

**О ВЛИЯНИИ СПУТНОГО ПОТОКА НА ТЕЧЕНИЕ
В КОЛЬЦЕВОЙ СТРУЕ****А. И. Швец***(Москва)*

Исследовано течение кольцевой струи в канале. Определено влияние числа Маха спутного потока на структуру струи. Показано, что при околосвуковой скорости спутного потока реализуется перестройка режима течения от открытой к закрытой донной области, сопровождающаяся снижением уровня пульсаций давления.

Исследования струи, истекающей в спутный поток в канале, представляют собой самостоятельную задачу. Испытания струи проведены в аэродинамической трубе с размером рабочей части 600×600 мм. Струя эжектирует поток в канале, и в зависимости от ее параметров и относительных размеров струи и канала скорость спутного потока может достигать значительной величины.

Течение струи в канале отличается от течения в затопленном пространстве; эти отличия особенно существенны при околосвуковой скорости спутного потока. Отметим, что опыты со струей в свободном спутном потоке ограниченных размеров [1] также показали определенное влияние границ потока на структуру струи. В то же время исследования струи в спутном дозвуковом потоке в канале позволяют получить некоторые характеристики течения, присущие также и струе в свободном спутном потоке.

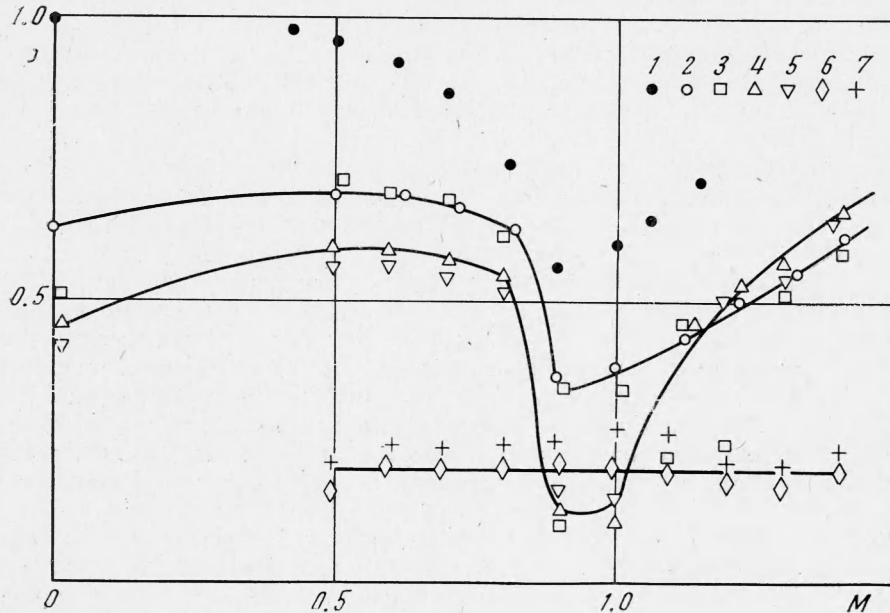
Исследования выполнялись на модели, состоящей из цилиндра (диаметром 110 мм, длиной 300 мм) и конической передней части с углом полураствора 21° . Модель крепилась на боковой пластине длиной 255 мм, толщиной 20 мм, передняя и задняя части которой имели клиновидные скосы. Пластина располагалась на удалении 1.5 калибра от донного среза. Подобный метод крепления ведет к появлению возмущений в потоке. Однако эти возмущения не оказывают существенного влияния на течение в донной области [2,3].

В донной части модели устанавливались сменные кольцевые сопла, диаметр внутренней кромки 87.6 мм, наружной — 110 мм, отношение площади кольца к полной площади сопла 36.5%. Плоский торец кольцевого сопла дренирован по радиусу. Измерение давления в кольцевой струе производилось с помощью насадков полного и статического давления с наружным диаметром 1.2 мм, которые установлены на автоматическом координатнике.

