

УДК 533.6.011.5+532.525.2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАТЕКАНИЯ СВЕРХЗВУКОВОЙ КОЛЬЦЕВОЙ СТРУИ НА ПРЕГРАДУ

ШВЕЦ А. И.

В последние годы значительный интерес вызывают газодинамические задачи взаимодействия газовых струй с преградами, изучаются компоновки с применением одиночных струй, систем струй, а также кольцевых струй. Опубликован ряд работ, в которых представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований взаимодействия осесимметричных сплошных струй с преградами [1-3]. В то же время имеются только единичные эксперименты по флуктуациям кольцевой системы струй, натекающих на преграду [4].

1. Методика экспериментов. Испытания проводились на струйном стенде с возможностью установки различных расстояний от сопла до преграды $h=H/d_n$, где h — относительное расстояние, H — расстояние от сопла до преграды, d_n — диаметр наружного среза кольцевого сопла (фиг. 1, а). Отношение внутреннего диаметра среза сопла d_b к наружному d_n составляло $d=d_b/d_n=0,75$ и $0,9$ ($d_n=50$ мм). Числа Рейнольдса, вычисленные по внешнему диаметру кольцевого сопла и по параметрам потока на срезе сопла, составляли $Re=1 \cdot 10^6 - 8 \cdot 10^6$. Производилось измерение полного давления в центральной точке среза сопла и распределение давления на преграде. Картина взаимодействия фотографировалась с помощью прибора Теплера. Давления измерялись образцовыми манометрами класса точности 0,35. Погрешность измерений давлений не превышала 2% от верхнего предела измерений.

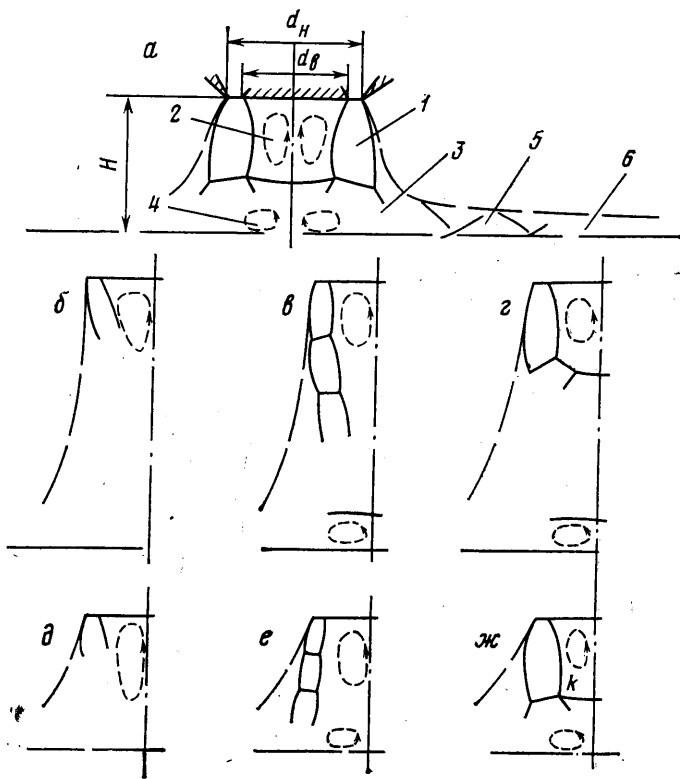
Для измерений пульсаций давления применялись индуктивные датчики давления МПДИ. В процессе экспериментов измерялись суммарные уровни пульсаций

давления $L_{\Sigma}=20 \lg \{ \langle p^2 \rangle^{0,5} / L_0 \}$, [дБ], $\langle p^2 \rangle = \int_0^{\infty} \langle p^2(f) \rangle df$ — средний квадрат пульсаций,

