последовательную смену режимов обтекания при непрерывном удалении преграды вниз по потоку.

Амплитудно-частотные характеристики пульсаций давления в центре преграды (сплошные кривые), звукового давления в окружающем пространстве (штриховые) и соответствующая им форма колебаний давления (б) приводятся на рис. 4. Спектрограммы построены в координатах: относительный уровень ΔL пульсаций давления, дБ (ось ординат) — частота f , кГц (ось абсцисс). На рис. 4 позиции 1—10 отвечают позициям а — к рис. 3 (преграда удаляется от 1 к 10).

Сравнение теплеровских фотографий, спектрограмм и измерений пульсаций давления во времени показывает, что в режиме радиального растекания (см., например, рис. 3, б и рис. 4, а, б, кривые 2) в условиях сверхзвукового спутного потока УВК в струе перед преградой устойчива, а спектры пульсаций давления на преграде в точке торможения и звукового давления окружающего пространства аналогичны спектру сплошного шума сверхзвуковой спутной свободной струи (рис. 2, б). При этом

колебания давления на преграде и звукового давления в окружающем пространстве (рис. 4, б) носят случайный характер. Указанный тип взаимодействия сохраняется до расстояний $X < 0,973$ ($4,4 \leq H < 7,2$).

Дальнейшее увеличение H приводит к возмущению ЦСУ перед преградой (к его дрожанию — рис. 3, з, д). В спектрах пульсаций давления на преграде появляется дискретная составляющая (основная частота $f_r = 5,4$; $5,3$ — кривые 4, 5 на рис. 4, а), незначительно (на 5—7 дБ) превышающая уровень сплошного шума струи. Колебания давления в точке торможения еще не полностью детерминированы (рис. 4, б), однако в спектре пульсаций давления уже присутствует большая доля пульсаций низких частот. При этом в спектре пульсаций звукового давления дискретная составляющая отсутствует, а сами колебания носят случайный характер (кривые 4, 5).

Последующее удаление преграды сопровождается разрушением УВК. ЦСУ перед преградой на фотографиях размыт (рис. 3, е — и). Наступает режим развитых автоколебаний. Колебания ЦСУ, как показывает эксперимент, происходят с большой амплитудой и сравнительно низкой частотой. Дискретная составляющая спектра пульсаций давления на преграде растет с удалением H . Ее максимальное превышение над уровнем сплошного спектра шума составляет ~ 30 — 40 дБ. Колебания давления в точке торможения детерминированы и носят синусоидальный характер (кривые 6—9, рис. 4, б). С увеличением H от 7,2 до 9,8 основная частота f_r уменьшается от 5,3 до 3,4 кГц. В спектрах пульсаций звукового давления окружающего пространства по-прежнему дискретная составляющая отсутствует. Спектрограммы идентичны спектрограммам шума свободной спутной струи, а колебания звукового давления носят случайный характер, как и при отсутствии автоколебаний (кривые 1—3), т. е. в режиме автоколебаний возмущения от преграды не проникают через сверхзвуковой спутный поток в окружающее пространство, не достигают кромки сопла, а сносятся вниз по потоку. Отметим, что установленная закономерность является очень важной (можно сказать, ключевой) с точки зрения понимания механизма возникновения нестационарного обтекания преграды, что станет ясно при дальнейшем обсуждении этого вопроса. Следует указать, что в режиме развитых автоколебаний происходит также незначительное дрожание замыкающих ударных фронтов 6, 7 (рис. 3, з, и, на фотографиях они несколько размыты). Однако углы наклона их, а также ударной волны 5 к оси потока практически такие же, как и в случае режима радиального растекания (стационарного). Начиная с расстояния $X \geq 1,054$ ($H \geq 7,8$) на основной тон частоты колебаний давления большой амплитуды накладываются колебания меньшей амплитуды средних и высоких частот. В спектрах присутствуют, кроме основной (первой), еще несколько дискретных составляющих, значительно меньших по уровню, чем первая (см., например, рис. 4, кривая 9 для $H = 9,8$: $f_r = 3,4$, $f_2 = 6,7$, $f_3 = 10,1$ и т. д.). Указанный тип взаимодействия (автоколебательный) реализуется в диапазоне расстояний $0,973 \leq X < 1,378$ ($7,2 \leq H < 10,2$). Обработка исследованного нестационарного режима обтекания преграды в обобщенных координатах работ [1, 2] при отсутствии спутного потока показала, что если в качестве нерасчетности струи взять $n = 1,74$, то он попадает в область существования автоколебаний.

