

ЛИТЕРАТУРА

1. Белов И. А. Циркуляционное течение идеальной жидкости вблизи стенок. — ПМТФ, 1977, № 2.
2. Белоцерковский С. М., Ништ М. И. Отрывное и безотрывное обтекание тонких крыльев идеальной жидкостью. М., Наука, 1978.
3. Биркгоф Г., Сарантанелло Э. Струи, следы и каверны. М., Мир, 1964.

УДК 629.7.024.36 : 533.6.011.34

ЛОКАЛЬНЫЕ СИЛОВЫЕ НАГРУЗКИ ОТ СВЕРХЗВУКОВОЙ НЕДОРАСШИРЕННОЙ СТРУИ НА ПЛОСКУЮ ПОВЕРХНОСТЬ, ПАРАЛЛЕЛЬНУЮ ОСИ СТРУИ

С. Н. Абросимов, Г. А. Поляков

(Ленинград)

Проведено экспериментальное исследование силового воздействия струи большой нерасчетности ($n = 2 \cdot 10^1 - 8 \cdot 10^4$) на плоскую поверхность, отстоящую от оси сопла на расстояниях $\bar{h} = h/r_a = 2 - 10$, в области взаимодействия вдоль линии растекания при числах Рейнольдса $Re_* = 1,7 \cdot 10^3 - 2,1 \cdot 10^4$ (число Рейнольдса определено по параметрам в критическом сечении). В качестве рабочих тел использовались аргон, воздух и пропан, истекающие из конических сопел с полугорлом раствора выходной части $\theta_a = 10^\circ$ и отношением диаметров выходного и критического сечений $\xi = d_a/d_* = 1,0 - 4,8$. В результате исследования предложены простые эмпирические зависимости для определения местоположения 2-го максимума силовых нагрузок и его максимальной величины. Представлен универсальный профиль давлений вдоль линии растекания.

Взаимодействие сверхзвуковой недорасширенной струи с плоской поверхностью, параллельной ее оси, сопровождается образованием сложной ударно-волновой структуры с наличием большого числа газодинамических разрывов, областей дозвукового и сверхзвукового течений. Строгое аналитическое решение указанной задачи едва ли представляется возможным. В то же время решение таких задач осуществляется по двум направлениям, использующим численные [1-4] и приближенные методы [5-9].

Погрешности этих методов могут достигать значительных величин при достаточной трудоемкости вычислений. Вместе с тем в инженерной практике часто возникает необходимость в оперативных оценках величины силовых нагрузок на плоскую поверхность при взаимодействии с ней сверхзвуковой недорасширенной струи, параметры которой варьируются в широком диапазоне значений. В данной работе на основании результатов экспериментальных исследований получены простые зависимости для расчета силовых нагрузок вдоль линии растекания в области взаимодействия.

Экспериментальные исследования проводились в стационарном режиме на газодинамической трубе низкой плотности, оснащенной азотным криогенным насосом [10]. Остаточное давление в рабочем объеме вакуумной камеры в данных исследованиях варьировалось в диапазоне $1 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. ($1,33 \cdot 10^{-1} - 1,33$ Па) и измерялось преобразователем ПМТ-2 вакуумметра ВТ-3. Источником сверхзвуковых струй являлся подогревной ресивер со сменными коническими соплами, имеющими угол полураствора выходной части $\theta_a = 10^\circ$ и отношение диаметров выходного и критического сечений $\xi = d_a/d_* = 1,0; 1,3; 2,0; 3,25; 4,8$.

В качестве рабочих тел использовались аргон, воздух и пропан. Их массовый расход изменялся в диапазоне $0,07 - 0,75$ г/с. Давление торможения p_0 варьировалось в диапазоне $0,25$ кг/см² ($2,45 \cdot 10^4$ Па) — $2,1$ кг/см² ($2,06 \cdot 10^5$ Па), температура торможения $T_0 = 400 - 1000$ К, при этом число Рейнольдса, определенное по параметрам в критическом сечении

сопла, принимало значения $Re_* = 1,7 \cdot 10^3 - 2,1 \cdot 10^4$. Нерасчетность истечения в зависимости от рода газа, числа Маха на срезе сопла, параметров торможения и давления в вакуумной камере изменялась в пределах $n = 2 \cdot 10^1 - 7,8 \cdot 10^4$.