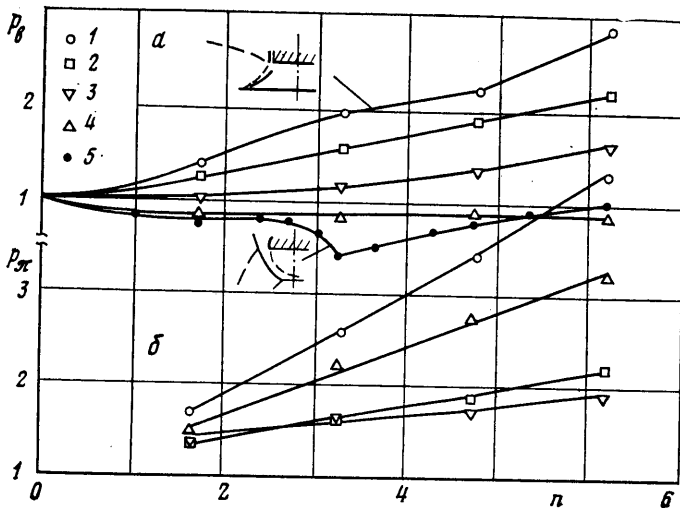
$\langle p^2(f) \rangle$ — спектральная плотность, f — частота, $L_0=2 \cdot 10^{-5}$ Па) и с последовательного анализатора производилась запись на двухкоординатном самописце уровня пульсаций в полосе $\Delta f=7$ Гц. Измерения выполнялись в диапазоне частот $f=50-5000$ Гц. Относительная среднеквадратичная ошибка σ_L при определении уровней пульсаций давления для всего регистрационно-измерительного тракта при надежности 70% составляла $\pm 15\%$; погрешность в определении частот $\sigma_f=\pm 3,5\%$. Шум струи в дальнем акустическом поле измерялся конденсаторным микрофоном, спектральный анализ проводился в октавной полосе частот.

2. Распределение давления. Зависимость относительного донного давления $p_b=p_b'/p_{\infty}$ (p_b' — донное давление, p_{∞} — давление в окружающем пространстве), измеренного на оси торца сопла от степени нерасчетности струи $n=p_a/p_{\infty}$ (p_a — давление на выходной кромке сопла) приведена на фиг. 2, а ($d=0,75$, $h=0,25$; 0,5; 1; 5 и ∞ — обозначения 1-5 соответственно). В изученном диапазоне нерасчетностей $n < 6,2$ на удалениях $h \geq 2$ для сопла $d=0,75$ и $h \geq 3$ для $d=0,9$ повышение n , т. е. давления в форкамере, приводит к снижению давления в центральной части сопла.

При меньших удалениях по мере роста нерасчетности донное давление повышается. В ранее проведенных опытах с кольцевыми струями, истекающими в свободное пространство (фиг. 2, а, $h=\infty$) [5], выделено пять режимов течения в струе при изменении степени нерасчетности. До нерасчетности $n=1$ струя дозвуковая; а при $n > 1$ течение становится сверхзвуковым, причем на зависимости $p_b=f(n)$ были отмечены изломы, соответствующие перестройкам волновой структуры в струе. Если сравнить полу-



