

3. Рыжов О. С. Исследование трансзвуковых течений в соплах Лаваля. М., изд. ВЦ АН СССР, 1965.
4. Лифшиц Ю. Б., Рыжов О. С. О переходе через скорость звука в соплах Лаваля с круглым поперечным сечением. — ДАН СССР, 1964, т. 158, № 3.

УДК 532.526

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГАЗОВОЙ ЗАВЕСЫ В СОПЛАХ ЛАВАЛЯ НА НЕРАСЧЕТНЫХ РЕЖИМАХ ТЕЧЕНИЯ

Э. П. Волчков, В. К. Козьменко, В. П. Лебедев

(Новосибирск)

Известно, что в сверхзвуковой части сопла Лаваля на режимах перерасширения процессы теплопередачи имеют особенности, вызванные взаимодействием скачков уплотнения с пограничным слоем [1]. В этих условиях при организации защиты стенок с помощью газовой завесы от воздействия высокотемпературного потока необходимо учитывать как тепловые параметры, так и динамические характеристики режима течения. Опытные данные на плоской пластине [2] показывают, что падающие извне скачки существенно снижают эффективность завесного охлаждения.

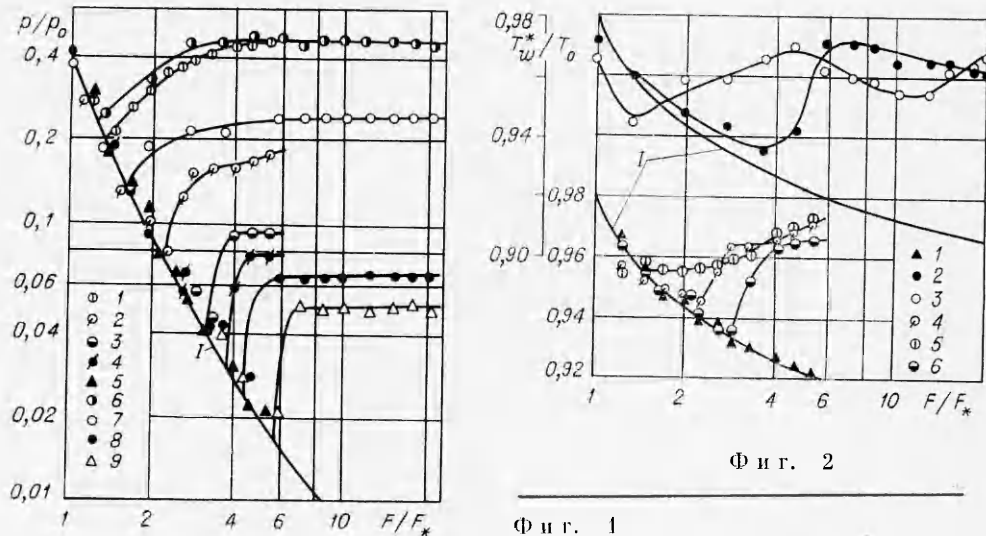
В данной работе приводятся экспериментальные данные по эффективности газовой завесы в сверхзвуковых конических соплах, работающих на режимах перерасширения. Завеса образуется вдувом воздуха через кольцевую щель, расположенную на входе в сопло. Экспериментальные результаты сравниваются с опытными данными, полученными в этих же соплах при расчетных режимах течения.

Описание экспериментальной установки, измерительной аппаратуры и методов измерений приведено в работе [3]. Рабочие участки — сменные сверхзвуковые конические сопла — выполнены из текстолита. В опытах использовались сопла $30-6^\circ$ ($\alpha_1 = 30^\circ$ и $\alpha_2 = 6^\circ$ — полууглы дозвуковой и сверхзвуковой конических частей соответственно) и $30-15^\circ$. Сопла имели одинаковые диаметры входа ($D_+ = 80$ мм) и критического сечения ($D_* = 20$ мм). Контур сопла во входной части и в области горла выполнен в виде дуг окружностей с радиусами, составляющими 0,7 и 1,5 от радиусов соответствующих поперечных сечений. Диаметр на выходе для сопла $30-6^\circ$ равен 50 мм, а для сопла $30-15^\circ$ — 90 мм.

Для измерения температуры стенки вдоль одной образующей сопла заподлицо с внутренней поверхностью установлены нихром-константановые термодпары, изготовленные из проволоки диаметром 0,2 мм. В тех же сечениях, где расположены термодпары, на различных образующих сопла, просверлены отверстия диаметром 0,4 мм для измерения статического давления.