Испытания проводились при числах Рейнольдса $Re = 1.3 \div 3 \cdot 10^6$, рассчитанных по параметрам набегающего потока и отнесенных к диаметру модели. Относительная среднеквадратичная погрешность определения относительного донного давления $P = P_b / P_\infty$ (P_b — давление, измеренное на торце сопла, P_∞ — статическое давление в невозмущенном потоке) составляла $\zeta_P = 0.07, 0.04, 0.02$ для чисел Маха 0.5, 0.7, 1.2 соответственно.

При течении кольцевой струи в затопленном пространстве реализуются два режима: с открытой и закрытой донными областями. Первый

режим характеризуется снижением донного давления, второй — повышением. В режиме открытой донной области кольцевая струя сохраняет сверхзвуковую структуру на протяжении нескольких (3 ÷ 4) ячеек. Закрытие донной области — критический режим — происходит при взаимодействии сверхзвуковых участков струй. Струя перестраивается так, что донная область окружена только первой ячейкой струи. В зависимости от расчетного числа Маха и формы сопла критический режим может наступать как для перерасширенной, так и для недорасширенной струи.



Фиг. 1

При истечении в затопленное пространство критический режим для сопел с расчетными числами Маха $M_j = 1.35, 2, 2.5, 3.1, 3.6$ реализуется при степени нерасчетности $n = 3, 1.8, 3.5, 1, 0.9$ соответственно (у сопла с $M_j = 2.5$ диаметр внутренней части равен 101.8 мм).

При течении струи в трубе по мере роста скорости набегающего потока статическое давление в рабочей части снижается. Поэтому с целью сохранения постоянного значения нерасчетности для каждого числа M определялось соответствующее давление в ресивере струйной модели. Распределение давления по радиусу центральной части кольцевого сопла сохранялось примерно постоянным.

Зависимость относительного донного давления P , измеренного в центральной точке торца сопла, от числа Маха спутного потока для сопла с $M_j = 3.6$ представлена на фиг. 1 ($n = P_a / P_\infty$, n — степень нерасчетности, P_a — статическое давление на выходной кромке сопла, $n = 0, 0.4, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0$ — обозначения 1—7 соответственно).

Можно выделить три вида течения. Первый вид соответствует малым степеням нерасчетности ($n < 0.5$). Увеличение числа M до 0.9 сопровождается снижением давления, а дальнейший прирост скорости вызывает повышение давления. Давление на центральной части сопла изменяется аналогично донному давлению ($n = 0$), причем увеличение степени нерасчетности приводит к уменьшению давления. Для этого типа течения перестройки не наблюдается.

Второй вид соответствует истечению перерасширенной струи с восстановлением давления в системе маховских или регулярных волн ($n = 0.6-0.8$). Увеличение скорости спутного потока от $M = 0.8$ до 0.9 реализует перестройку течения от открытой донной области к закрытой, которая сопровождается резким снижением донного давления. Закрытая донная область сохраняется до $M = 1.1$, а при последующем росте скорости наблюдается вторичная перестройка струи от закрытой донной области к открытой с увеличением донного давления. В режиме закрытой донной области для всех нерасчетностей значения P примерно одинаковы.

Третий вид течения, близкий к расчетному ($n = 0.9-1.0$), характеризуется малым изменением донного давления в исследованном диапазоне чисел Маха. Это объясняется тем, что при $n \geq 0.9$ донная область закрыта и величина донного давления определяется параметрами истекающей струи.

Перестройку течения, происходящую в районе дозвуковых и трансзвуковых скоростей, рассмотрим по фотографиям обтекания кольцевой струи с $M_j = 3.6$ при нерасчетности, близкой к критической ($n = 0.8$). Увеличение скорости спутного потока от $M = 0.5$ до $M = 0.8$ не вызывает существенных изменений в структуре: длина первой ячейки, диаметры открытой зоны в районе первой и второй ячеек остаются практически постоянными. Переход от $M = 0.8$ к $M = 0.9$ влечет за собой перестройку струи — донная область закрывается; по отношению к внешнему потоку струя перерасширена, к внутреннему — недорасширена. Скачок уплотнения, отходящий от наружной кромки сопла, проходит по расширенной первой ячейке, регулярно пересекается сначала с внутренним висячим скачком, а потом с внешним скачком от противоположной кромки.