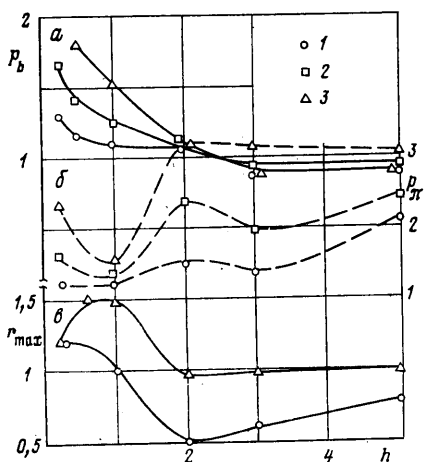
Фиг. 1



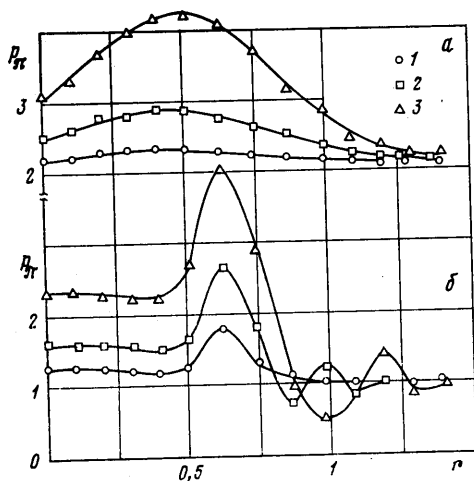
Фиг. 2

ченные данные с аналогичными зависимостями при истечении в свободное пространство [5, 6], то видно, что даже на больших удалениях сказывается влияние преграды, приводящее к повышению донного давления на торце сопла и к изменению параметров перестройки от открытой к закрытой донной области. Так, например, для струи с $d=0,75$, истекающей в свободное пространство, перестройка наступает при $n=3,5$; а при взаимодействии с преградой ($h=2-5$), во-первых, на зависимости $p_b=f(n)$ четко не наблюдается начало перестройки, а, во-вторых, для закрытой донной об-

ласти не реализуется пропорциональность p_b величине n . Исследования истечения струи в свободное пространство показали, что увеличение d приводит к повышению нерасчетности перестройки, а рост числа Маха струи — к снижению этой нерасчетности. Вместе с тем до начала перестройки распределение давления по радиусу торца сопла сохраняется постоянным, а для больших значений n давление снижается от центра к кромке сопла. Если для сверхзвуковых кольцевых струй перестройка течения от открытой донной области к закрытой может происходить как при $n \leq 1$, так и при $n \geq 1$ [6], то для звуковых струй она наступает только при $n \geq 1$.



Фиг. 3



Фиг. 4

Проведем сравнение давления на оси струи в центре сопла (фиг. 2, а) и на преграде в зависимости от n (фиг. 2, б). В изученном диапазоне n давление на преграде повышается с увеличением n . При малых удалениях давления на сопле и на преграде растут, а при больших ($h \geq 3$) — на сопле снижаются, а на преграде растут. Для $h=5$ зависимости $p_n=f(n)$ линейные; а для $h=3$ и 2 отличаются от линейных, однако на малых удалениях эти зависимости опять становятся линейными. Отличие от линейности, вероятно, связано с особенностями формирования ударно-волновой структуры кольцевой струи. Так, на больших расстояниях вязкость выравнивает поле давления в сечении струи, на средних может происходить перестройка замыкающей системы скачков от регулярного взаимодействия к маховскому диску, а при малых — в центральной части струи реализуется маховская конфигурация с последующим скачком перед плоскостью, переходящая при уменьшении расстояния к дозвуковому течению вблизи оси.

На фиг. 3, а ($d=0,9$, 1 — $n=1,7$, 2 — $n=3,3$, 3 — $n=6,2$) представлены величины давлений вдоль оси струи на сопле и на плоскости при изменении расстояния h для фиксированных значений n . Донное давление сначала существенно снижается (до $h \approx 2$ для $d=0,75$ и $h=3$ для $d=0,9$), затем последующее удаление мало влияет на величину p_b . В отличие от донного давления для преграды обнаруживается любопытный факт: на удалении $h=0,5-1$ проявляется резкое снижение давления, которое усиливается по мере роста нерасчетности.

Измерения давления в центральной точке преграды в зависимости от расстояния до сопла и полного давления за прямым скачком уплотнения вдоль оси сверхзвуковой сплошной струи ($M=3$) с нерегулярным отражением скачка [3] дают периодическое изменение давления, которое индуцируется системой последующих скачков уплотнения. Некоторое подобие зависимостей $p=f(n)$ для кольцевой струи и для сплошной при ма-

лых h , где давление сначала снижается, а затем возрастает, определяется совершенно различными структурами струи: в первом случае — это давление в отрывной закрытой зоне, а во втором — в пределах газодинамического участка струи. Вероятно, периодическое изменение давления для кольцевой струи возможно только для больших n и малых d , когда в слившейся сверхзвуковой струе реализуется последовательность скачков уплотнения.