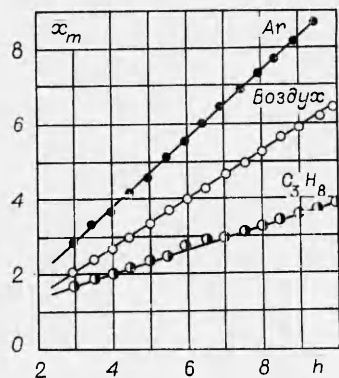
Основные результаты по местоположению максимума нагрузок при взаимодействии сверхзвуковой струи большой нерасчетности с прилегающей плоской поверхностью получены с использованием метода термоиндикаторных покрытий. Термоиндикатор плавления (ТИ-65, ТИ-120) расплавался тонким слоем по поверхности пластины из теплоизоляционного материала. Во всех экспериментах выполнялось условие $T_* < T_e$ (температура фазового перехода меньше температуры восстановления газа в пограничном слое). Подготовленная пластина размещалась с помощью координатного устройства на определенном расстоянии от оси сопла. Местоположение максимума нагрузок определялось по участку наиболее раннего плавления термоиндикаторного покрытия. Для удобства обработки результатов на поверхность пластины наносилась координатная сетка. Абсолютная погрешность измерений не превышала $\pm 1,0$ мм, что соответствовало $\pm (0,3 - 0,9)r_a$ в зависимости от геометрических характеристик сопла.

Исследование величин локальных силовых нагрузок в области взаимодействия проводилось с помощью термпарного датчика ПМТ-2 вакуумметра ВТ-3, протарированного по манометру Мак-Леода и U-образного дибутилфталатного манометра. Последний использовался для измерения давлений при малых отстояниях оси сопла от поверхности. Суммарная погрешность при измерениях не превышала 10%.

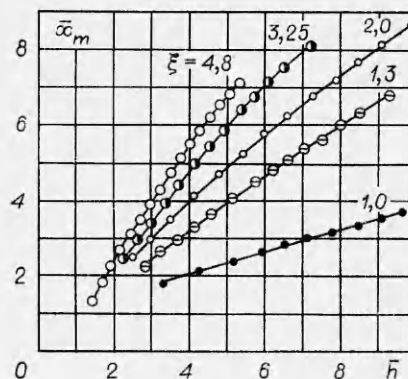
Как известно, при взаимодействии сверхзвуковой недорасширенной струи с прилегающей поверхностью могут реализоваться режимы, при которых наблюдаются два максимума локальных силовых нагрузок на поверхности. Первый, ближний к срезу сопла, обусловлен взаимодействием сжатого слоя с поверхностью, второй — неравномерностью расположения углов наклона линий тока и чисел Маха в поле струи. Положение второго максимума локальных силовых нагрузок при больших нерасчетностях не зависит от условий в окружающей среде и определяется характером распределения параметров в ядре струи. На распределение параметров в ядре струи влияют два основных фактора: род рабочего тела или отношение его теплоемкостей и геометрические характеристики сопла, из которого происходит истечение. На фиг. 1 ($p_0 = 0,2 - 0,4$ кг/см² = $1,96 \cdot 10^4 - 3,92 \cdot 10^4$ Па, $T_0 = 590 - 770$ К, $Re_* = 1,7 \cdot 10^3 - 3,2 \cdot 10^3$) представлены экспериментальные данные, отражающие зависимость положения второго максимума нагрузок от величины отстояния оси звукового сопла от поверхности для различных рабочих тел, а на фиг. 2 — для струи пропана и сопла с различным отношением диаметров выходного и критического сечений (C_3H_8 ; $p_0 = 0,25$ кг/см² = $2,45 \cdot 10^4$ Па, $T_0 = 650$ К, $Re_* = 3,2 \cdot 10^3$). С увеличением отношения диаметров выходного и критического сечений сопла $\xi = d_a/d_*$ при одинаковом отстоянии его оси от поверхности $\bar{h} = h/r_a$ (r_a — радиус выходного сечения сопла) величина расстояния до второго максимума нагрузок, отсчитанная от среза сопла, возрастает. Аналогичные результаты получены и для других рабочих тел (воздух, углекислый газ, аргон). Экспериментальные данные были аппроксимированы по методу наименьших квадратов в форме степенной зависимости с использованием программы «множественная линейная регрессия», реализованной на ЕС ЭВМ,

