

10. Годунов С. К., Забродин А. В. и др. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976.
11. Бриган А. Б. Формирование течения в плоском сопле ударной трубы.— Труды Ин-та механики МГУ, 1976, № 43.

УДК 629.7.024.36 : 533.6.011.34

ОСОБЕННОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ НЕДОРАСШИРЕННОЙ СТРУИ НА ПРИЛЕГАЮЩУЮ ПОВЕРХНОСТЬ

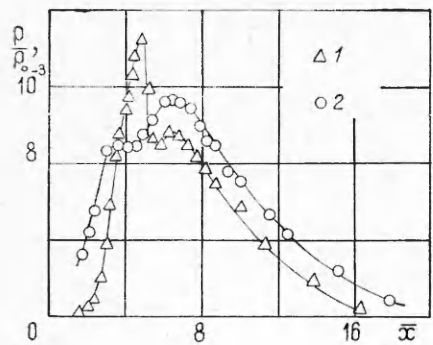
С. Н. Абросимов, Г. А. Поляков

(Ленинград)

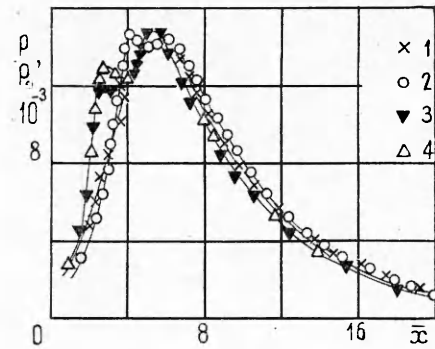
Взаимодействие недорасширенной струи с прилегающей поверхностью является наиболее характерной практической задачей. Различным ее аспектам посвящены работы [1—8]. Тем не менее эта задача до конца не решена, и любые вновь полученные результаты являются полезным дополнением к известным. В данной работе представлены результаты экспериментального исследования, которые в свою очередь являются логическим продолжением [9].

1. Как показали исследования [1—3], в общем случае в области взаимодействия струи с прилегающей поверхностью реализуется два «пика» давления. Первый, ближний к срезу сопла, обусловлен взаимодействием сжатого слоя, заключенного между висячим скачком и границей струи с поверхностью. Местоположение и величина первого максимума нагрузок зависят от интенсивности сжатого слоя, степени расширения сопла, его положения относительно рассматриваемой поверхности. Местоположение и величина второго максимума давлений обусловлены неравномерностью распределения параметров в поле течения невозмущенной части сверхзвуковой струи большой нерасчетности. При малых значениях нерасчетности истечения величина локальных нагрузок в области первого максимума может значительно превысить нагрузки, обусловленные неравномерностью распределения параметров в поле течения сверхзвуковой струи (фиг. 1, CO_2 ; $\xi = 1,0$; $\bar{h} = 6,88$; $\text{Re}_* = 1,6 \cdot 10^4$; $T_0 = 510 \text{ K}$; $I - n = 900$; $2 - n = 3000$). При больших значениях нерасчетности истечения ($n > 10^2 - 10^3$) интенсивность первого «пика» нагрузок не зависит от нерасчетности и определяется расходом рабочего тела через сопло (или числом Рейнольдса, определенным по параметрам в критическом сечении сопла Re_*). Для звукового сопла $\xi = d_a/d_* = 1,0$, расположенного на расстоянии $\bar{h} = h/r_a = 6,0$ от поверхности и нерасчетности истечения $n > 10^4$, с изменением чисел Рейнольдса Re_* от $2,5 \cdot 10^3$ до $1,9 \cdot 10^4$ характер распределения давлений на поверхности изменяется от распределения с одним максимумом при малых числах Re_* до распределения с ярко выраженными двумя максимумами при больших числах Re_* (фиг. 2, CO_2 ; $\xi = 1,0$; $\bar{h} = 6,0$; $n = 3 \cdot 10^4$; $T_0 = 650 \text{ K}$; $I - \text{Re}_* = 2,5 \cdot 10^3$; $2 - \text{Re}_* = 6,2 \cdot 10^3$; $3 - \text{Re}_* = 8,7 \cdot 10^3$; $4 - \text{Re}_* = 1,9 \cdot 10^4$). Причем с увеличением Re_* происходит смещение местоположения первого максимума нагрузок в сторону среза сопла с одновременным уменьшением его интенсивности. С увеличением степени расширения сопла ξ интенсивность первого максимума уменьшается и определяющими становятся нагрузки, обусловленные неравномерностью распределения параметров в поле течения.