В процессе испытаний измерялось распределение давления на преграде p_n . В случае сопла $d=0,9$ (фиг. 4, $a-h=5$; $b-h=0,25$; 1, 2, 3 — $n=1,7$; 3,3; 6,2; $r=r_i/R$, r_i — расстояние от оси струи до дренажной точки, R — радиус внешней кромки сопла) на удалениях $h>2$ наблюдается повышение давления на преграде от оси до $r=0,3-0,5$, причем по мере повышения нерасчетности струи зона максимального давления отходит от оси. Для удаления $h\leq 1$ в центре преграды реализуется участок незначительного повышения давления и на расстоянии $r=0,5-0,9$ происходит резкое периферийное возрастание давления. Даже на значительном удалении от поверхности ($h=5$), несмотря на то обстоятельство, что струя сливается в сплошную, оказывает влияние кольцевая схема сопла, приводящая к повышению давления не в центре струи, а на некотором радиусе.

На малых удалениях ($h\leq 1$) вблизи оси струи на плоскости реализуется площадка почти постоянного давления. Примерное положение максимума на кривых давления для $d=0,9$; и $n=1,7$ и 6,2 приведено на фиг. 3, в. Уменьшение расстояния h от 2 до 1 сначала отодвигает максимум за пределы внешней кромки сопла, затем значение r_{\max} опять уменьшается. Исключение составляет кривая $d=0,75$, $n=1,7$, где наблюдается уменьшение r_{\max} от $h=3$ до $h=0,5$ с последующим возрастанием.

Для обеих струй повышенное давление распространяется примерно до $r\approx 1,2$. На удалениях меньше $h=3$ проявляется известное по опытам со сплошными струями [2, 3] разрежение на преграде вблизи границы струи. В области разгона пристеночной струи наблюдается затухающее волновое изменение давления, стимулированное периодически повторяющейся системой скачков (фиг. 4, б).

В растекающейся сверхзвуковой веерной струе нарастает пограничный слой, с которым взаимодействуют висячие скачки уплотнения. Эта ситуация вызывает сложное пристеночное течение с большими градиентами давления как вдоль, так и поперек потока, что делает неприменимыми основные допущения теории пограничного слоя. Регулярное или маховское взаимодействие скачков с пограничным слоем вызывает утолщение слоя, а в случае достижения критического перепада давления индуцирует отрыв слоя.

В случае сплошных сверхзвуковых струй периферийные максимумы образуются при реализации маховского отражения и повторяются при удалении преграды. В режимах непосредственного взаимодействия сверхзвуковой кольцевой струи с преградой положения как первого периферийного максимума, так и минимума зависят от общей структуры ударных волн в струе, а последующие периодические изменения давления организуются особенностями разворота и системами скачков в пристеночной струе.

3. Структура взаимодействия. С целью описания картины взаимодействия кольцевой струи с плоской преградой наряду с результатами настоящих опытов представляется разумным использовать ранее полученные данные по исследованию структуры течения звуковых [5] и сверхзвуковых [6] кольцевых струй, а также данные по взаимодействию звуковых кольцевых струй со сверхзвуковым набегающим потоком [7]. В последнем случае некоторый аналог можно усмотреть в построении простой схемы, где поверхность преграды соответствует контактной поверхности между струей и набегающим потоком, поэтому некоторые рассуждения применимы в случае истечения струи во впадину определенной конфигурации, соответствующей некоторой контактной поверхности.

В схеме взаимодействия кольцевой струи с поверхностью все течение разделяется на шесть зон (фиг. 1, *a*): 1 — сверхзвуковое течение между соплом и замыкающими скачками, на которое не влияет взаимодействие, 2 — отрывное течение вблизи сопла, 3 — непосредственное взаимодействие струи с преградой, включающее разворот потока, 4 — отрывное течение вблизи преграды, 5 — сверхзвуковая пристеночная струя, 6 — дозвуковое турбулентное пристеночное течение.