$$(1) \quad \bar{x}_m = 0,48 \gamma^{1,52} \xi^{0,37} \bar{h}^{1,1},$$

здесь $\gamma = c_p/c_v$ — отношение теплоемкостей рабочего тела; $\xi = d_a/d_*$ —



Ф и г. 1



Ф и г. 2

отношение диаметров выходного и критического сечений; $\bar{h} = h/r_a$ — относительное отстояние оси сопла от поверхности; $\bar{x} = x/r_a$ — относительная координата второго максимума нагрузок, отсчитанная от среза сопла.

В общем случае положение второго максимума нагрузок зависит от режима истечения из сопла и режима взаимодействия с пластиной. Характер распределения силовых нагрузок и его количественная сторона, в частности, зависят от проявления вязкостных эффектов в сопле (рост пограничного слоя в сопле и тем самым изменение действительных параметров на срезе), в области свободного расширения и при взаимодействии с поверхностью (на ударных волнах и в сжатом слое). С уменьшением числа Рейнольдса возрастают потери в ударно-волновой структуре, происходит размывание общей картины течения, изменение характеристик пограничного слоя на поверхности преграды. Проявление указанных эффектов (с уменьшением числа Рейнольдса Re_*) приводит к уменьшению величин второго максимума нагрузок и смещению его вниз по течению.

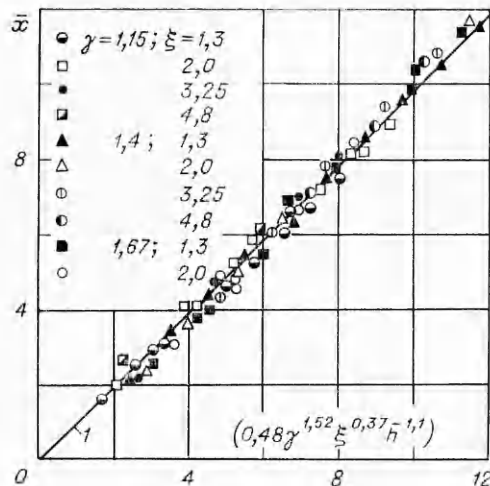
В диапазоне $Re_* = 10^3 - 2 \cdot 10^4$ влияние пограничного слоя на характеристики сопла незначительно и в зависимости от длины сопла не превышает 10%. В то же время в указанном диапазоне Re_* уже существенны описанные выше потери, обусловленные вязкой диссипацией, которые изменяют картину течения у плоской поверхности и вызывают изменение силовых нагрузок. С учетом пограничного слоя в сопле и режима взаимодействия с пластиной в диапазоне $Re_* = 10^3 - 2 \cdot 10^4$ зависимость (1) можно уточнить

$$(2) \quad \bar{x}_m = 1,578 \gamma^{1,52} \xi^{0,37} \bar{h}^{1,1} (\lg Re_*)^{-1}.$$

