

где p_j — давление в струе на срезе сопла; γ_j — отношение удельных теплоемкостей для струи; M_j — число Маха струи на срезе сопла. При $n=1$ нерасчетность струи по отношению к давлению в отрывной области у внешней границы может достигать величин порядка 100–150. В реальных условиях при $n \ll 1$ в кольцевой струе может наступить отрыв по внутренней обечайке сопла, в результате которого может быть рассогласование между расчетными и реальными течениями.

Поступила 12 V 1978

ЛИТЕРАТУРА

1. Балакин В. Б., Буланов В. В. Численное решение задачи о взаимодействии ударной волны с цилиндром в сверхзвуковом потоке. Инж.-физ. ж., 1971, т. 21, № 6.
2. Ляхов В. Н. Сглаживание и искусственная вязкость при расчетах двумерных нестационарных течений с разрывами. В сб.: «Численные методы механики сплошной среды», т. 5, № 3, Новосибирск, ВЦ СО АН СССР, 1974.

УДК 533.6.011.5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕЧЕНИЯ В ПОЛОСТЯХ, ОБТЕКАЕМЫХ СВЕРХЗВУКОВЫМ ПОТОКОМ

А. Н. АНТОНОВ, С. П. ШАЛАЕВ

(Москва)

Проведено экспериментальное исследование течения и пульсаций давления в цилиндрических полостях, открытых навстречу сверхзвуковому потоку и установленных под нулевым углом атаки (направление оси полости и направление потока совпадают).

Этой теме посвящены работы [1–4], в которых исследуются нестационарные течения в полостях и выемках. В [1] рассмотрены глубокие цилиндрические полости, оси которых расположены под углом к набегающему потоку. При этом в полости наблюдаются большие по уровню пульсации давления и в течение некоторого времени происходит рост температуры. Влияние Re на характер обтекания осесимметричных тел с неглубокой выемкой в носовой части указано в [2]. На основе фотографий течения с малой выдержкой показано различие картин обтекания при низких и высоких числах Re (нерегулярность выбрасывания массы газа из выемки при низких числах Re). Некоторые частотные характеристики в полых цилиндрах разной длины, открытых навстречу сверхзвуковому потоку, при числе Маха набегающего потока $M=6$ рассмотрены в [4]. Расчеты течений в выемках на носовой части тел при натекании на них сверхзвукового потока выполнены в [3].

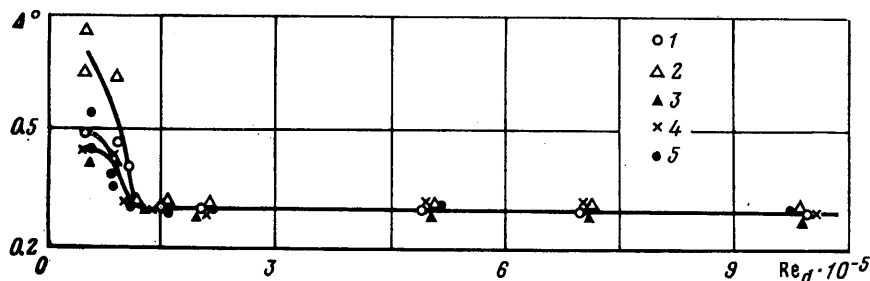
В настоящей работе приведены данные по картине течения, характеру колебаний скачка уплотнения, частотные и амплитудные характеристики пульсаций давления в полостях цилиндров различной глубины. Исследовано влияние Re и глубины полости на характеристики течения.

1. Экспериментальные исследования проводились в сверхзвуковой аэродинамической трубе в диапазоне чисел Маха набегающего потока $M_n=1.5-6$, $Re=2.5 \cdot 10^4-10^6$, $T_0/T_w=1 \div 2$. Здесь Re — число Рейнольдса, вычисленное по диаметру цилиндра d и параметрам набегающего потока, T_0 — температура торможения потока, T_w — температура стенки.