Проведем анализ структуры взаимодействия для трех диапазонов расстояний до преграды ($h=2$, $h=1$, $h<1$) в процессе изменения степени нерасчетности, сопоставив данные по донному давлению, давлению на преграде и фотографии течения (на фиг. 1, *б-г* ($n=1,7$; 3,3; 6,2) представлены картины потока при $h=2$, на 1, *д-ж* ($n=1,7$; 3,3; 6,2) — для $h=1$). На больших расстояниях от сопла сверхзвуковая кольцевая струя переходит в сплошную дозвуковую, которая взаимодействует с преградой. Для $h \geq 2$ пластина оказывает незначительное влияние на струю вблизи сопла. При $n=1,7$ струя сверхзвуковая, недорасширенная, у внешней и внутренней кромок видны слабые висячие скачки, изгибающиеся к оси струи (фиг. 1, *б*). Для $n=3,3$ в струе наблюдаются три — четыре ячейки сверхзвуковой структуры тороидальных скачков уплотнения (фиг. 1, *в*), не достигающих до преграды. Отличие звуковых кольцевых струй от сверхзвуковых кольцевых струй заключается в том, что перестройка течения от открытой донной области к закрытой, сопровождающаяся переходом от снижения к увеличению донного давления, происходит не мгновенно, а на протяжении некоторого участка нерасчетности при $n \geq 1$ (фиг. 2). В то же время для всех кольцевых струй в режиме течения с закрытой донной областью (фиг. 1, *г*, $n=6,2$) донное давление увеличивается пропорционально n , т. е. давлению в форкамере.

На расстоянии трех калибров существенных изменений картины течения по сравнению с $h > 2$ не наблюдается, реализуется аналогичная картина струи по мере изменения n и скачок перед препятствием. Различие во взаимодействии наступает при $h < 1$, когда для $n=3,3$ между соплом и преградой видны три уменьшившиеся по сравнению с $h=2$ (фиг. 1, *б*) ячейки, для $n \geq 4,75$ — вместо одной расширившейся — две тороидальные. Если рассмотреть схему течения (фиг. 1, *в, е*, $n=3,3$) в режиме образования периодической ячеистой структуры, то можно заметить изменение угла наклона ячеек по мере приближения к преграде.

На удалении $h=2$, несмотря на то, что до преграды доходит сверхзвуковая струя и перед ней возникает скачок, ячейки наклонены к оси струи, как и у свободной кольцевой струи, что объясняется разрежением в донной области и осесимметричностью течения. Уменьшение расстояния приводит к расширению угла проекции тороидальной системы последующих взаимодействий скачков, и при $h=1$ эта система доходит до преграды (фиг. 1, *е, ж*, $n=3,3$; 6,2 соответственно).

Переход от снижения к повышению давления, отмеченный в [8] для сопла с $d=0,9$, соответствовал $n=8$ и в настоящих испытаниях не был достигнут. Однако структура струи на фотографиях состояла из одной расширившейся ячейки (фиг. 1, *г, ж*), напоминающей типичную форму для закрытой сверхзвуковой струи, и за этой ячейкой наблюдались размытые скачки, захватывающие не только кольцевую струю, а все сечение сливнейшей сплошной струи. Если при $n=1,7$ вблизи преграды скачок уплотнения незаметен, то уже при $n=3,3$ размытая волновая структура доходит до пластины и перед ней реализуется слегка выпуклый от пластины скачок (фиг. 1, *в, г*).

Постоянной характеристикой кольцевой струи является индуцирование вязкого циркуляционного течения в центральной части кольцевого сопла [6]. У кольцевой струи, взаимодействующей с преградой, также будет отрывная зона в центральной части, и в зависимости от формы сопла, параметров струи и расстояния до преграды эта зона будет локализована