Дальнейшее увеличение расстояния H ($X \geq 1,365$) скачкообразно приводит к стационарному характеру взаимодействия струи с преградой. При этом УВК (рис. 3, к) устойчива и соответствует положению ударных волн в первой «бочке» свободной спутной струи (рис. 2, б), а перед преградой возникает дополнительный скачок уплотнения, непрерывным образом переходящий в ударный фронт 6. В спектрах пульсаций давления на преграде и в окружающем пространстве дискретные составляющие отсутствуют, а сами колебания давления носят случайный характер (рис. 4, кривые 10). Спектры давлений подобны спектру шума свободной спутной струи (рис. 2, б). Указанный тип взаимодействия реализуется в диапазоне

расстояний $1,378 \leq X \leq 1,716$ ($10,2 \leq H \leq 12,7$). Отметим, что при движении преграды к срезу сопла (H изменяется от 12,7 до 4,4) происходит та же смена режимов взаимодействия, но в противоположной последовательности: режим с невозмущенной первой «бочкой», автоколебания, режим радиального растекания. Однако в эксперименте по расстоянию H существует гистерезис — конец автоколебаний (начало при движении от сопла) зафиксирован при несколько меньшем значении H , указанном выше.

Параметры автоколебательной системы ЦСУ — преграда оказывают влияние на частоту пульсаций давления. Увеличение отхода ЦСУ от преграды с ростом расстояния H в пределах области автоколебаний сопровождается уменьшением частоты f_r . В этом же направлении действует увеличение степени n и M_a [1, 2, 4]. В литературе известно несколько подходов (хотя они и не очень отличаются друг от друга) [1, 2] при выборе универсальных параметров подобия, определяющих частотные характеристики процесса. Так, в [1] для безразмерной частоты предложено семейство универсальных кривых $Sh_a \sqrt{M_a} = f(H, D_n)$ ($Sh_a = f_r d_a / U_a$ — число Струхалия, подсчитанное по скорости газа па срезу сопла U_a). Однако каждому значению n в этом случае отвечает свой участок кривой. В [2] для нахождения f_r получена аппроксимационная зависимость $f_r d_a = f(\Delta, r_a)$, где Δ — расстояние, около которого колеблется ЦСУ перед преградой (среднее положение отхода ЦСУ, которое, по данным [1, 2], может быть определено так, как если бы колебаний не было). Эту аппроксимацию можно трансформировать, если ввести в рассмотрение скорость звука заторможенного потока a_0 . Тогда соотношение $Sh_0 = f_r d_a / a_0 = f(\Delta / d_a)$, учитывающее влияние размера преграды и прочих факторов (через отход Δ), более универсально, чем, например, предложенное в [1]. Однако и в этом случае оно неадекватно учитывает геометрию области (особенно ее поперечные размеры), колеблющейся под ЦСУ. Можно ожидать, что поскольку поперечные размеры струи пропорциональны \sqrt{n} , то введение в качестве диаметра этой области комплекса $d_a \sqrt{n}$ (идея его рассмотрения принадлежит В. С. Фаворскому) позволит не только уменьшить разброс опытных точек около некоторой средней кривой, но и получить универсальную зависимость, отвечающую принятой физической модели явления.

Подобный анализ частотных характеристик нестационарного режима обтекания ограниченной преграды позволил обобщить имеющиеся результаты (с точностью до 10 %) прямой вида (рис. 5)

$$(2.3) \quad Sh_r^{-1} = \frac{a_0}{f_r d_a \sqrt{n}} = 3,6 \frac{\Delta}{d_a \sqrt{n}} + 1,3,$$

которая представляет собой линейную функцию длины волны колебаний $\lambda = a_0 / f_r = a_0 t$ (t — период) от геометрических размеров Δ и $d_a \sqrt{n}$: $a_0 t = 3,6 \Delta + 1,3 d_a \sqrt{n}$.