2. Обычно для определения тепловых нагрузок в рассматриваемой области используются результаты решения уравнений пограничного слоя при сверхзвуковом обтекании поверхности равномерным потоком. При этом предполагается, что тепловой поток в рассматриваемой точке поверхности определяется местными параметрами и не зависит от предыстории течения. Для нахождения местных параметров применяют модель изэнтропического расширения по заданному профилю давления. Положение «псевдокритической» точки (точки растекания) предполагается совпада-



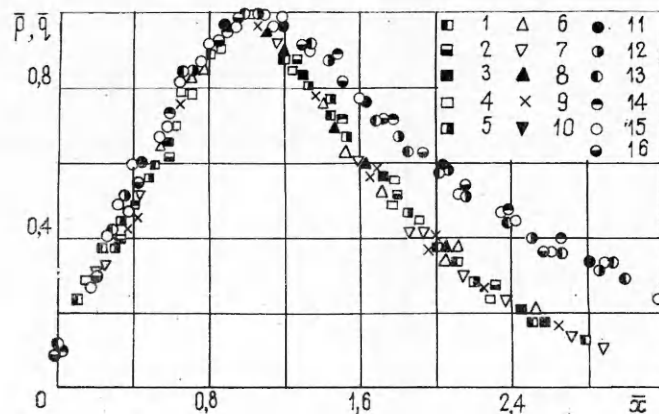
Фиг. 1



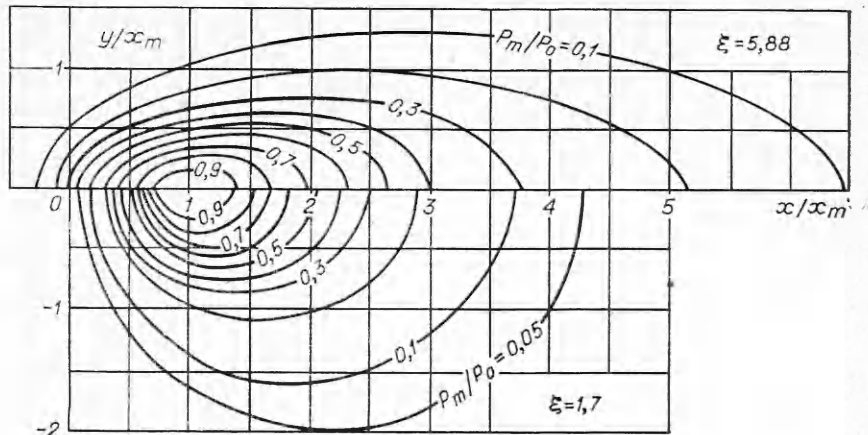
Фиг. 2

ющим с максимумом давления, а температура в этой точке равной температуре торможения. Таким образом, существующая расчетная схема является довольно громоздкой, содержит большое количество допущений, идеализирующих реальную физическую картину взаимодействия.