вблизи сопла или дойдет до преграды (фиг. 1, *д*). Для некоторых условий взаимодействия между соплом и преградой могут существовать два отрывных течения: первое непосредственно у сопла, второе вблизи преграды (фиг. 1, *в*, *г*, *е*, *ж*). На малых удалениях вблизи преграды всегда реализуется центральное отрывное течение с предельными линиями тока, направленными к центру струи. Как видно на фиг. 4, во многих режимах взаимодействия максимальное давление на преграде достигается на некотором удалении от оси струи. Подобное распределение давления по преграде с полочкой вблизи оси и пиком за пределами сопла было получено при взаимодействии сплошной сверхзвуковой струи с $M=2$, $n=2,85$ при $h=3$ [2]. Измерения полных давлений показали, что на пластине от пиков течение направлено к центру, а в окрестности оси вблизи преграды — навстречу набегающему потоку. Непосредственно над преградой за прямым скачком уплотнения (k на фиг. 1, *ж*) течение дозвуковое. За внешним отраженным скачком в периферийной зоне взаимодействия сверхзвуковое течение в струе, разворачиваясь, может переходить в сверхзвуковое течение в пристеночной струе.

Многообразие возможных применений кольцевых струй с различными скоростями истечения, расстояний до преграды и форм преграды реализует целый ряд схем взаимодействий. Взаимодействие на малых расстояниях ($h < 0,5$) недостаточно изучено и тут необходимы дальнейшие исследования. Вероятно, в этом случае сверхзвуковая кольцевая струя будет непосредственно образовывать сверхзвуковую веерную струю и возникнет некоторый аналог с течением в своеобразном кольцевеверном сопле (фиг. 1, *ж*).

При удалениях с очень малыми h даже для сверхзвуковых сопел щель играет роль критического сечения и все течение между соплом и преградой будет дозвуковым. Можно предположить, что для малых удалений происходит своеобразное «закрытие» сверхзвуковой кольцевой струи препятствием при меньших значениях n по сравнению с теми, которые требуются для перестройки в случае истечения в свободное пространство. В обоих случаях донная область окружена сверхзвуковой кольцевой струей и донное давление линейно растет с ростом n , однако в первом случае течение на оси струи дозвуковое, а во втором достигается сверхзвуковая скорость.

4. Пульсации давления и акустическое излучение. Характерная особенность взаимодействия струй с поверхностью — появление неустойчивых режимов течения с колебаниями волновой структуры, которые сопровождаются мощными пульсациями давления на преграде и возбуждением интенсивных звуковых волн в окружающем пространстве. В исследованиях взаимодействия сплошных струй с преградой в одних опытах режимы неустойчивого течения фиксировались по разрушению волновой структуры на тепловых фотографиях струи и связывались с появлением периферийного максимума давления, а в других [3] — по излучению дискретного тона и объяснялись волновой структурой струи.

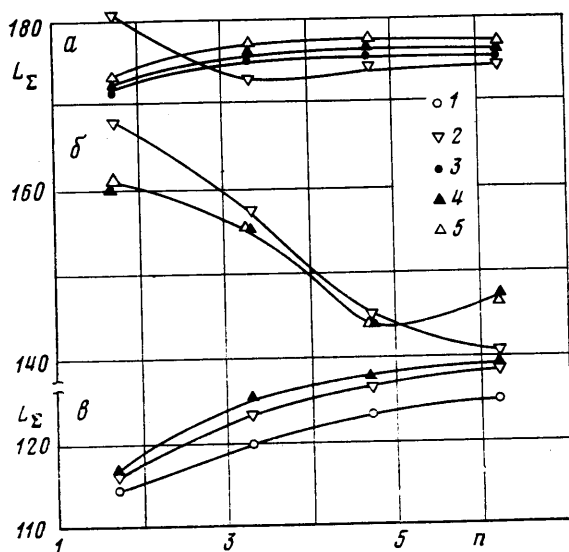
В настоящем исследовании неустойчивость взаимодействия кольцевой струи изучалась с помощью измерений пульсаций давления в центральных точках сопла и преграды, а также в дальнем акустическом поле на расстоянии $100 d_n$ (фиг. 5, *а* — преграда, *б* — дно, *в* — дальнее поле, $d=0,75$; $1-5 - h=0,25$; $1; 2; 3; 5$ соответственно).

Существование тороидальных скачковых структур с системами висячих волн в кольцевой струе и последующие центральные прямые или косые скачки в слившейся струе неизбежно приводят к существенной неравномерности падающей струи на ограниченных удалениях. Как следствие возникают вихревые течения и нестационарные эффекты, особенно в области периферии струи и в начале развернувшегося потока.