В проведенных экспериментах воздух основного потока имел температуру торможения в форкамере $T_0 \approx 300$ К, близкую к температуре окружающей среды. Вдуваемый воздух нагревался в среднем до $T_s \approx 360$ К. Скорость основного потока на входе в сопло равна 14–15 м/с. Параметр вдува $m = \rho_s w_s / \rho_0 w_0 = 0,1-0,7$. Здесь ρ_0 , w_0 и ρ_s , w_s — плотность и скорость основного и вторичного потоков в сечении среза щели. Опыты проведены при давлении торможения основного потока в форкамере $p_0 = 2-8$ кг/см². При этом режимы перерасширения наблюдались в сопле $30-6^\circ$ при $p_0 < 5$ кг/см², а в сопле $30-15^\circ$ — во всем исследованном диапазоне давлений.

Известно, что на режимах перерасширения в сверхзвуковой части сопла образуются скачки уплотнения. При малых перепадах давления



Ф и г. 2

Ф и г. 1

в сопле скачки расположены вблизи критического сечения, а при увеличении перепада они смещаются к выходу из сопла [4]. Характер взаимодействия скачков уплотнения с пограничным слоем зависит от разных причин, в частности от местоположения скачков и их интенсивности. Если скачки малой интенсивности только утолщают пограничный слой, то при достижении некоторой (критической) интенсивности скачка возможен отрыв потока от стенки [4, 5]. Имеющиеся опытные данные [1, 5—8] показывают, что скачки уплотнения влияют на изменение вдоль сопла статического давления. Существует их влияние и на равновесную температуру стенки. Поэтому был изучен характер изменения статического давления и равновесной температуры вдоль стенки сопла на различных нерасчетных режимах течения.

На фиг. 1 показано распределение давления вдоль сверхзвуковой части исследуемых сопел при разных перепадах давления в сопле. Отношение статического давления на стенке p к давлению торможения в форкамере p_0 дано в зависимости от отношения площадей текущего F и критического F_* сечений. Кривая I — расчет по одномерной теории для изэнтропического течения по формуле [8]

$$(1) \quad \frac{F}{F_*} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \left(\frac{k-1}{k+1} \right)^{\frac{1}{2}} \left[1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{p}{p_0} \right)^{-1/k}$$

На расчетных режимах течения падение давления вдоль сопла хорошо описывается этой формулой (например, опытные точки 5 в сопле $30-6^\circ$ при $p_0 = 7,3$ кг/см²). Анализ экспериментальных данных по давлению на нерасчетных режимах течения позволяет сделать вывод, что в проведенных исследованиях реализуются различные типы взаимодействия пограничного слоя со скачками уплотнения. Например, в опытах 1 ($p_0 = 2$ кг/см²) и 2 ($p_0 = 3,5$ кг/см²) давление, начиная от области сжатия пограничного слоя, непрерывно возрастает вдоль сверхзвуковой части сопла $30-6^\circ$. Как показано в работе [5], в этом случае имеет место безотрывное взаимодействие скачков с пограничным слоем или зарождающийся отрыв потока от стенки. Другой характер изменения давления наблюдается в опытах 3 ($p_0 = 4,4$ кг/см²), 4 ($p_0 = 4,7$ кг/см²) в сопле $30-6^\circ$ и 8 ($p_0 = 7,3$ кг/см²), 9 ($p_0 = 8,5$ кг/см²) в сопле $30-15^\circ$. В них основная доля

повышения давления происходит в области сжатия пограничного слоя, а далее вниз по потоку давление практически не изменяется, образуя так называемое «плато давления». Аналогичный характер изменения давления наблюдается в работах [1, 6, 8], где рассмотрены случаи отрывных течений. Значения перепада давления в скачке в опытах 3, 4, 8, 9 соответствуют расчетным величинам критического перепада давления, полученным в работах [4, 6, 9, 10]. Это позволяет сделать вывод о том, что и в наших опытах происходит развитый отрыв потока от стенки.

Для того чтобы в данном случае найти начало и протяженность области взаимодействия скачка с пограничным слоем, используют эмпирические соотношения, обобщающие экспериментальные данные [4, 6, 9]. Например, начало области сжатия можно найти по известному перепаду давления в сопле с помощью уравнения (1) и соотношения из работы [6], записанного в виде

$$(2) \quad p_i/p_0 = \frac{2}{3} (p_-/p_0)^{1,2}.$$

При этом принимают, что давление p_i в начале области сжатия еще соответствует расчетному значению для одномерного изэнтропического течения, а давление на выходе из сопла p_- близко к давлению за скачком. В наших экспериментах с развитым отрывом потока число Маха в точке с давлением p_i изменялось от 2,4 до 3,4.