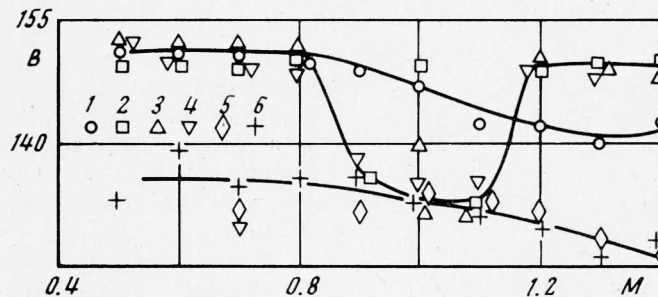
Рост числа M от 1.1 до 1.2 связан с повторной перестройкой струи — донная область открывается, уменьшается первая ячейка и появляется вторая. Структура струи напоминает течение при $M = 0.5$ с тем отличием, что первая ячейка немного укорачивается и наружные границы струи сжимаются.

Наряду с изучением структуры течения проводились исследования пульсаций давления на торце кольцевого сопла. Исследования пульсаций, относящихся к нестационарному течению в донной области, были описаны в [4, 5], а пульсаций на торце кольцевого сопла при истечении в затопленное пространство — в [6, 7].

В процессе экспериментов измерялись пульсации давления в центре торцевой части сопла и на расстоянии 0.5 диаметра в плоскости среза сопла с помощью индуктивного датчика, установленного на пилоне. Калибровка регистрационного тракта проведена с помощью пульсатора резонансного типа, а также с помощью микрофона, усилителя и регистратора фирмы «Брюль и Кьер».

При оценке погрешности проведенных измерений учитывались только систематические ошибки второго типа. Оценка среднеквадратичной ошибки (систематические ошибки полагались распределенными по нормальному закону) при определении среднеквадратичного значения уровней спектра анализируемого процесса следующая: погрешность датчика давления из-за нелинейности $\pm 1\%$, станции $\pm 3.6\%$, усилителя $\pm 8\%$, магнитофона $\pm 1.5\%$, анализатора $\pm 10\%$, самописца $\pm 11\%$. Относительная среднеквадратичная ошибка измерений амплитуд всего регистрационно-измерительного тракта при надежности 70% равна ± 15.4 . Погрешность в определении частот складывается из погрешностей станции ($\pm 3\%$), анализатора ($\pm 1\%$), самописца ($\pm 2\%$) и равна $\pm 3.7\%$ (погрешность датчика и магнитофона пренебрежимо мала).

Как показано в [6], при истечении в затопленное пространство пульсации давления на торце кольцевого сопла зависят от режимов течения в струе. Характерной особенностью кольцевых струй является резкое снижение уровня пульсаций на торце сопла при перестройке течения от открытой донной области к закрытой. В режиме перерасширенной струи увеличение нерасчетности и рост числа Маха приводят к монотонному снижению частоты дискретной составляющей в спектре пульсаций давления. Обнаружено исчезновение дискретной составляющей в критическом режиме. В этом режиме до слияния струй образуется одна резко расширившаяся кольцевая ячейка, затем возникает маховское или регулярное



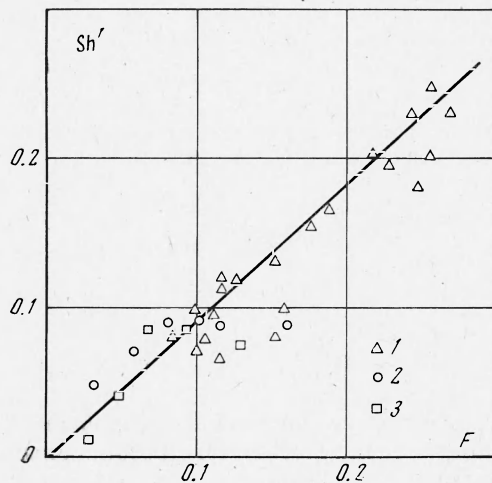
Фиг. 2

взаимодействие волн, вся струя не имеет определенной периодической структуры и не колеблется как единое целое, вследствие чего резонансный процесс не осуществляется.