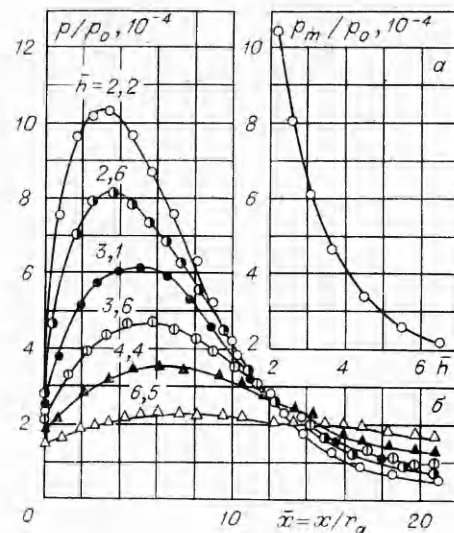
В диапазоне значений исходных данных $\xi = 1,3 - 4,8$; $1,10 - 1,67$ и $\bar{h} = 1,5 - 12,0$ относительная погрешность аппроксимации не превышает 12%. На фиг. 3 приведено обобщение экспериментальных данных в форме аппроксимирующей зависимости (1) ($Re_* = 10^3 - 2 \cdot 10^4$).

На фиг. 4 представлены результаты измерения давлений вдоль линии растекания по плоской поверхности для сверхзвукового сопла $\xi = 4,8$ при различных его отстояниях от поверхности ($Re_* = 2 \cdot 10^3$). При увеличении расстояния между осью струи и плоской поверхностью величины второго максимума давлений резко уменьшаются (фиг. 4, а), при этом падает и интенсивность разгона струйного течения от среза сопла, о чем свидетельствует пересечение профилей давлений (фиг. 4, б).

Зависимость максимальных давлений $\bar{p}_m = p_m/p_0$ в области взаимодействия от величины отстояния $\bar{h}$ для различной степени расширения



Фиг. 3



Фиг. 4

сопла ξ представлена на фиг. 5 ($Re_* = 1,7 \cdot 10^3$). Полученные данные были аппроксимированы степенной зависимостью в диапазоне $Re_* = 10^3 - 2 \cdot 10^4$

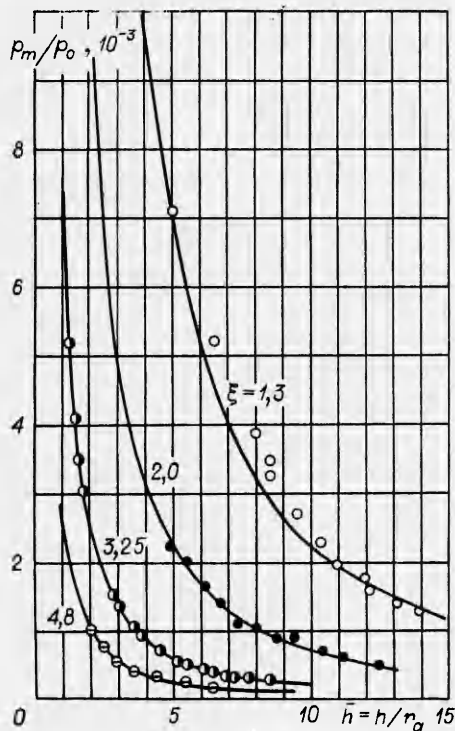
$$(3) \quad \bar{p}_m = 0,051 \xi^{-2,6} \bar{h}^{-1,6} Re_*^{0,17}.$$

Относительная погрешность аппроксимации не превышала 18%. На фиг. 5 проведено сравнение зависимости (3) (сплошные линии) с экспериментальными данными. Исследование распределения давлений вдоль линии растекания показало, что для одного и того же сопла продольные профили давлений для различных величин отстояния $\bar{h}$ обобщаются, если обработка проведена в координатах x/x_m и p/p_m , где x_m , p_m — характеристики максимума нагрузок, координата и давление соответственно; x , p — текущие значения координаты профиля и величины давления соответственно.