Отметим особенности отрывных течений в сопле 30 — 15°, когда скачки уплотнения располагаются вблизи критического сечения (опыты 6 — $p_0 = 2$ кг/см², 7 — $p_0 = 3,6$ кг/см²). В этих случаях имеет место неустойчивость показаний давления в начале области сжатия пограничного слоя. Низкочастотные пульсации давления большой амплитуды в этих опытах вызваны периодическим смещением начала области сжатия вдоль стенки сопла. Аналогичные режимы наблюдались в опытах других авторов [1, 4].

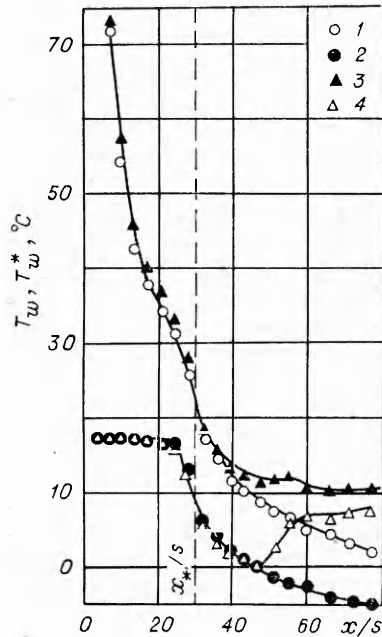
Таким образом, в наших экспериментах в области взаимодействия пограничного слоя со скачками уплотнения имело место как безотрывное течение или течение с зарождающимся отрывом, так и развитый отрыв потока от стенки.

Равновесная температура газа T_w^* , т. е. температура на адиабатической стенке при отсутствии газовой завесы, для различных типов нерасчетных течений изменяется вдоль сопла по-разному. Это можно видеть на фиг. 2, где результаты некоторых экспериментов по изменению T_w^* вдоль сверхзвуковой части сопла обработаны в виде зависимости T_w^*/T_0 от F/F_* . При этом для каждого режима течения опытные данные по давлению и температуре на фиг. 1 и 2 имеют одинаковые символические обозначения.

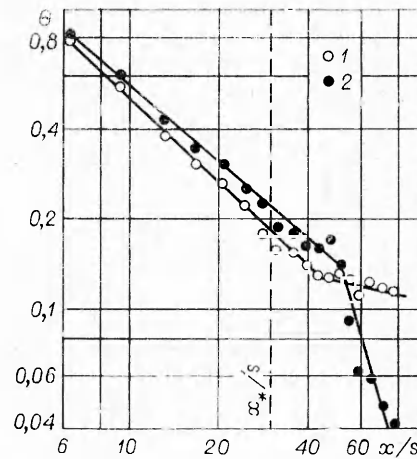
На расчетных режимах течения (например, опытные точки 1 в сопле 30 — 6°) изменение равновесной температуры стенки соответствует теоретической зависимости для одномерного изэнтропического течения с коэффициентом восстановления $r = 0,885$ (кривая 1) по формуле

$$(3) \quad T_w^*/T_0 = \left(1 + r \frac{k-1}{2} M^2\right) / \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2\right).$$

Во всех режимах перерасширения в области взаимодействия скачков уплотнения с пограничным слоем температура стенки вдоль сопла растет. Однако если при безотрывном течении T_w^* возрастает вдоль всей области взаимодействия (опытные точки 5 в сопле 30 — 6°), то при развитом отрыве потока от стенки T_w^* резко возрастает в области сжатия пограничного



Ф и г. 3



Ф и г. 4

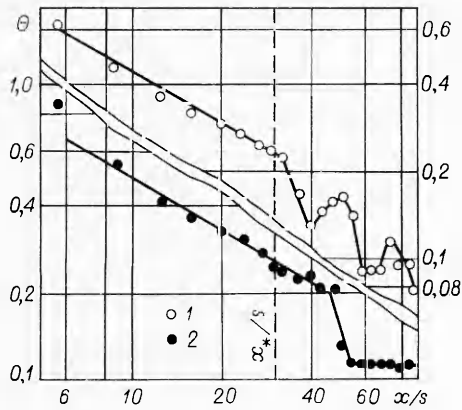
слоя, а далее в области «плато давления» изменяется незначительно (опытные точки 6 в сопле 30 — 6° и 2 — в сопле 30 — 15°). В тех режимах течения, где наблюдалось периодическое смещение начала области отрыва вдоль стенки (например, опытные точки 3 в сопле 30 — 15°), имело место колебательное изменение температуры T_w^* вдоль области отрыва.