Вместе с тем современные газодинамические установки низкой плотности при использовании криогенной откачки позволяют реализовать массовые расходы рабочего тела до нескольких десятков грамм в секунду при остаточном давлении $1,33 \cdot 10^{-1} - 1,33 \cdot 10^{-2}$ Па. Это обеспечивает значения чисел Рейнольдса, определенных по параметрам в критическом сечении, до $Re_* \approx 10^5 - 10^6$. В связи с этим наиболее привлекательными с точки зрения простоты и достоверности конечного результата являются зависимости, аппроксимирующие характер и величины локальных нагрузок в широком диапазоне исходных параметров. Ряд результатов экспериментального исследования теплового воздействия струи на прилегающую поверхность представлен в работах [1, 6—8, 10]. В [5] для расчета распределения давлений вдоль линии растекания в области взаимодействия приведен универсальный профиль, обобщающий экспериментальные данные, полученные при использовании в качестве рабочего тела воздуха для различных чисел Маха на срезе сопла и отстояний оси сопла от поверхности. Местоположение максимума при этом определяется с помощью зависимости [4]. Вместе с этим установлено, что при одноименных условиях на срезе сопла и неизменном его положении относительно рассматриваемой поверхности области максимальных значений давлений и тепловых потоков совпадают. Этот результат получен сопоставлением профилей давлений и тепловых потоков на поверхности, снятых в условиях одного эксперимента датчиками давления и теплового потока. Применение метода термоиндикаторных покрытий для выявления зоны максималь-



Фиг. 3



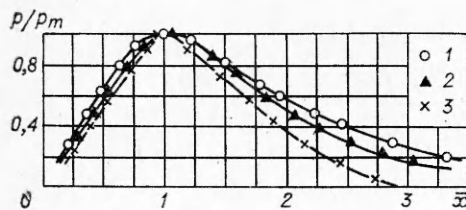
Ф и г. 4

ных значений тепловых потоков и сопоставление положения этой зоны с характером распределения давлений, замеренных вдоль линии растекания на поверхности, показало во всех случаях совпадение местоположения максимумов давлений и тепловых потоков. Этот результат проверен для сопел различной степени расширения и различных отстояний сопел от поверхности. Указанный факт не подтверждает результаты [10].

3. Представляет интерес информация о характере распределения локальных нагрузок не только вдоль линии растекания, но и во всей области взаимодействия сверхзвуковой струи большой нерасчетности с прилегающей поверхностью. Продольные профили давлений и тепловых потоков вдоль линии растекания и в параллельных ей сечениях обобщаются для различных отстояний оси сопла от поверхности и боковых смещений, если обработка проводится в координатах $\bar{p} = p/p_{\max}$, $\bar{q} = q/q_{\max}$ и $\bar{x} = x/x_{\max}$, где p_{\max} , q_{\max} — максимальные значения давлений и тепловых потоков в рассматриваемых продольных сечениях соответственно; x_{\max} — расстояние от плоскости среза сопла до максимума давлений и тепловых потоков в рассматриваемом продольном сечении (фиг. 3, N_2 ; $\xi = 1,3$; $Re_* = 5 \cdot 10^3$; $\bar{p}(1 - \bar{h} = 8,7; 2 - \bar{h} = 10,4; 3 - \bar{h} = 12,2; 4 - \bar{h} = 14,8; 5 - \bar{h} = 17,0)$; $\bar{q}(6 - \bar{h} = 7,4; 7 - \bar{h} = 8,26; 8 - \bar{h} = 9,13; 9 - \bar{h} = 10,0; 10 - \bar{h} = 10,8)$; CO_2 ; $\xi = 3,05$; $\bar{h} = 1,67$; $T_0 = 630$ К; $Re_* = 1,3 \cdot 10^4$; $11 - \bar{y} = 0$; $12 - \bar{y} = 0,42$; $13 - \bar{y} = 0,85$; $14 - \bar{y} = 1,27$; $15 - \bar{y} = 1,7$; $16 - \bar{y} = 2,12$). На этом основании для описания распределения локальных нагрузок во всей области взаимодействия сверхзвуковой струи большой нерасчетности с прилегающей поверхностью для сопла с заданной степенью расширения могут быть использованы поля равных значений локальных нагрузок, построенные в тех же обобщенных координатах для сопел различной степени расширения (фиг. 4, CO_2 ; $\xi = 5,88$; $Re_* = 0,8 \cdot 10^5$; $T_0 = 630$ К; $\xi = 1,7$; $Re_* = 0,3 \cdot 10^5$; $T_0 = 500$ К).

