

КОЛЕБАНИЯ ДАВЛЕНИЯ В КОЛЬЦЕВОЙ СТРУЕ В СПУТНОМ ПОТОКЕ

А. И. ШВЕЦ

(Москва)

В последние годы значительное внимание уделено изучению пульсаций давлений в многосопловых кольцевых компоновках. В этих исследованиях получен обширный материал по влиянию чисел Маха, Рейнольдса и взаимного расположения сопел на пульсации давления. Не останавливаясь на работах по пульсациям донного давления при внешнем обтекании, рассмотрим некоторые работы, относящиеся к акустическому излучению сверхзвуковых струй.

Большое количество публикаций посвящено процессам шумообразования в сверхзвуковых струях [1-3]. Одно из направлений составляют исследования дискретной составляющей шумового спектра. В первых исследованиях свиста струи предложена схема автоколебательного цикла [4] и определено расположение источников дискретного тона [5, 6]. Согласно ряду работ это излучение является почти изотропным, однако исследования [4, 7] показали, что для основной и удвоенной частот имеются преимущественные направления.

Была разработана теория устойчивости, применяемая к свободным струям и эжекторам [8], а также решена задача о взаимодействии струи с внешним акустическим полем в линейном приближении для плоского и цилиндрического случаев и в нелинейном приближении для плоского случая [9, 10].

Высокочастотная область шумообразования струи изучена в работе [11], акустическое взаимодействие параллельных струй — в [12], излучение сверхзвуковой струи в сторону среза сопла — в [13]. Проведены исследования дискретного тона при истечении сверхзвуковых струй из щелевых сопел [14] и в спектре шума реактивных двигателей при полете самолетов [15]. Для широкого класса сверхзвуковых струй установлены универсальные зависимости частотных характеристик дискретных составляющих шумовых спектров [16]. Ряд исследований посвящен акустическому воздействию на течение в струях, в том числе и дискретной составляющей [17, 18]. Имеются данные по влиянию эжектора на спектр излучения струи [19].

Вследствие существенного отличия структуры кольцевой струи от цилиндрической, заключающегося в существовании режимов с открытой и закрытой донными областями [20], можно было предположить, что акустическое излучение кольцевой струи в затопленном пространстве будет иметь свои особенности. Как было показано [21], пульсации давления на торце кольцевого сопла действительно зависят от режимов течения в струе, причем принципиальные отличия наблюдаются для дискретных составляющих в спектре пульсаций. В режиме перерасширенной струи как увеличение нерасчетности, так и рост числа Маха приводят к монотонному снижению частоты дискретной составляющей в спектре пульсаций давления. Зависимости чисел Струхала дискретной составляющей кольцевых струй от относительно давления в форкамере или от среднего числа Маха в струе удовлетворительно совпадают с данными для сплошных струй, если в качестве характерного размера взять эквивалентный диаметр цилиндрической струи: в первом случае — по площади критического сечения, а во втором — по приведенному расходу. Обнаружено исчезновение дискретной составляющей в критическом режиме.

Ниже изложены результаты исследований влияния спутного потока на дискретную составляющую в спектре пульсации донного давления при истечении струи из кольцевого сопла.

В случае течения в спутном потоке в канале вследствие отражения звуковых волн стенки трубы сильно влияют на устойчивость струи. Влияние границ особенно существенно для дискретных составляющих, условие возникновения которых зависит от незначительного изменения внешних факторов. 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.

Исследования выполнялись на модели, состоящей из цилиндра и конической передней части. Модель крепилась на боковой пластине, передняя и задняя части которой имели клиновидные скосы. В донной части модели размещались сменные кольцевые сопла с расчетными числами Маха $M_j=2, 3.1, 3.6$ (диаметр наружной части среза 110 мм, внутренней — 88 мм) и сопло с $M_j=2.5$ (диаметр внутренней части 102 мм). Испытания проведены в аэродинамической трубе с размером рабочей части 600×600 мм². Числа Рейнольдса, рассчитанные по параметрам набегающего потока и отнесенные к диаметру модели, изменялись от $1.3 \cdot 10^6$ до $3 \cdot 10^6$.

