

УДК 532.525.2 : 533.6.011

Е. Г. ЗАЙЦЕВ

ПРИСТЕНОЧНАЯ НЕДОРАСШИРЕННАЯ СТРУЯ В СПУТНОМ ПОТОКЕ

Экспериментально исследовано течение плоской недорасширенной пристеночной струи, истекающей из звукового сопла вдоль стенки канала. Получена зависимость размера первой бочки струи от степени нерасчетности. Показано, что при течении струи в канале возникает значительный осевой градиент давления на начальном участке течения индуцированного спутного потока и это приводит к существенному изменению геометрических размеров струи.

Структура недорасширенной струи, движущейся вдоль твердой поверхности, существенно отличается от структуры свободных недорасширенных струй [1]. Однако данные о структуре пристеночных струй крайне скудны, в то время как становится все более ясным, что только предварительное представление о физической картине и главных особенностях этих течений, полученное экспериментально, позволяет построить их расчетные модели. Это обусловлено тем, что в течениях такого типа важную роль играют специфические явления, связанные с несимметрией течений, их гистерезисом, наличием перемежающегося отрыва и т. д.

В предыдущих работах, например [2—4], были исследованы недорасширенные пристеночные струи, истекающие в затопленное пространство, в спутный свободный поток или около донного среза. Исследования струи, истекающей в канал, представляют собой самостоятельную задачу, так как течение такой струи существенно отличается от перечисленных течений.

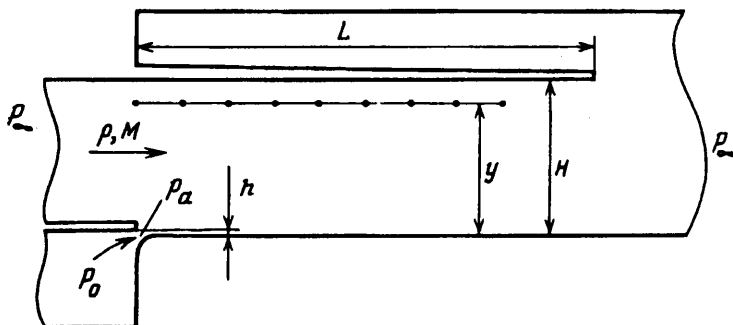
1. Эксперименты проводились на специальной модельной установке, схема которой представлена на фиг. 1. Струя выдувалась через щелевое сопло шириной $h = 8$ мм вдоль нижней стенки канала с прямоугольным поперечным сечением, что обеспечивало плоскопараллельную структуру течения. На расстоянии $H^* = 10,75$ ($H^* = H/h$) от нижней стенки располагался горизонтальный экран, меняя длину которого, можно было изменять продольное распределение давления в спутном потоке и соответственно давление вдоль границы струи. Относительная длина экрана $L^* = L/h$ изменялась в диапазоне 37,5—6,3. Все геометрические размеры нормировались к ширине сопла, так как она является определяющим параметром в пристеночных струях [2].

Спутный поток в канале образуется за счет эжектирования струей воздуха из атмосферы. Скорость потока зависит от параметров струи.

Перепад давления в струе $\sigma = p_0/p_\infty$ (p_0 — полное давление в струе, p_∞ — давление окружающей среды) в процессе исследований изменялся в пределах 1,9—7,1; а соответствующая степень нерасчетности $n = p_a/p$ (p_a — давление в струе на срезе сопла, p — давление во входном сечении канала) — в пределах 1,1—4,7. Статическое давление во входном сечении канала измерялось путем соединения пяти дренажных отверстий, расположенных вертикально в ряд на боковой стенке в плоскости входного сечения, в общий коллектор. Давление на срезе сопла рассчитывалось по известному p_0 с учетом того, что скорость истечения из сопла звуковая. Числа Re , вычисленные по параметрам в выходном сечении сопла, лежали в диапазоне от $(2,3—7,7) \cdot 10^5$. Все измерения давления проводились с использованием системы автоматического сбора и обработки информации. Визуализация и фотографирование течения осуществлялись с помощью прибора ИАБ-451.