В донной части кольцевого сопла ($d=0,75$) по мере увеличения n от 1,7 до 4,7 пульсации уменьшаются, последующее увеличение n до 6,2 приводит на больших удалениях ($h=3$ и 5) к росту пульсаций, а при малом

удалении $h=1$ — к снижению (фиг. 5, б). Отличие зависимостей $L_z=f(n)$ для удалений $h=2, 3$ и 1 наблюдается также и на преграде, где в первом случае пульсации имеют пологий максимум при $n=3-5$, а во втором — минимум (фиг. 5, а). Следует отметить, что уровень пульсаций на преграде на 15–30 дБ больше, чем на сопле. Для сопла с $d=0,9$ величина L_z немного повышается в диапазоне $n=1,7-6,2$.

Сверхзвуковая струя является источником трех типов акустических излучений: пограничных возмущений, турбулентного шума и дискретного тона. Один из основных источников шума сверхзвуковых струй — пограничные возмущения.



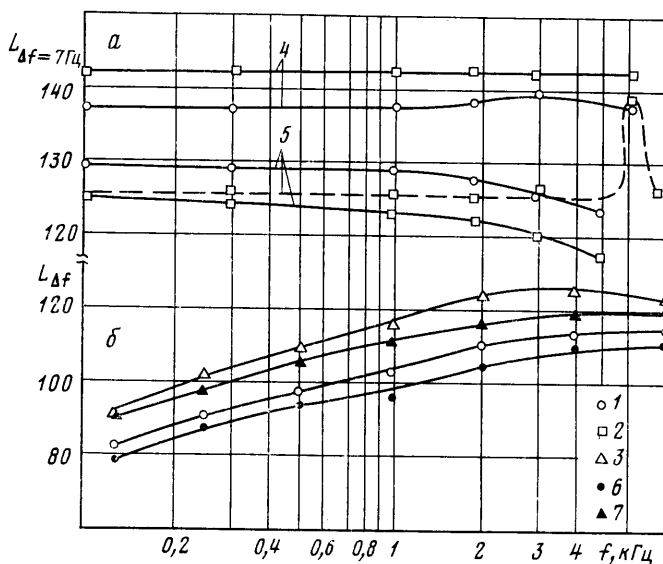
Фиг. 5

Сверхзвуковой участок кольцевой струи распространяется в изученных диапазонах параметров истечения — до 4–7 калибров. В случае взаимодействия струи с преградой соответственно расстоянию до преграды длина сверхзвукового участка струи сокращается. Вместе с тем организуется сверхзвуковая пристеночная струя, также имеющая волновую структуру и пограничные возмущения. Одновременно с влиянием на сверхзвуковые пограничные возмущения преграда уменьшает участок турбулентного излучения взаимодействующей струи, к которому, однако, добавляются турбулентные возмущения в пристеночной струе. Шумовое излучение струи возникает главным образом в зонах с наивысшей турбулентностью, которые реализуются непосредственно в области взаимодействия (фиг. 1, зона 3).

В дальнем акустическом поле для всех исследованных режимов взаимодействия отмечено повышение пульсаций с ростом степени нерасчетности (фиг. 5, в). Суммарный уровень пульсаций в дальнем поле повышается по мере удаления сопла от преграды, следовательно, приближение преграды к соплу снижает шум струи, что особенно заметно при малых значениях h ($h < 1$).

При изучении колебательных процессов в случае неустойчивого взаимодействия струи с преградой полезную информацию дают спектральные характеристики пульсаций давления. Важное значение имеют дискретные составляющие в спектре пульсаций, которые свидетельствуют о концентрации пульсационной энергии в узком диапазоне частот, а также показывают частоты, на которых могут возбуждаться резонансные колебания элементов конструкции.