Модели представляли собой полые цилиндры, закрытые с одного конца. Цилиндр располагался в потоке таким образом, что получался стакан, открытый навстречу потоку, причем направление оси цилиндра совпадало с направлением вектора скорости потока. Относительная глубина полости цилиндра $l^0=l/d$ менялась от 0 до 2.5, внешний диаметр равнялся $d=10$ и 50 мм. Толщина стенок цилиндра 0.5–1 мм. Цилиндры выполнялись из стальных или стеклянных трубок, а их днища были стальные или текстолитовые. Стеклянные трубки с текстолитовыми днищами использовались для исключения оттока тепла от газового потока в трубку. На дне цилиндров размещались дренажные отверстия, с помощью которых измерялось распределение давления, а также датчики пульсаций емкостного типа для получения данных по среднеквадратичному уровню и частоте пульсаций давления воздуха

в цилиндре. Температура газа вблизи дна полости измерялась хромелькопелевыми термопарами. Для получения разницы температуры воздуха в набегающем потоке T_0 и в полости цилиндра использовались две одинаковые термопары. Одна термопара находилась в полости вблизи ее дна, а другая была выведена за ударную волну, возникающую перед цилиндром так, чтобы скачок уплотнения от этой термопары не попадал в отверстие цилиндра. Перед проведением эксперимента термопары тарировались.

Изучение течения в окрестности цилиндра проводилось с помощью теневой фотографии, выполняемой с выдержкой 10^{-6} сек. В ходе исследования проводилась



Фиг. 1

также визуализация течения. Для фиксирования частоты колебаний скачка уплотнения и волн сжатия использовалась дисковая развертка [4], щель которой устанавливалась по оси цилиндра. Так как амплитуда колебаний ударной волны была невелика, то при получении фотографий и применении развертки изображение увеличивалось в 2.5–5 раз. Это позволило измерить не только частоту пульсаций скачка уплотнения, но и получить данные на оси цилиндра по амплитуде колебаний скачка уплотнения Δ' и среднему отходу ударной волны Δ от среза цилиндра.

Сигнал от датчиков пульсаций давления записывался на магнитофон М-168. Анализ и обработка этого сигнала велась с помощью аппаратуры фирмы «Брюль и Кьер». Спектральные характеристики снимались в полосе $\Delta f = 10$ гц, а суммарные уровни в диапазоне частот $f = 50 - 20\,000$ гц; точность измерения уровня пульсаций давления составляла 2 дб.

2. Рассмотрим влияние Re и относительной глубины полости на течение в окрестности и внутри цилиндрической полости.

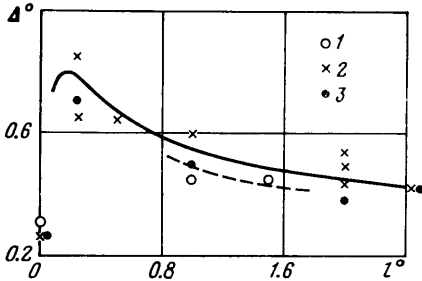
Картины обтекания в окрестности цилиндра существенно отличаются при $Re > 10^5$ и $Re < 10^5$. Чтобы показать это, исследуем для примера влияние Re на средний отход ударной волны. Результаты исследования картин течения показывают, что ударная волна перед цилиндром колеблется около своего среднего положения $-\Delta$. На фиг. 1 представлена зависимость $\Delta^\circ = \Delta/d$ от Re для $M_n = 3.7$. Здесь данные 1–5 соответствуют $l^\circ = 1, 0.25, 2.5, 0.5, 2$. Можно видеть, что число Рейнольдса при $Re = 10^5 - 10^6$ не влияет на Δ° . Однако при $Re \leq 10^5$ имеет место сильное влияние этого параметра. Аналогичные результаты получены при $M_n = 2$ и 2.9.

Рассмотрим случай $Re > 10^5$. С помощью краски, нанесенной на внутреннюю поверхность цилиндра и растекающейся под действием потока воздуха, были получены расположения линий тока в полостях. Особенно подробно такие исследования выполнены на относительно больших моделях ($d = 50$ мм), на которых с помощью точечных нанесений краски удалось проследить направления линий тока и построить по ним картину обтекания.