На рис. 5 использованы как данные настоящей работы без и при наличии спутного потока, так и результаты ряда авторов [1, 2, 4] в отсутствие спутного потока. Позиции 1—15 соответствуют следующим комбинациям параметров: 1—5 ($M_a = 2$; $n_n = 2,67-6,52$; $D_n = 2,8$; $d_a = 10$ мм — без спутного потока), 6 (2; 4,06; 2,15; 20 — [4]), 7 (2; 3; 4;

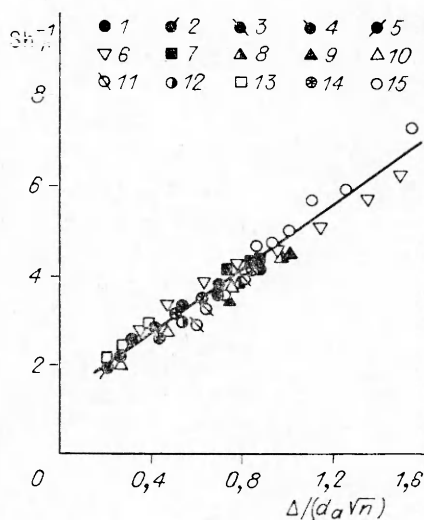


Рис. 5

30 — [1]), 8—10 (1,5; 3—16,5; 2,5; 20 — [2]), 11, 12 (1; 4—13,5; 2,5; 20 — [2]), 13, 14 (1,5; 2,2—5,2; 1,5; 40 — [2]), 15 (2; 1,74; 2,8; 10 — спутный поток), линия — расчет по (2.3). Величина отхода Δ бралась либо по результатам непосредственных экспериментов, либо определялась по соотношениям [2, 4].

Описанные результаты экспериментального исследования свидетельствуют о возникновении автоколебательного режима взаимодействия струи с преградой в условиях, при которых не может существовать обратная связь с помощью акустических волн, распространяющихся по окружающему пространству к кромке сопла. Причины появления нестационарного режима и механизм его поддержания связаны с процессами, происходящими в ударном слое перед преградой. Прежде всего с ударно-волновыми структурами, которые образуются в результате интерференции газодинамических разрывов, возникающих перед преградой при торможении и растекании струи, с разрывами в струе и в спутном потоке. В частности, тройная конфигурация ударных волн, являющаяся результатом взаимодействия ЦСУ с висязим скачком уплотнения, приводит к существенно неравномерному распределению энтропии в центральной и периферийной областях ударного слоя. Расчеты показывают, что эта неравномерность усиливается по мере удаления тройной конфигурации ударных волн от выходного сечения сопла. Вместе с тем растут расход газа в высокоскоростном периферийном потоке и угол наклона к преграде тангенциального разрыва, исходящего из тройной точки. Такая ситуация способствует запираению газа, прошедшего через ЦСУ. Этот эффект усиливается спутным потоком, изменяющим условие растекания струи по преграде. Таким образом, запираение центрального потока низкоэнтропийным периферийным приводит к распространению возмущений от преграды к ЦСУ через центральный поток (канал обратной связи) и от скачков уплотнения к преграде (канал прямой связи) [6]. Схема ударно-волновых процессов, описанная в [5] и качественно подтвержденная численными расчетами [6], может реализовываться и при наличии спутного сверхзвукового потока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Набережнова Г. В., Неестеров Ю. Н. Неустойчивое взаимодействие распрямляющейся сверхзвуковой струи с преградой // Тр. ЦАГИ.— 1976.— Вып. 1765.
2. Солотчин А. В. О неустойчивости сверхзвуковой недорасширенной струи, натекающей на преграду // Газодинамика и акустика струйных течений.— Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР, 1979.
3. Глазнев В. Н. К полуэмпирической теории генерации дискретных тонов сверхзвуковой недорасширенной струей, натекающей на преграду // Изв. АН СССР. МЖГ.— 1981.— № 6.
4. Соколов Е. И., Усков В. Н. Взаимодействие осесимметричной струи с преградой и встречным сверхзвуковым потоком // Струйные и отрывные течения.— М.: МГУ, 1985.— Ч. 3.
5. 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.
6. Усков В. Н., Цымбалов В. В., Цымбалова Е. Н. Численное решение задач о нестационарном взаимодействии сверхзвуковой струи с преградой // Моделирование в механике.— Новосибирск: ВЦ, ИТПМ СО АН СССР, 1987.— Т. 1 (18), № 6.
7. Кацкова О. Н. Расчет кольцевых сверхзвуковых сопел и диффузоров // Вычислительная математика.— М.: АН СССР, 1958.— № 3.
8. Усков В. Н. Интерференция стационарных газодинамических разрывов // Сверхзвуковые газовые струи.— Новосибирск: Наука, 1983.
9. Сверхзвуковые неизобарические струи газа/В. С. Авдеевский, Э. А. Ашратов, А. В. Иванов, У. Г. Пирумов.— М.: Машиностроение, 1985.

г. Ленинград

Поступила 5/1 1990 г.