Как видно из этого рассмотрения, равновесная температура стенки на режимах перерасширения может быть рассчитана по формуле (3) только до области сжатия пограничного слоя, а далее вдоль сопла ее поведение определяется характером взаимодействия скачков уплотнения с пограничным слоем.

Рассмотрим влияние газовой завесы на температуру теплоизолированной стенки сопла на режимах перерасширения. В проведенных экспериментах на входе в сопло через щель подавался «горячий» воздух, т. е. T_s было больше T_0 . Как и на расчетных режимах течения [3, 11], эффективность газовой завесы определялась в каждой точке сопла по разности адиабатической температуры стенки T_w (при наличии вдува) и равновесной температуры стенки T_w^* (при отсутствии вдува). В опытах эти температуры находились экспериментально. На фиг. 3 представлены первичные опытные данные для расчетного ($p_0 = 7,3 \text{ кг/см}^2$) и нерасчетного ($p_0 = 3,5 \text{ кг/см}^2$) режимов течения в сопле 30 — 6° при $T_0 = 17,2^\circ\text{C}$, $T_s = 85^\circ\text{C}$, $m = 0,19$. Сравним в каждом опыте температуру T_w с температурой T_w^* . На нерасчетном режиме разность между этими температурами (точки 3 и 4 соответственно) в зоне действия скачков заметно уменьшается вниз по течению, указывая на интенсивное перемешивание газа, подаваемого на завесу, с газом основного потока. При течении без скачков такого интенсивного перемешивания не происходит и разность температур стенки в условиях завесы (точки 1) и без завесы (точки 2) изменяется по длине сопла незначительно. Все это говорит о том, что скачки уплотнения ухудшают качество завесы.

Эффективность газовой завесы определяется выражением [3]

$$(4) \quad \Theta = (T_w - T_w^*) / (T_w - T_w^*)_1,$$

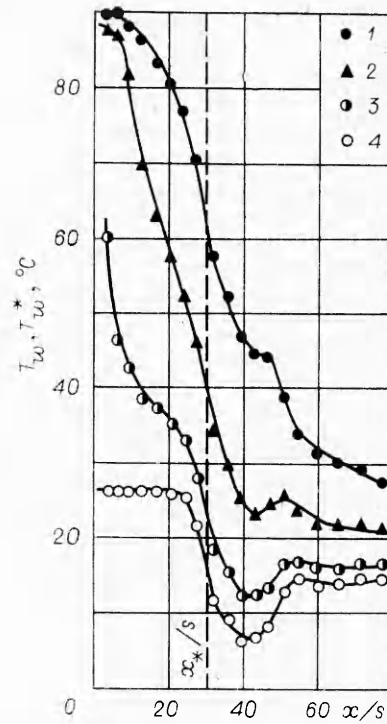


Ф и г. 5

(индекс 1 обозначает, что значения температур взяты в сечении среза щели). Так как вдув производится в дозвуковой части сопла, то $(T_w - T_w^*)_1 = T_s - T_0$. Изменение эффективности газовой завесы Θ для рассмотренных выше опытов показано на фиг. 4. Координата x отсчитывается вдоль образующей сопла от среза щели, x_* — ее значение в критическом сечении, s — высота щели, равная 2,7 мм. Из фиг. 4 видно, что в сверхзвуковой части скачки уплотнения привели к сильному снижению эффективности завесы (до 300% в конце сопла). Следует отметить, что для рассмотренного здесь безотрывного нерасчетного режима течения значения Θ в зоне воздействия скачков уплотнения непрерывно падают по длине сопла.

Для случаев, когда скачки уплотнения вызывают отрыв потока, изменение эффективности газовой завесы в зоне скачков несколько отличается от только что рассмотренного. На фиг. 5 представлены типичные опыты в сопле $30 - 15^\circ$ для двух режимов: 1 — $p_0 = 3,5 \text{ кг/см}^2$, $m = 0,17$ и 2 — $p_0 = 7,3 \text{ кг/см}^2$, $m = 0,2$ (давление и равновесная температура для этих опытов показана на фиг. 1 и 2 соответственно). В опыте 1, для которого характерна неустойчивая геометрия начала области сжатия пограничного слоя, наблюдается колебательное изменение Θ вдоль сверхзвуковой части сопла (скачок уплотнения расположен сразу за критическим сечением). В опыте же 2, в котором имеет место развитый отрыв потока от стенки, эффективность газовой завесы в области сжатия резко падает, а далее вниз по потоку изменяется незначительно. В экспериментах, аналогичных последнему, отличие значений Θ в соответствующих расчетном и нерасчетном режимах достигает в конце сопла 200%.