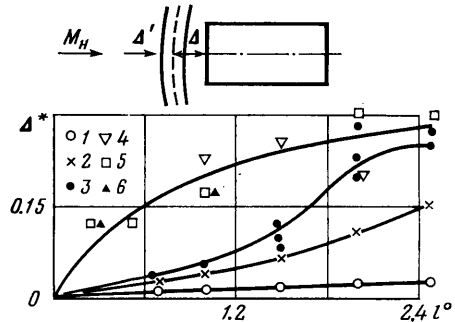
Интересно отметить, что при $l^\circ < 0.5$ в цилиндре наблюдается устойчивое симметричное течение с низкими скоростями потока у стенки (на последнее указывает слабое растекание краски при этих значениях l°). Критическая точка находится в центре дна цилиндра, поток от нее симметрично растекается к периферии. При $l^\circ \geq 0.5$ симметричная картина обтекания теряет устойчивость и критическая точка ($l^\circ = 0.5 - 2.5$; $M_n = 2 - 6$) смещается в сторону от центра, и в цилиндре, например, при $l^\circ = 0.8$ образуется трехмерный торообразный вихрь. По-видимому, даже незначительный угол атаки, который всегда имеет место в экспериментах и который не влияет при $l^\circ < 0.4 - 0.5$, достаточен для потери устойчивости симметричного относительно оси цилиндра течения при $l^\circ \geq 0.5$. При $l^\circ < 0.4 - 0.5$ воздух, входящий в полость, вытекает из цилиндра равномерно по периферии, а при $l^\circ \geq 0.5$ он покидает полость цилиндра в основном с одного края. При этом вблизи этого края цилиндра наблюдается искажение головной ударной волны, которая теряет симметричность и искривляется в сторону потока.

Эксперименты показывают, что при $Re > 10^5$ средний отход ударной волны от среза цилиндра не зависит от параметра l° и сохраняется постоянным для данного M_n при различных Re и T_0/T_w . Температура воздуха в полости в течение эксперимента при $Re > 10^5$ и $l^\circ > 0.3$ возрастает за 5–10 сек примерно на $\Delta T = 4^\circ$, а затем остается постоянной. Этот эффект можно объяснить волновыми процессами, возникающими в полости [1]. Длина цилиндра $l^\circ = 0.3$ –2.5 практически не влияет на величину прироста ΔT .

Рассмотрим теперь экспериментальные результаты, полученные при $Re < 10^5$. Если при $Re > 10^5$ искривление фронта ударной волны за счет несимметричного вытекания воздуха из полости невелико, то для $Re < 10^5$ это искривление носит особенно яркий характер и имеет место как при $l^\circ > 0.5$, так и при $l^\circ = 0.2$ –0.5. Отметим, что при $Re < 10^5$ в диапазоне $l^\circ = 0.3$ –2.5 наблюдается сильное влияние длины цилиндра l° на средний отход ударной волны Δ° (фиг. 2). Здесь точки 1 приведены для



Фиг. 2



Фиг. 3

$M_n = 2.9$ и $Re = 9 \cdot 10^4$, 2 – для $M_n = 3.7$ и $Re = 5 \cdot 10^4$, 3 – для $M_n = 3.7$ и $Re = 7.5 \cdot 10^4$. При уменьшении l° от 2.5 до 0.3 происходит рост параметра Δ° , который при $l^\circ = 0.3$ достигает значения 0.8. Числа M_n и Re при этом незначительно влияют на зависимость Δ° от l° . Температура воздуха в полости при $Re < 10^5$ в течение эксперимента возрастает более энергично, чем при $Re > 10^5$, и за 10–15 сек, например, для $M_n = 3.7$, $l^\circ = 2.5$, $d = 10$ мм ($Re = 5 \cdot 10^4$) достигает значения $\Delta T = 13^\circ$. Эти данные показывают, что при $Re < 10^5$ в цилиндре происходят относительно более энергичные пульсационные процессы, чем при $Re > 10^5$.

3. Выделим следующие безразмерные параметры, которые могут влиять на безразмерную частоту и относительную амплитуду колебаний в цилиндре: M_n , Re , T_0/T_w , l° . В результате проведенного исследования было определено влияние каждого параметра на число $Sh = f_* S a_0^{-1}$. Здесь f_* – частота дискретного тона колебаний давления в полости цилиндра, a_0 – скорость звука при температуре торможения T_0 , $S = (l + \Delta)$ – характерная длина [3]. Параметры менялись в следующих пределах: $M_n = 1.5$ –6, $Re = 2.5 \cdot 10^4$ – 10^6 , $T_0/T_w = 1$ –2, $l^\circ = 0.25$ –2.5.

