

5. Цикулин М. А. Ударные волны при движении в атмосфере крупных метеоритных тел. М., «Наука», 1969.
6. Коробейников В. П., Чушкин П. И., Шуршалов Л. В. О зоне наземных разрушений при воздушном взрыве крупного метеорита. Изв. АН СССР, МЖГ, 1974, № 3.
7. Петров Г. И., Стулов В. П. Движение больших тел в атмосферах планет. Космические исследования, 1975, № 4.
8. The effects of nuclear weapons. Washington, 1964. (Atomic energy comm.).

УДК 533.6.011.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ НА СТЕНКЕ СВЕРХЗВУКОВОГО СОПЛА ПРИ ОТРЫВЕ ПОТОКА

В. М. КУПЦОВ

(Москва)

В настоящее время известно много данных по пульсациям давления в зоне отрыва сверхзвукового потока перед препятствием (ступенькой, клином) (см., например, [1, 2]). Эти данные показывают, что уровни пульсаций давления в зонах отрыва существенно (в ~ 10 раз) выше, чем в случае присоединенного турбулентного пограничного слоя. Кроме этого, при отрыве возрастает относительный вклад в суммарный уровень пульсаций низкочастотных составляющих спектра.

В отличие от отрыва перед препятствием соответствующей информации для зон отрыва в сверхзвуковых соплах практически нет. Однако такая информация необходима, поскольку на практике возможны режимы течения, когда скачки уплотнения, а следовательно, и зоны отрыва располагаются внутри сверхзвуковой части сопла. В данной работе проведено экспериментальное исследование пульсаций давления на стенке конического сверхзвукового сопла в зоне отрыва потока. Получены данные по суммарным, спектральным и корреляционным характеристикам. Рассмотрено влияние температуры торможения на пульсации давления.

1. В качестве объекта исследования было взято неохлаждаемое копическое сопло с полууглом раскрытия $\theta=12.5^\circ$. Диаметр выходного сечения сопла $d_a=120$ мм. Число Маха на срезе сопла с учетом коэффициента расхода $M_a=4.1$. Подогрев осуществлялся за счет сжигания спирта в камере сгорания, установленной перед соплом. Эксперименты были проведены при различных значениях полного давления $6 < P_0 < 40$ атм (расчетное давление $P_0=174$ атм).

Были проведены измерения статического давления и пульсаций давления в различных точках сопла. Четыре пульсационных датчика 1–4 были установлены вдоль образующей сопла. Датчик 1 находился от среза сопла на относительном расстоянии $x=x_1/d_a=0.1$; датчик 2 – на $x=0.35$; датчик 3 – на $x=0.60$; датчик 4 – на $x=0.85$. Кроме этого в плоскости $x=0.1$ были установлены три датчика по окружности. Эти датчики были сдвинуты относительно датчика 1 соответственно на угол $\psi=45, 90$ и 180° . Для измерения пульсаций применялись емкостные датчики давления с диаметром чувствительного элемента $d_c=8$ мм. Датчики устанавливались заподлицо с внутренней поверхностью сопла. Регистрация и анализ пульсаций давления производились по методике, изложенной в работе [3].

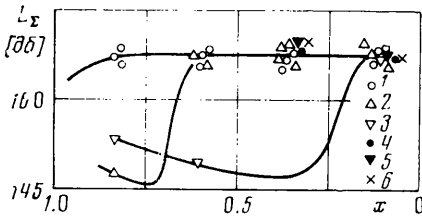
2. Результаты измерения статического давления p и суммарных уровней пульсаций давления L_x при различных значениях полного давления $p_0=P_0/p_n$ и температуры торможения T_0 изображены на фиг. 1 и 2. Здесь обозначено: 1 – $p_0=16$, $T_0=290^\circ$ К; 2 – $p_0=26$, $T_0=290^\circ$ К; 3 – $p_0=36$, $T_0=290^\circ$ К; 4 – $p_0=26$, $T_0=650^\circ$ К; 5 – $p_0=20$, $T_0=2000^\circ$ К; 6 – $p_0=15$, $T_0=1500^\circ$ К. Из фиг. 1 и 2 видно, что в зоне отрыва потока суммарные уровни пульсаций давления L_x практически не зависят от p_0 , T_0 и x находятся в пределах $166 \div 170$ дБ. На участках сопла до отрыва уровни пульсаций в 5–10 раз ниже, чем в зоне отрыва.