Рассмотрим кратко влияние формы струи на амплитудно-частотную характеристику пульсаций давления. В первом приближении длина звуковой волны определяется шириной области смещения в любой части струи и величиной средней скорости в этой области. Вследствие того, что при одинаковом весовом расходе и неизменной тяге у кольцевой струи периметр больше, чем у круглой, уменьшается расстояние вдоль оси, на котором в струю эжектируется данное количество воздуха, размеры вихрей становятся меньше, т. е. изменяются линейные масштабы процесса перемешивания. Если без изменения площади выходящей струи изменить форму сопла так, чтобы струя истекала из тонких кольцевых щелей, частота пульсаций увеличится примерно пропорционально отношению начального диаметра к ширине щели.



Фиг. 6

Для непрерывной записи уровня пульсаций в полосе $\Delta f = 7$ Гц применялся самописец с децибелльной шкалой по уровням и линейной по частоте. На фиг. 6, а ($d=0,75$, 4 — преграда, 5 — дно, $h=2$ — сплошные линии, $h=1$ — штриховые; 1, 2 — $n=1,7$ и 3,3) представлены спектры пульсаций в центральных точках дна сопла и преграды. Обращает на себя внимание дискретная, составляющая в спектре пульсаций при $h=1$ и $n=3,3$. В опытах на удалении h , примерно равном единице, четко выделялась интенсивная дискретная составляющая, однако в силу заданного шага по h и по n диапазон параметров взаимодействия, при которых наступает максимальный акустический резонанс, не был определен. Отметим, что в опытах [4] с кольцевой связкой сопел при $h=1$ в спектре также появилась частота со значительной амплитудой. Спектральный анализ шума струи в дальнем акустическом поле выполнялся в октавном диапазоне частот (фиг. 6, б; $d=0,9$, $h=2-(1-3)$, $h=0,25-(6-7)$; 1, 6 — $n=1,7$; 2 — $n=3,3$; 3, 7 — $n=6,2$).

ЛИТЕРАТУРА

1. Дулов В. Г. Модели струйных течений. — В кн.: Аэрогазодинамика и физическая кинетика. Новосибирск, 1977, с. 102–130.
2. Губанова О. И., Лунев В. В., Пластинина Л. Н. О центральной срывной зоне при взаимодействии сверхзвуковой недорасширенной струи с преградой. — Изв. АН СССР. МЖГ, 1971, № 2, с. 135–138.
3. Анцупов А. В. Взаимодействие сверхзвуковой нерасчетной струи с плоской преградой. — Тр. ЦАГИ, 1975, вып. 1698, 24 с.

4. Желтухин Н. А., Запьягаев В. И. Некоторые характеристики взаимодействия кольцевой струи с плоской преградой. — В кн.: Газодинамика и акустика струйных течений. Новосибирск, 1978, с. 37–60.
5. Гогин Л. В. Релаксационные колебания в турбулентном ближнем следе. — Изв. АН СССР. МЖГ, 1969, № 6, с. 3–10.
6. Petrik H. K. Wechseldruckmessungen an Pildüsenströmungen hinsichtlich dynamischer Beanspruchung van Hautstrukturen wiederverwendbarer Träger-raketen. — Raumfahrtforschung, 1973, B. 17, № 5, S. 235–246.
7. Коваль М. А., Швец А. И. Экспериментальное исследование звуковых и сверхзвуковых кольцевых струй. — ПМТФ, 1979, № 4, с. 83–89.
8. Швец А. И. Сверхзвуковая кольцевая струя. — ПМТФ, 1975, № 2, с. 59–69.
9. Коваль М. А., Швец А. И. Звуковая кольцевая струя во встречном сверхзвуковом потоке. — Изв. АН СССР. МЖГ, 1979, № 5, с. 175–180.
10. Лютый В. А., Новиков Л. В., Швец А. И. Пульсации давления в кольцевых соплах. — Изв. АН СССР. МЖГ, 1973, № 5, с. 126–132.
11. Глазнев В. Н., Демин В. С., Якушев А. М. Об автоколебаниях в недорасширенной струе, натекающей на преграду. — Изв. АН СССР. МЖГ, 1977, № 6, с. 38–43.

Москва

Поступила в редакцию
24.XII.1981