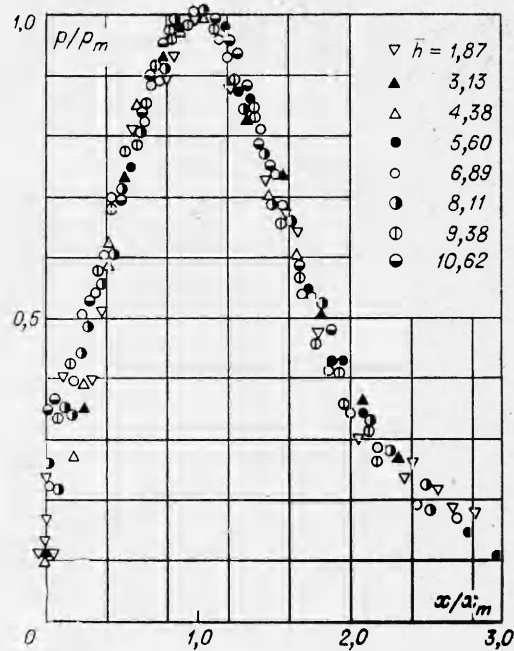
Обобщенный профиль давления вдоль линии растекания приведен на фиг. 6 (для сопла с отношением диаметров выходного и критического сечений $\xi = 2$, $Re_* = 2 \cdot 10^3$). Экспериментально установлено, что с возрастанием степени расширения сопла происходит увеличение полноты профиля нагрузок, построенного в координатах x/x_m и p/p_m , причем в интервале значений $\xi = 1,3 - 3,25$ для относительной координаты $x/x_m = 2$ это увеличение не превышает 10% от максимального значения p/p_m и для оценок распределения нагрузок вдоль линии растекания на поверхности могут быть использованы данные, приведенные на фиг. 6.

Таким образом, для определения величин локальных силовых нагрузок вдоль линии растекания в области взаимодействия сверхзвуковой струи большой нерасчетности с прилегающей плоской поверхностью, параллельной ее оси, необходимо:

- 1) определить с помощью зависимости (2) координату второго максимума нагрузок;
- 2) с помощью зависимости (3) определить величину максимума давлений на поверхности;
- 3) с помощью обобщенного профиля давлений вдоль линии растекания для сопла известной степени расширения построить профиль давления.



Ф и г. 5



Ф и г. 6

В заключение следует отметить, что в данной работе не исследовалось влияние неравновесности внутренних степеней свободы и конденсации на характер распределения нагрузок и их величины. При проявлении указанных эффектов они устранялись соответствующим подбором исходных параметров.

Поступила 11 IX 1979

ЛИТЕРАТУРА

1. Минайлов А. И. О расчете течения у затупленного тела вращения под углом атаки в сверхзвуковом потоке газа. — ЖВМФ, 1964, т. 4, № 1.
2. Численное исследование современных задач газовой динамики. Под ред. О. М. Белоцерковского. М., изд. ВЦ АН СССР, 1974.
3. Дубинская Н. В., Иванов М. Я. К расчету взаимодействия сверхзвуковой струи идеального газа с плоской преградой, перпендикулярной ее оси. — Учен. зап. ЦАГИ, 1975, т. 6, № 5.
4. Голомазов М. М., Зюзин А. П. Исследование взаимодействия струи, истекающей в вакуум, с преградой. — В сб.: Численные методы механики сплошной среды, 1976, т. 7, № 3.
5. Жохов В. А., Хомутский А. А. Атлас сверхзвуковых течений свободно расширяющегося идеального газа, истекающего из осесимметричного сопла. М., изд. ЦАГИ, 1970.
6. Аверенкова Г. И., Аспратов Э. А. и др. Сверхзвуковые струи идеального газа. М., изд. ВЦ. МГУ, 1970, ч. 1; 1971, ч. 2.
7. Roberts L. The action of a hypersonic jet on a dust layer. IAS Paper 63—50, 1963.
8. Ребров А. К., Чекарев С. Ф. Сферическое истечение вязкого теплопроводного газа в затопленное пространство. — ПМТФ, 1971, № 3.
9. Гусев В. Н., Жбакова А. В. Особенности сферического расширения вязкого газа в затопленное пространство. — Учен. зап. ЦАГИ, 1976, т. 7, № 4.
10. Абросимов С. Н., Щербаков Б. Ф. Об одном методе определения производительности газодинамических труб низкой плотности. — ПМТФ, 1977, № 6.

8 ПМТФ, № 4, 1980 г.