В случае течения в спутном потоке в канале вследствие отражения звуковых волн стенки трубы сильно влияют на устойчивость струи. Поэтому результаты исследований пульсаций в спутном потоке в канале не могут быть непосредственно перенесены на случай истечения в спутный безграничный поток. В то же время имеются некоторые общие закономерности, присущие как струе в канале, так и струе в свободном спутном потоке.

При анализе зависимости суммарного уровня пульсаций давления B от числа Маха спутного потока можно выделить три группы кривых для определенных значений нерасчетности (фиг. 2, здесь $B = 20 \lg [(q^2)^{1/2} / B_0]$, где $(q^2)^{1/2}$ — среднее квадратичное значение пульсаций давления, $B_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па [6]). На графике представлены результаты испытаний для сопла с $M_j = 3.6$ ($n = 0.4, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0$ — обозначения 1–6 соответственно). При $n < 0.5$ уровень пульсаций давления до $M = 0.8$ мало изменяется, а затем несколько уменьшается. Для $n = 0.6–0.8$ величина B резко снижается при переходе от $M = 0.8$ к $M = 0.9$ и снова скачком возрастает при переходе от $M = 1.1$ к $M = 1.2$. При $M = 0.9 \div 1.1$ донная область закрыта, следовательно, окружена сверхзвуковой кольцевой струей и к торцу сопла проникает излучение только от участка струи до звуковой точки. Кроме того, после перестройки внутренняя поверхность струи, которая является основным источником излучения в направлении донного среза, резко уменьшается. В данном случае, как и при истечении в затопленное пространство [6], пульсации давления в режиме закрытой области меньше, чем в открытой. В окрестности расчетного истечения $n = 0.9 \div 1.0$ звуковое давление невелико, так как донная область закрыта во всем исследованном диапазоне скоростей спутного потока.

Сплошной спектр пульсаций давления на торце сопла зависит от акустического излучения струи [6], от нестационарности течения в донной отрывной зоне [4,5] и от пульсаций давления в набегающем потоке. Шумовое излучение струи возникает главным образом в зонах с наивысшей турбулентностью. Эффективным средством снижения шума является понижение максимального значения турбулентности в струе. Наивысшая степень турбулентности достигается в зоне тангенциального разрыва осевой скорости между струей и спутным потоком. По мере роста скорости потока скорость истекающей струи относительно окружающей струи уменьшается, что вызывает снижение степени турбулентности в вязком



Фиг. 3

слое и уменьшение шума. Снижение шума струи малой скорости в спутном потоке получено в [9].

В экспериментах с кольцевыми струями увеличение скорости спутного потока до звуковой сопровождается понижением широкого максимума и смещением его в область низких частот. Одним из основных источников шума сверхзвуковых струй являются волны, излучаемые сверхзвуковыми пограничными вихрями [10]. Для высокоскоростных струй нужно учитывать доплеровский коэффициент $(1 - M_e \cos \theta)$, который в случае передачи возмущений вверх по потоку равен $(1 + M_e)$. Здесь M_e — число Маха пограничных возмущений; θ — угол между направлением излучения и направлением струи. При наличии спутного дозвукового потока частоты изменяются пропорционально $(1 - M)$, так как этот коэффициент определяет изменение скорости волн относительно сопла.

В спектре пульсаций давления наблюдалась дискретная составляющая. Испытания струи в трубе показали, что реализуются два типа дискретной составляющей: первый — индуцируемый акустической обратной связью и второй — резонансным возбуждением эжектора. Для первого типа по мере роста скорости спутного потока скорость распространения возмущений вверх по потоку уменьшается и период колебаний t должен возрастать.