Из работ [1, 2] и др. следует, что для зон отрыва перед препятствием отношение суммарного уровня σ_x к скоростному напору в сверхзвуковом потоке перед отрывом q_∞ (σ_x/q_∞) $\approx 0.025 \div 0.05$. Результаты измерений показывают, что в зоне отрыва сопла отношение (σ_x/q_∞) $\approx 0.015 \div 0.025$, т. е. примерно в 2 раза меньше, чем в зонах отрыва перед препятствием. Более высокие уровни пульсаций в зонах отрыва перед препятствием объясняются, по-видимому, тем, что в эти зоны поступает со стороны точки прилипания сильно возмущенный поток.

3. Спектральный анализ показал, что на всех режимах, за исключением $p_0=7 \div 10$, во всех точках зоны отрыва спектра гладкие, сплошные. Однако при $p_0=9 \div 10$

в спектрах пульсаций наблюдается дискретная составляющая, уровень которой превышает уровни сплошной составляющей в полосе 1 гц на $20 \div 25$ дб.

Было найдено, что при $p_0 > 10$ форма спектра зависит от относительного расстояния $l = l_s/r_s$ между точкой измерения и началом отрыва, где r_s — радиус сечения, в котором происходит отрыв. На фиг. 3 представлены спектры при двух значениях l : при $l \approx 0$ (обозначения 1, 2 и 3) и при $l \approx 1.0$ (обозначения 4 и 5). Здесь 1 — $x=0.1$; 2 — $x=0.35$; 3 — $x=0.85$; 4 — $x=0.35$; 5 — $x=0.60$. На фиг. 3 по оси ординат отложена разность $\Delta L = L_1 - L_{\Delta f}$ в децибелах, где L_1 — среднеквадратичный уровень пульсаций в полосе 1 гц, $L_{\Delta f}$ — среднеквадратичный уровень в полосе $\Delta f = 200 \div 7000$ гц, а по оси абсцисс — число Струхала $Sh = (fd_a)/a_n$, где a_n — скорость звука



Фиг. 1



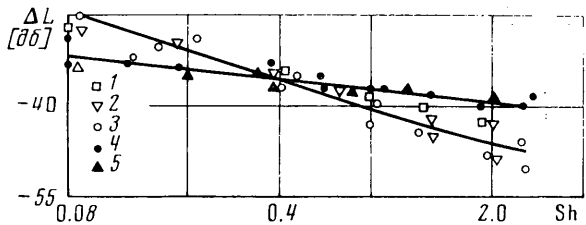
Фиг. 2

в окружающей среде. Из фиг. 3 видно, что все спектры при $l = \text{const}$ достаточно хорошо согласуются между собой, несмотря на то что они получены при различных p_0 и в различных точках сопла. Из рассмотрения фиг. 3 также следует, что при удалении от точки отрыва спектры становятся более пологими. Так, если вблизи точки отрыва при изменении безразмерной частоты Sh от 0.08 до 2 спектральный уровень уменьшается на 20 дб, то вдали от точки отрыва — всего на $5 \div 7$ дб. Вблизи точки отрыва большой вклад в пульсации вносит низкочастотные составляющие. Следует заметить, что аналогичные результаты по изменению формы спектра пульсаций в зависимости от расстояния от точки отрыва были получены в работе [1] для зон отрыва перед препятствием.

Как указывалось выше, при $p_0 = 7 \div 10$ в спектрах пульсаций наблюдается дискретная составляющая. При таких низких p_0 длина зоны отрыва $x = 5$. Поэтому в этом случае все пульсационные датчики находились внутри зоны отрыва. Дискретная составляющая была обнаружена во всех точках зоны отрыва, а также вне сопла в окружающей атмосфере. Частоты дискретной составляющей $f_g = 2000$ гц при $p_0 = 7.0$, а при $p_0 = 9.0$ $f_g = 1800$ гц. По этим частотам были определены числа Струхала струи. В работе [3] приведены данные по числам Струхала для свободных сверхзвуковых струй. Сравнение показало, что числа Струхала, измеренные в данных экспериментах, совпадают с соответствующими числами для свободных сверхзвуковых струй.

Проведенный корреляционный анализ показал, что дискретная составляющая в зоне отрыва сопла антисимметрична, т. е. в противоположных по отношению к оси точках сопла фазы колебаний на частоте дискретной составляющей смещены на 180° . Исходя из этого факта и отмеченного выше факта совпадения частот f_g для зон отрыва и свободных струй, можно предположить, что механизм образования дискретной составляющей при отрыве потока в сопле тот же, что и при безотрывном истечении сверхзвуковых струй, т. е. обусловлен наличием обратной акустической связи по внешней среде.