2. При истечении неизобарической струи в свободный спутный поток давление вдоль границы струи оказывается переменным в отличие от истечения в свободное затопленное пространство. Для дозвукового спутного потока отличие давления от p_∞ незначительно и поэтому структура такой спутной струи мало отличается от структуры затопленной струи [5]. Опыты со струей в свободном спутном дозвуковом потоке ограниченных размеров показали определенное влияние границ потока на структуру струи [6]. Течение струи в канале также отличается от течения в затопленном пространстве и свободном спутном потоке [7, 8].

Рассмотрим особенности течения в канале недорасширенной пристеночной струи. Одной из основных характеристик начального участка струи является длина первой бочки S . В экспериментах S определялась по теневым фотографиям течения как расстояние до точки выхода первого косога скачка



Фиг. 1

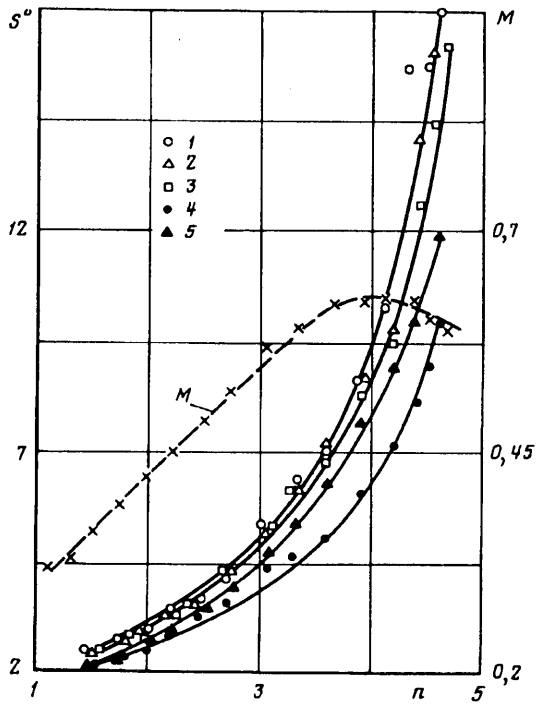
на поверхность струи. Такое определение S для пристеночных струй предпочтительнее, чем по распределению давления вдоль поверхности [2]. При фиксированной степени нерасчетности (перепаде давления) распределение давления вдоль границы струи в канале существенно переменено и значительно отличается от p_∞ даже при дозвуковых скоростях индуцированного спутного потока. Это связано с изменением геометрии спутного потока за счет его поджатия недорасширенной струей. Вдоль оси канала скорость спутного потока возрастает, а давление соответственно падает, и на начальном участке в спутном потоке возникает отрицательный градиент давления $dp/dx < 0$, оказывающий влияние на структуру струи и, в частности, на размеры первой бочки. В работе рассматривается именно начальный участок течения в пределах первой бочки, на котором $dp/dx < 0$, слой смешения струи не достиг стенки канала, а в спутном потоке сохраняется потенциальное ядро. Дальше вниз по потоку, когда основную роль начинают играть процессы смешения, статическое давление вдоль направления потока увеличивается и $dp/dx > 0$.

На фиг. 2 приведена зависимость длины первой бочки недорасширенной струи от степени нерасчетности для длин горизонтального экрана $L^* = 37,5; 25; 18,8; 12,5; 6,3$ (кривые 1—5). Длина первой бочки струи возрастает с увеличением n и зависит от длины экрана. На фиг. 3 приведены соответствующие зависимости S^* от L^* для перепадов давления $\sigma = 4,9; 5,9; 6,8$ (кривые 1—3). Зависимость S^* от L^* объясняется изменением распределения давления вдоль границы струи на начальном участке при изменении длины экрана. На фиг. 4 приведено продольное ($x^* = x/h$) распределение относительного статического давления $p^* = p/p_\infty$ вниз по потоку от среза сопла на расстоянии $y^* = 8,4$ ($y^* = y/h$) от нижней стенки канала. Цифрами 1—3 обозначены результаты для $L^* = 37,5$ и $\sigma = 3,9; 5,9; 6,8$; а цифрами 4—6 — для $\sigma = 6,8$ и $L^* = 18,8; 12,5; 6,3$.