Таким образом, выражение (4) дает возможность оценить разрушающее влияние скачков уплотнения на газовую завесу. Однако существует и другое влияние скачков: сжатие пограничного слоя вызывает увеличение адиабатической температуры стенки. В случае, когда газовая завеса охлаждает стенку ($T_0 > T_s$), оба эти фактора приводят к нежелательному повышению T_w . Однако при нагреве стенки «горячим» вдуваемым газом ($T_s > T_0$) разрушение газовой завесы является нежелательным фактором, а повышение температуры в области сжатия — благоприятным фак-



Ф и г. 6

тором, так как способствует нагреву стенки. Если скачки уплотнения находятся на большом расстоянии от места вдува, где завеса уже сильно перемещалась, основное влияние на адиабатическую температуру стенки может оказать сжатие потока в скачке уплотнения. Именно это и можно наблюдать в некоторых наших опытах с «горячим» вдувом при малых параметрах вдува. Например, в нерасчетном режиме, представленном на фиг. 3, адиабатическая температура стенки (точки 3) в области действия скачков превышает соответствующие значения T_w в расчетном режиме, т. е. при отсутствии скачков (точки 1). Однако с ростом параметра вдува m влияние завесы становится преобладающим. Это показано на фиг. 6, где представлены опытные данные в сопле 30—6° при $p_0 = 3,5$ кг/см² и следующих значениях параметра вдува и температуры вдуваемого воздуха: 1 — $m = 0,66$, $T_s = 92,8^\circ\text{C}$, 2 — $0,32$; $92,6^\circ\text{C}$, 3 — $0,12$; $67,1^\circ\text{C}$, 4 — $m = 0$, $T_0 = 26,3^\circ\text{C}$. Видно, что при малых параметрах вдува адиабатическая температура стенки при завесе в зоне действия скачков может даже расти, а при больших параметрах вдува она все время падает.

Вычисления, однако, показывают, что эффективность газовой завесы, определенная по формуле (4), имеет для всех опытов одинаковый характер (как в опыте 2 на фиг. 4), т. е. Θ резко падает в области взаимодействия скачков уплотнения с пограничным слоем.

Таким образом, эффективность газовой завесы на режимах перерасширения может быть оценена следующим образом. От среза щели и до начала области сжатия, определенного по уравнению (2), расчет эффективности следует производить по методике для расчетного режима течения [3, 11]. Начиная от области сжатия пограничного слоя, эффективность завесы зависит от характера взаимодействия скачков уплотнения с пограничным слоем и в наших экспериментах уменьшается в 2—3 раза.

Поступила 10 VIII 1979

ЛИТЕРАТУРА

1. Бэк Л., Массье П., Каффел Р. Измерение теплообмена в сверхзвуковом сопле в зоне отрыва течения вследствие скачка уплотнения. — Ракетн. техника и космонавтика, 1968, № 5.
2. Барышев Ю. В., Леонтьев А. И., Рождественский В. И. Теплообмен в области взаимодействия скачка уплотнения с пограничным слоем. — В сб.: Теплообмен и физическая газодинамика. М., Наука, 1974.
3. Волчков Э. П., Козьменко В. К., Лебедев В. П. Экспериментальное исследование эффективности газовой завесы в сверхзвуковом осесимметричном сопле. — Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук, 1977, вып. 2, № 8.
4. Арнс М., Спиглер Е. Отрыв потока в перерасширенных реактивных соплах с коническим сверхзвуковым участком при взаимодействии скачка уплотнения с пограничным слоем. — Ракетн. техника и космонавтика, 1963, № 3.
5. Чжен П. Отрывные течения. Т. 1. М., Мир, 1972.
6. Колт С., Бедел Д. Л. Характеристики конического ракетного сопла при течении с отрывом от стенки. — Вопросы ракетн. техники, 1966, № 3.
7. Толманов А. И., Филатов В. В. Отрыв турбулентного пограничного слоя при взаимодействии его со скачком уплотнения в ускоряющемся сверхзвуковом потоке. — Учен. зап. ЦАГИ, 1973, т. 4, № 3.
8. Зеленков О. С., Юрков А. В. Экспериментальное исследование отрыва потока в перерасширенных конических соплах. — Учен. зап. ЛГУ, 1968, № 338.
9. Панов Ю. А., Швец А. И. Отрыв турбулентного пограничного слоя в сверхзвуковом потоке. — ПМ, 1966, т. 2, вып. 1.
10. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика. М., Наука, 1969.
11. Волчков Э. П., Козьменко В. К., Лебедев В. П. Экспериментальное исследование эффективности газовой завесы в сверхзвуковых соплах. — В сб.: Тепломассообмен. Т. 1. Конвективный тепломассообмен. Ч. 2. Минск, 1976.