В процессе экспериментов измерялись пульсации давления в центре торцовой части сопла с помощью индуктивного датчика. Регистрация сигнала проведена на пятиканальном аппарате магнитной записи с предварительным усилением на станции с несущей частотой 36 кГц. Для непрерывной записи уровней спектральной плотности как функции частоты применялся самописец с логарифмическим преобразователем, т. е. с децибелльной шкалой по уровням и линейной по частоте [21].

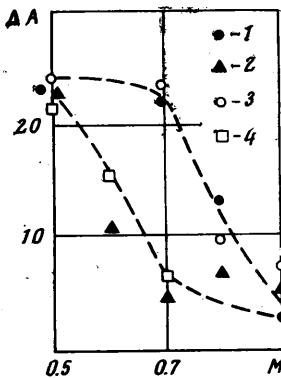
Испытания струи в канале показали, что реализуются два типа дискретной составляющей: первый — индуцируемый резонансным возбуждением эжектора и второй — акустической обратной связью. Для сопла с узкой щелью ($M_j=2.5$) наблюдается возникновение дискретной составляющей, причем амплитуда этой составляющей $A=20 \lg A_i/A_0$ ($A_0=2 \cdot 10^{-5}$ Па) быстро возрастает от $n=1.1$ до 1.8, а затем сохраняется примерно постоянной. Частота дискретной составляющей f остается постоянной и ширина полосы Δf сохраняется примерно равной 14 Гц для основной составляющей и для гармоник. Если частота дискретного тона струи находится вблизи резонансной частоты эжектора ($0.65 f^0 < f < 0.95 f^0$, где f^0 — резонансная частота эжектора), то может произойти возбуждение резонансного процесса в эжекторе и значение f изменится на f^0 [19]. Для эжектора с квадратным сечением частота возбуждения $f^0=(2n+1)a/2h$, где a — скорость звука, h — сторона квадрата. У эжекторов зависимости $f=f(n)$ имеют разрыв и наблюдается затягивание колебаний на частоте f^0 после разрыва. Максимальное возбуждение эжектора возникает при истечении из него и расположении сопла на расстоянии 1—2 диаметров от выхода.

Несмотря на то что у сопла с $M_j=2.5$ нерасчетность изменяется в довольно широких пределах ($n=0-4$) и при этом скорость эжектируемого потока доходит до $M=0.5$, частота дискретной составляющей не изменяется. Безразмерная частота дискретной составляющей близка к частоте возбуждения эжектора $Sh^0=(2n+1)D/2h \approx 0.27$ (здесь Sh^0 — число Струхала возбуждения эжектора, рассчитанное по характерному размеру сопла, D — наружный диаметр кольцевого сопла), и постоянство полосы Δf свидетельствуют о жестком механизме возбуждения. Можно предположить, что в этом случае возбуждаются резонансные колебания в эжекторе.

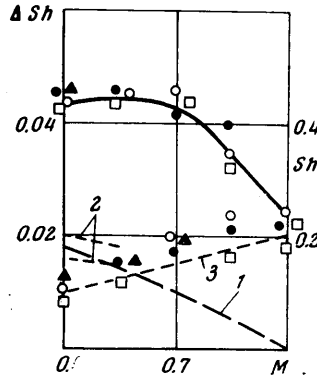
Для сопел с $M_j=2, 3.1$ и 3.6 как изменение степени нерасчетности без организации спутного потока, так и изменение скорости последнего при фиксированной нерасчетности приводят к непрерывному изменению частоты дискретной составляющей. Это позволяет считать, что исследуемые процессы не определяются резонансными возбуждениями эжектора, для которого характерно скачкообразное изменение частоты с одной резонансной на другую, а индуцируются акустической обратной связью. По мере роста числа Маха до 0.5—0.7 величина превышения амплитуды дискретного тона над средним уровнем сплошного спектра ΔA сначала растет, затем снижается и при приближении к скорости звука исчезает (фиг. 1,

$M_j=3.1, n=0.4, 0.7; M_j=3.6, n=0.4, 0.6$, обозначения 1—4). Аналогичное поведение зависимости $\Delta A=f(M)$ наблюдалось в экспериментах с цилиндрическими струями [10], истекающими в спутный дозвуковой поток со свободными границами. Расчеты [9, 10] свидетельствуют о том, что наличие спутного потока при антисимметричных возмущениях во внешнем акустическом поле и «симметризация» возмущений оказывают одинаковое стабилизирующее влияние на струю.