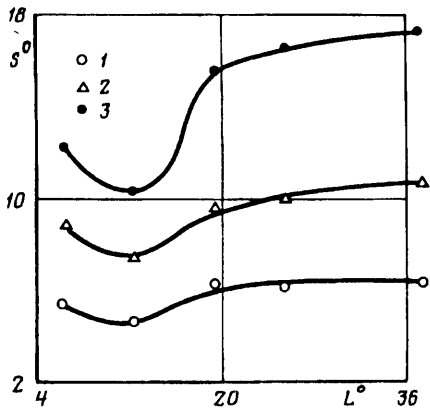
Из полученных экспериментальных данных видно, что при больших L^* ($L^* \geq 25,0$), когда осевой градиент давления в спутном потоке слабо зависит от длины экрана, размер первой бочки струи практически не изменяется при изменении L^* , а зависит только от степени нерасчетности. Обработка результатов показала, что в данном случае не удастся найти единого эмпирического соотношения типа $S^* = an^b$ (a, b — постоянные коэффициенты) для длины первой бочки, обеспечивающего приемлемую точность во всем диапазоне изменения n . Эмпирическое соотношение, дающее ошибку в пределах $\pm 6\%$, имеет вид

$$S^* = 1,22n^{1,34}; \quad n \leq 3,3; \quad S^* = 0,06n^{3,68}; \quad n > 3,6$$

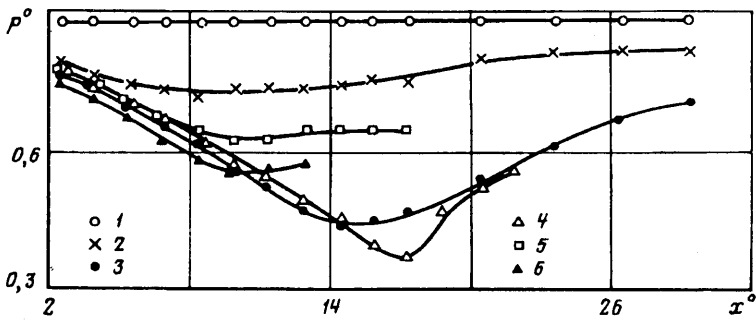
Изменение характера зависимости связано с изменением режима течения при увеличении перепада давления. По мере увеличения σ скорость спутного потока вдоль оси канала возрастает и может в пределах экрана превысить скорость звука. При этом возникает значительно больший осевой градиент давления (фиг. 4), что приводит к более сильной зависимости S^* от n при больших степенях нерасчетности ($n > 3,6$). Скачок уплотнения, образующийся в струе, преломляясь в слое смешения, проходит в спутный поток (фиг. 5, спутный поток и струя распространяются влево), в то время как при дозвуковом спутном потоке скачок отражается от звуковой линии в слое смешения струи. Скорость потока во входном сечении канала не зависит от L и при $n < 4,0$ наблюдается линейная зависимость числа M спутного потока от степени нерасчетности для всех L^* (фиг. 2). Эта линейная зависимость нарушается при $n > 4,0$, когда при больших L^* происходит «запирание» спутного потока в пределах экрана; а при малых L^* аналогичный эффект достигается, видимо, в результате взаимодействия слоев смешения струи и спутного потока в донной области за экраном.



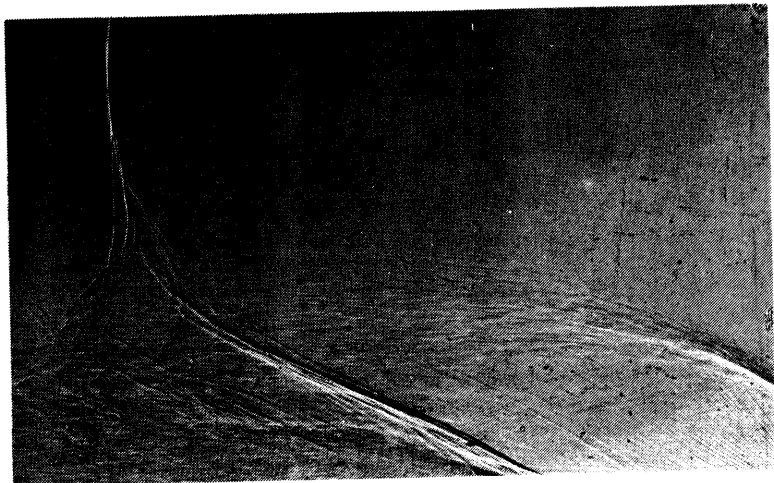
Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5