Период резонансной системы t складывается из времени прохождения возмущений от сопла до эффективного источника и времени прохождения звуковой волны обратно к соплу. В случае истечения в затопленное пространство $t = l / ku_i + l / a$, в спутный поток $t' = l / [u + k(u_i - u)] + l / (a - u)$, где k — коэффициент конвекции вихрей на границе сверхзвукового пограничного слоя; l — расстояние от среза сопла до эффективного источника излучения дискретного тона; u_i и u — скорости струи и спутного потока соответственно, a — скорость звука [11].

Отношение частоты дискретного тона при истечении в спутный поток к соответствующей частоте при нулевой скорости спутного потока

$$\frac{f'}{f} = \frac{t}{t'} = \frac{[u + k(u_i - u)](a - u)(a - ku_i)}{kua[a + k(u_i - u)]}$$

Используя эмпирическую формулу [12] $f = a / k_1 d (P_0 / P_\infty - 1.89)^{-1/2}$, получим

$$\text{Sh} = \frac{F}{k_1} = \frac{[M + k(M' - M)](1 - M)(1 - kM')}{k_1 k M [1 + k(M' - M)]} (P_0 / P_\infty - 1.89)^{-1/2}$$

Здесь $M' = u_i / a$, d — диаметр критического сечения кругового сопла, для кольцевых сопел эквивалентный по площади критического сечения диаметру кругового сопла, P_0 — давление в формкамере.

На фиг. 3 представлена зависимость Sh от F для результатов летных испытаний [11] (I — летные испытания, измерялась вторая гармоника, поэтому на графике дана величина Sh, равная половине измеренной), а также для дискретной составляющей в спектре пульсаций кольцевых сопел (2 и 3 — $M_j = 3.6$, $n = 0.4$ и 0.6 соответственно). Данные летных испытаний описываются линейной зависимостью, совпадающей с расчетом при значении $k_1 = 1.1$. Результаты опытов с кольцевыми струями приближаются к линейной зависимости на участке снижения частоты $M = 0.7 - 0.9$.

Поступила 21 XI 1973

ЛИТЕРАТУРА

1. Лебедев М. Г., Теленин Г. Ф. Исследование взаимодействия сверхзвуковой струи с акустическим полем. Изв. АН СССР. МЖГ, 1970, № 4.
2. Beheim M. A. Flow in the base region of axisymmetric and two-dimensional configurations. NASA, 1960, TR R — 77. 77.
3. Heyser A., Maurer F., Oberdoerffer E. Experimental investigation on effect of tail surfaces and angle of attack on base pressure in supersonic flow. (The Fluid Dynamic Aspects of Ballistics) AGARD Conference Proc., 1966, No. 10, pp. 263—290.
4. Панов Ю. А., Швец А. И., Хазен А. М. Исследование колебаний донного давления за конусом в сверхзвуковом потоке. Изв. АН СССР, МЖГ, 1966, № 6.
5. Швец А. И., Панов Ю. А., Хазен А. М., Новикова В. А. О влиянии числа Маха на колебания донного давления. Вестн. МГУ, Сер. матем. механ., 1968, № 1.
6. Лютый В. А., Новиков Л. В., Швец А. И. Пульсации давления в кольцевых соплах. Изв. АН СССР, МЖГ, 1973, № 5.
7. Швец А. И. Дискретная составляющая в спектре пульсаций кольцевых струй. Рефераты докладов 8-й Всесоюзной акустической конференции, т. 2. М., 1973.
8. Авиационная акустика. М., «Машиностроение», 1973.
9. Corcos G. M. Some effects of sound-reduction devices on a turbulent jet. J. Aero-Space Sci., 1959, vol. 26, No. 10.
10. Случайные колебания. «Мир», 1967.
11. Hay J. A., Rose E. G. In-flight shock cell noise. J. Sound and Vibr., 1969, vol. 11, No. 4.
12. Powell A. A. On the mechanism of choked jet noise. Proc. Phys. Soc., 1953, Ser. B., vol. 66, No. 408.