Измерения показали, что при $p_0 = 9.0$ во всех точках, где стояли пульсационные датчики, иначе говоря, по всей длине зоны отрыва уровень дискретной составля-

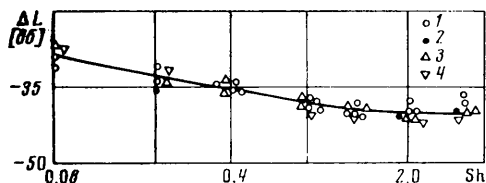


Фиг. 3

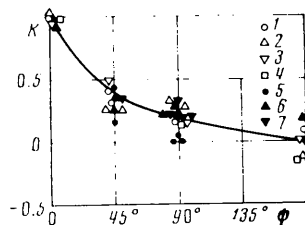
щей $L_g = 145 \div 148$ дб. Следует заметить, что этот уровень был выше уровня дискретной составляющей во внешней среде вблизи выходного сечения сопла на $4 \div 5$ дб.

На фиг. 4 представлены данные по спектрам пульсаций давления при различных температурах T_0 для $l \approx 1.0$. Здесь обозначено: 1 — $T_0 = 290^\circ \text{K}$; 2 — $T_0 = 1000^\circ \text{K}$; 3 — $T_0 = 1290^\circ \text{K}$; 4 — $T_0 = 1500^\circ \text{K}$. Из фиг. 4 видно, что температура торможения T_0 в диапазоне $290 \div 1500^\circ \text{K}$ не влияет на спектры сплошной составляющей. Что же касается дискретной составляющей, то, как показали эксперименты, при увеличении T_0 частота этой составляющей увеличивается, а ее уровень уменьшается.

4. Корреляционный анализ был проведен между различными точками на разных частотах. Для анализа были использованы $1/3$ -октавные полосовые фильтры. Корреляционный анализ показал, что на частоте дискретной составляющей пульсации



Фиг. 4



Фиг. 5

давления на стенке сопла в продольном направлении достаточно хорошо скоррелированы. Коэффициент корреляции достигает нуля только при взаимном удалении точек друг от друга на расстоянии $\Delta x_1 = 90$ мм ($\Delta x_1/r_s = 3.0$).

На фиг. 5 приведены зависимости поперечного коэффициента корреляции K от угла ψ в поперечном сечении $x = 0.1$ для сплошной составляющей спектра. Здесь обозначено: 1 — $f = 315$ гц, $p_0 = 21$; 2 — $f = 500$ гц, $p_0 = 21$; 3 — $f = 1000$ гц, $p_0 = 21$; 4 — $f = 2000$ гц, $p_0 = 21$; 5 — $f = 315$, $p_0 = 9 \div 11$; 6 — $f = 500$ гц, $p_0 = 9 \div 11$; 7 — $f = 1000$ гц, $p_0 = 9 \div 11$. Видно, что коэффициент K слабо зависит от p_0 и частоты f ($315 < f < 2000$ гц). Можно считать, что корреляция имеет место лишь внутри дуги окружности с углом $\Delta\psi = 45^\circ$; при больших $\Delta\psi$ коэффициент $K \approx 0$. Анализ результатов измерения продольного коэффициента корреляции K показал, что его величина сильно зависит от частоты f . Было установлено, что высокие значения продольного коэффициента корреляции K соответствуют высоким спектральным уровням L_1 . Как K , так и L_1 имеют высокие значения при низких частотах вблизи линии отрыва. Так, при $f = 315$ гц между точкой отрыва и другими точками высокая корреляция сохраняется на длине $(1.5 \div 2)r_s$, в то время как в конце зоны отрыва (вблизи выходного сечения сопла) корреляция отсутствует даже на расстояниях $\Delta x_1 \approx 0.5r_s$.

Наибольшие пульсационные нагрузки на сопло создает дискретная составляющая. На основе полученных результатов были проведены оценки поперечной пульсационной силы, возбуждаемой этой составляющей. Эти оценки показали, что среднеквадратичный уровень поперечной силы может составлять 0.3% от величины тяги.

Поступила 17 III 1975

ЛИТЕРАТУРА

1. Raman K. R. Surface pressure fluctuations in hypersonic turbulent boundary layers. AIAA Paper, 1973, No. 997.
2. Speaker W. V., Ailman C. M. Static and fluctuating pressure in regions of separated flow. AIAA Paper, 1966, No. 456.
3. Ануфриев В. М., Комаров В. В., Кунцов В. М., Мельников Д. А., Сергиенко А. А. Дискретная составляющая в спектре шума сверхзвуковых струй. Изв. АН СССР, МЖГ, 1969, № 5.