Требует дальнейшего изучения то, что амплитуда дискретного тона у цилиндрической и кольцевой струи при начальном повышении M растет, а не убывает, как это можно представить себе из рассмотрения схемы



Фиг. 1



Фиг. 2

обратной связи. Аналогично истечению в затопленное пространство наблюдается затухание дискретной составляющей при перестройке течения.

В ряде случаев в спектре пульсаций вместе с основной дискретной составляющей и ее гармониками наблюдается еще одна дискретная составляющая значительно меньшей амплитуды, отличающаяся от частоты основной составляющей на величину от нескольких десятков до нескольких сот герц. Эта частота также имеет свои гармоники. В режиме открытой донной области излучение дискретного тона, распространяясь вверх по потоку, взаимодействует со струей вблизи среза сопла на внешней и внутренней границах кольцевой струи. Поэтому можно предположить существование двух петель обратной связи — наружной и внутренней. Вследствие существенного различия в потоках, окружающих струю (снаружи — затопленное пространство или спутный поток, внутри — возвратное течение вблизи дна), частоты, вызываемые внешней и внутренней связями, могут быть различны.

При истечении в спутный поток идущие вверх по течению звуковые волны сносятся набегающим потоком. По мере роста скорости спутного потока скорость распространения возмущений вверх по потоку уменьшается и при подходе к звуковой скорости внешняя петля обратной связи прерывается. Циклический процесс нарушается, и струйно-акустическая система, работающая как фильтр и усилитель колебаний, перестает функционировать. Итак, решающую роль для кольцевых струй играет внешняя петля обратной связи.

По частотам, соответствующим максимальным амплитудам дискретных составляющих, определены числа Струхала $Sh=fD/a$. Начиная с определенной скорости спутного потока, частоты сохраняют примерно постоянное значение, однако из-за снижения скорости звука в спутном потоке по мере

роста M значения Sh несколько возрастают. При приближении скорости спутного потока к звуковой наряду с ослаблением дискретной составляющей происходит также снижение чисел Струхала (фиг. 2, сплошная кривая).

При решении задачи о взаимодействии сверхзвуковой струи с внешним акустическим полем в случае дозвукового спутного потока [10] определены критические частоты внешних акустических волн для антисимметричных возмущений

$$Sh = l(i) \left[\left(\frac{a}{a_j} + \frac{M_j - 1}{1 - M} \right) \left(\frac{a}{a_j} + \frac{M_j + 1}{1 - M} \right) \right]^{-1/2}$$

$$l(i) = i^{-1/2} (m=0, j=0), i (m=0, j=1), \mu^\circ / \pi (m=1, j=0)$$

$$\mu' / (\pi) (m=1, j=1)$$

где $m=0$ для плоского и $m=1$ для цилиндрического случаев; $j=0$ для симметричных и $j=1$ для антисимметричных возмущений во внешней волне; μ° и μ' — i -е корни функций Бесселя I_0 и I_1 . Для цилиндрического случая $l(i) = 0.76$ и 1.66 при $j=0$ и $l = 1.22$ и 2.23 при $j=1$.

На фиг. 2 построена зависимость критической частоты от числа Маха спутного потока для холодной цилиндрической струи (кривая 1). Приведены также экспериментальные данные для холодной цилиндрической струи, где дискретная составляющая была зарегистрирована на двух близких частотах (кривые 2) [10]. В этих экспериментах до отношения площади струи к площади потока, равного 7%, частоты f не изменялись, а последующий рост этого отношения приводил к увеличению f ; при этом отношение площадей мало влияло на амплитуды A .