4. Как показали исследования, на взаимодействие струи с прилегающей поверхностью оказывают влияние геометрические характеристики сопла и его положение, теплофизические параметры рабочего тела. Полученные результаты позволяют дать краткий анализ характера влияния ряда исходных параметров на результаты взаимодействия.

С увеличением степени расширения сопла ξ «полнота» относительного профиля нагрузок возрастает (см. фиг. 3). Влияние отношения удельных теплоемкостей рабочего тела на относительный профиль нагрузок в области взаимодействия носит обратный характер. С увеличением $\gamma = c_p/c_v$ полнота относительного профиля давлений уменьшается (фиг. 5, $\xi = 3,05$; $\bar{h} = 1,84$; $T_0 = 500$ К; $1 - C_3H_8$; $Re_* = 1,2 \cdot 10^4$; $2 -$ воздух; $Re_* =$



Фиг. 5

точках на поверхности уменьшаются. Наиболее существенно изменяются нагрузки на прилегающей поверхности под соплом.

Вышеизложенные результаты позволяют построить поле локальных нагрузок в области взаимодействия сверхзвуковой струи с прилегающей поверхностью для сопел с любой степенью расширения и его удаленности от поверхности. При этом можно рекомендовать зависимости для местоположения и величин максимумов нагрузок [4, 5, 8, 9] и вышеприведенные результаты для определения полей нагрузок.

В заключение следует отметить, что, как и в работе [9], в данной работе не рассматривалось влияние кинетических процессов (неравновесности колебательных и вращательных степеней свободы, конденсации) и влияние разреженности в широком смысле их понятий. Более того, исходные параметры подбирались таким образом, чтобы указанные кинетические процессы не оказывали существенного влияния на характер взаимодействия.

Поступила 19 VI 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. Maddox A. R. Impingement of underexpanded plumes on adjacent surfaces.— J. of Spacecraft and Rockets, 1968, N 6. Рус. пер. Мэддокс. Взаимодействие недорасширенных струй с примыкающими поверхностями.— Ракет. техника и космонавтика, 1968, № 7.
2. Иванов М. Я., Назаров В. П. Численное решение задачи о «боковом» взаимодействии нерасчетных сверхзвуковых струй идеального газа с плоскостью и друг с другом.— ЖВММФ, 1974, т. 14, № 1.
3. Иванов М. Я., Назаров В. П. Исследование «бокового» взаимодействия сверхзвуковой недорасширенной струи идеального газа с поверхностями различной формы.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1974, № 6.
4. Лейтес Е. А. Исследование течения в области взаимодействия двух и четырех струй.— Труды ЦАГИ, 1974, вып. 1975.
5. Лейтес Е. А. Моделирование силового воздействия сильно недорасширенной струи на плоскую поверхность, параллельную ее оси.— Учен. зап. ЦАГИ, 1975, т. 6, № 1.
6. Вознесенский Э. Н., Немченко В. И. Взаимодействие сильно недорасширенной струи газа с пластиной.— В сб.: Аппот. IV Всесоюз. конф. по динамике разреженного газа. М., 1975.
7. Васильев А. А., Елизаров В. А. и др. Исследование теплового воздействия сильно недорасширенной струи на плоскую поверхность.— В сб.: Аппот. IV Всесоюз. конф. по динамике разреженного газа. М., 1975.
8. Абросимов С. Н., Поляков Г. А. Тепловые нагрузки от сверхзвуковой струи на плоскую поверхность, параллельную ее оси.— В кн.: Тезисы докл. Всесоюз. конф. по теплообмену и моделированию в энергетических установках. Ч. 3. Тула, 1979.
9. Абросимов С. П., Поляков Г. А. Локальные силовые нагрузки от сверхзвуковой недорасширенной струи на плоскую поверхность, параллельную ее оси.— ПМТФ, 1980, № 4.
10. Вознесенский Э. Н., Немченко В. И. Особенности растекания по преграде сильно недорасширенной струи низкой плотности.— В кн.: Тезисы докл. VI Всесоюз. конф. по динамике разреж. газов. Новосибирск, 1979.