Длина первой бочки пристеночной струи в спутном потоке при $L^* \geq 25,0$ больше, чем у плоских струй, истекающих в затопленное пространство ($S^* \sim n^{1,05}$) [9], и у пристеночной струи с донной областью ($S^* \sim n^{1,20}$) [10]. В обоих этих случаях давление вдоль границы струи остается практически постоянным.

При $L^* < 25,0$ длина первой бочки существенно зависит от L^* (фиг. 3). Изменение длины экрана в этом диапазоне приводит к тому, что меняется осевой градиент давления в спутном потоке и соответственно распределение давления вдоль границы струи. Градиент давления неоднозначно зависит от L^* и, как видно из результатов эксперимента, при $L^* = 12,5$ достигает минимального значения в пределах длины экрана (фиг. 4). Это в свою очередь приводит к тому, что размер первой бочки становится наименьшим при $L^* = 12,5$. С увеличением перепада давления зависимость S^* от длины экрана проявляется сильнее. Например, при $\sigma = 4,9$ минимальный размер первой бочки струи меньше исходного на $\sim 25\%$, а при $\sigma = 6,8$ — уже на $\sim 41\%$. Обусловлено это более резким изменением осевого градиента давления при изменении длины экрана в случае больших перепадов давления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамович Г. Н., Гиринович Т. А., Крашенинников С. Ю. и др. Теория турбулентных струй. М.: Наука, 1984. 716 с.
2. Борисов Ю. Я., Подольский С. Л. Длина бочки кольцевой недорасширенной струи, истекающей из звукового сопла, имеющего на оси цилиндрический стержень//Изв. АН СССР. МЖГ. 1980. № 4. С. 167—171.
3. Абрамович Г. Н., Кузьмич В. Б., Секундов А. Н., Смирнова И. П. Экспериментальное и расчетное исследование сверхзвуковой пристеночной струи в спутном сверхзвуковом потоке//Изв. АН СССР. МЖГ. 1972. № 4. С. 25—32.
4. Зайцев Е. Г. Исследование распространения над уступом плоской пристеночной струи//Изв. АН СССР. МЖГ. 1991. № 4. С. 61—66.
5. Авдеевский В. С., Ашратов Э. А., Иванов А. В., Пирумов У. Г. Газодинамика сверхзвуковых неизобарических струй. М.: Машиностроение, 1989. 320 с.
6. Шеиц А. И. О влиянии спутного потока на течение в кольцевой струе//ПМТФ. 1974. № 6. С. 74—79.
7. Barchilon M., Curtet R. Some details of the structure of an axisymmetric confined jet with backflow//J. Basis Engng. 1954. V. 86. № 4. P. 777—787. (Рус. перев.: Некоторые особенности структуры осесимметричной ограниченной струи с возвратным течением//Теор. основы инж. расчетов. 1964. № 4. С. 173—184).
8. Назарчук М. М., Панченко В. Н. Ограниченные струи. Киев: Наук. думка. 1981. 211 с.
9. Scheeram W. J., Dosanjh O. S. Observation of jet flows from a two-dimensional underexpanded sonic nozzle//AIAA Journal. 1968. V. 6. № 3. P. 540—542. (Рус. перев.: Исследование струи, истекающей из двумерного недорасширенного звукового сопла//Ракетная техника и космонавтика. 1968. Т. 6. № 3. С. 225—227).
10. Зайцев Е. Г. Экспериментальное исследование недорасширенных струй, истекающих около донного среза//ПМТФ. 1992. № 2. С. 76—81.