Частотная ширина полосы дискретной составляющей ΔSh (кривая 3) возрастает почти в два раза при увеличении скорости спутного потока от $M=0.5$ до 0.9. Сопоставляя этот факт с увеличением ΔSh по мере роста нерасчетности при истечении в затопленное пространство, видим, что в тех случаях, когда амплитуда дискретной составляющей максимальна, ширина полосы ΔSh минимальна. Следовательно, наибольшая добротность колебательной системы с акустической обратной связью реализуется при минимальной ширине полосы.

Поступила 12 VI 1972

ЛИТЕРАТУРА

1. Римский-Корсаков А. В. Исследования аэродинамических шумов. Тр. Акуст. ин-та, 1970, вып. 10.
2. Крашенинников С. Ю., Соркин Л. И., Толстошеев М. Н., Яковлевский О. В. Исследование акустических и газодинамических характеристик струйного шумоглушителя. Акуст. ж., 1970, т. 26, вып. 1.
3. Авиационная акустика. М., «Машиностроение», 1973.
4. Powell A. On the mechanism of choked jet noise. Proc. Phys. Soc., 1953, vol. B66, No. 12.
5. Merle M. Emissions acoustiques associées aux jets d'air supersoniques. J. Mécanique, 1965, vol. 4, No. 3.
6. Hammit A. G. The oscillation and noise of overpressure sonic jet. J. Aerospace Sci., 1961, vol. 28, No. 9.
7. Мамин В. Н., Римский-Корсаков А. В. Некоторые экспериментальные исследования свиста сверхзвуковой воздушной струи. Тр. Акуст. ин-та, 1969, вып. 9.
8. Седельников Т. Х. Автоколебательное шумообразование при истечении газовых струй. М., «Наука», 1971.
9. Лебедев М. Г., Теленин Г. Ф. Исследование взаимодействия сверхзвуковой струи с акустическим полем. Изв. АН СССР, МЖГ, 1970, № 4.
10. Лебедев М. Г., Теленин Г. Ф. Сверхзвуковая струя во внешнем акустическом поле. Изв. АН СССР, МЖГ, 1974, № 2.
11. Красильников В. А., Шиллинская Р. Э. Высокочастотная область спектра шумообразования струи. Вестн. МГУ, Физика, 1964, № 3.

12. *Виноградов С. А.* Об акустическом взаимодействии параллельных сверхзвуковых газовых струй. VI Всес. акуст. конф., М., 1968.
 13. *Беленков В. Д.* Акустическое излучение сверхзвуковой струи в сторону среза сопла при различных режимах нерасчетности. Газодинамика и теплообмен, сб. 2, 1970.
 14. *Poldervaart L. J., Vink A. T., Wijnands A. P. J.* The photographic evidence of the feedback loop of a two-dimensional screeching supersonic jet of air. Proc. 6-th Internat. Congr. Acoustics, Tokyo, 1968. Tokyo, 1968.
 15. *Мунин А. Г., Самохин В. Ф.* Акустические характеристики струи движущегося самолета. Тр. ЦАГИ, 1974, вып. 1539.
 16. *Ануфриев В. М., Комаров В. В., Купцов В. М., Мельников Д. А., Сергиенко А. А.* Дискретная составляющая в спектре шума сверхзвуковых струй. Изв. АН СССР, МЖГ, 1969, № 5.
 17. *Глазнев В. Н.* Некоторые закономерности распространения возмущений дискретного тона в сверхзвуковой свободной струе. Изв. СО АН СССР, Сер. техн. н., 1972, № 8, вып. 2.
 18. *Антонов А. Н., Шалаев С. П., Юделович М. Я.* Влияние дискретной составляющей акустических колебаний на течение в нерасчетной сверхзвуковой струе. Изв. АН СССР, МЖГ, 1973, № 4.
 19. *Пыхов Л. С.* О форме колебаний сверхзвуковой струи в эжекторе. VI Всес. акуст. конф., М., 1968.
 20. *Швец А. И.* О влиянии спутного потока на течение в кольцевой струе. ПМТФ, 1974, № 6.
 21. *Лютый В. А., Новиков Л. В., Швец А. И.* Пульсации давления в кольцевых соплах. Изв. АН СССР, МЖГ, 1973, № 5.
-