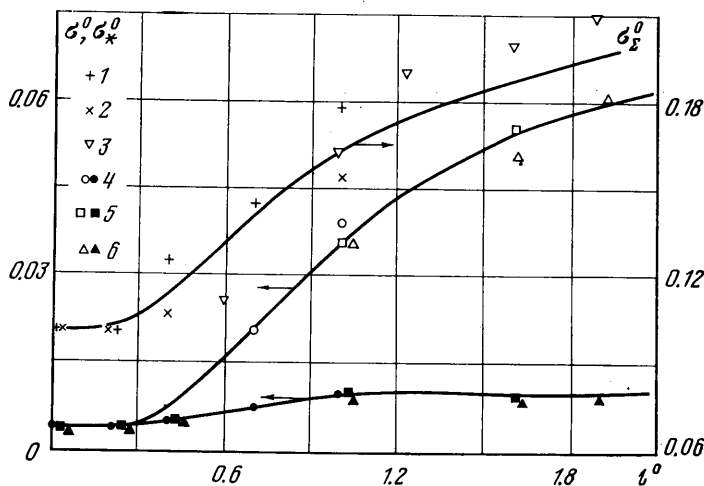
Эксперименты показали, что Sh не меняется при изменении указанных параметров и равно $Sh \approx 0.25$. Интересно отметить, что Re в окрестности $Re = 10^5$ не оказывает влияния на Sh . Если в качестве характерного размера в числе Sh принять l , то наблюдается значительное изменение числа Sh при небольших l° . Таким образом, выбранный размер S и скорость a_0 являются характерными для получения резонансных характеристик полости при натекании на нее сверхзвукового потока в широких пределах изменения параметров M_n , Re , T_0/T_w , l° .

Относительная амплитуда пульсаций давления $\Delta p/p$, зависящая также от M_n , Re , T_0/T_w , l° , тесно связана с амплитудой пульсаций скачка уплотнения перед срезом цилиндра $\Delta^* = \Delta'/d$. Эксперименты показывают, что при $Re > 10^5$ параметр Δ^* практически не зависит от Re и T_0/T_w . Влияние длины l° при $Re > 10^5$ указано на фиг. 3. Здесь 1–3 – для $M_n = 2.1$, 2.9, 3.7 соответственно. Можно видеть, что с увеличением l° происходит рост Δ^* , причем увеличение M_n приводит к росту амплитуды пульсаций, которая при $M_n = 3.7$ и $l^\circ = 2.5$ достигает значений $\Delta^* = 0.25$.

При уменьшении Re в окрестности $Re = 10^5$ происходит резкое нарастание среднего отхода ударной волны и изменение амплитуды пульсаций. На фиг. 3 приведены данные по амплитуде пульсаций скачка уплотнения в зависимости от относительной длины цилиндра при $Re < 10^5$. Здесь 4 – для $M_n = 2.9$ и $Re = 9 \cdot 10^4$, 5 – для $M_n = 3.7$ и $Re = 5 \cdot 10^4$, 6 – для $M_n = 3.7$ и $Re = 7.5 \cdot 10^4$. С увеличением l° происходит рост амплитуды пульсаций, причем более энергичный, чем при $Re > 10^5$. Числа M_n и Re не влияют на амплитуду пульсаций.

Для значений $Re > 10^5$ были измерены уровни шума на дне цилиндра. На фиг. 4 приведено влияние длины цилиндра на среднеквадратичные суммарные значения пульсаций давления $\sigma_{\Sigma}^0 = \sigma_{\Sigma}/P_0'$. Здесь P_0' — полное давление за прямым скачком уплотнения, точки 1-3 соответствуют: $M_n=1.5$ и $Re=4 \cdot 10^5$, $M_n=2$ и $Re=6.4 \cdot 10^5$, $M_n=6$ и $Re=1.1 \cdot 10^6$. Данные для $M_n=6$ взяты из работы [4] и получены при $T_0/T_w=1.7$. Значения σ_{Σ}^0 для точек 1, 2 измерены при $T_0/T_w=1$.

Можно видеть, что с ростом l^0 происходит увеличение σ_{Σ}^0 , причем параметры M_n , Re и T_0/T_w не оказывают влияния на пульсации давления. На фиг. 4 при $T_0/T_w=1$ точками 4-6 представлены относительные значения среднеквадратичных



Фиг. 4

пульсаций давления дискретной составляющей в спектре шума на днище цилиндра $\sigma_*^0 = \sigma_*/P_0'$ (белые точки), а также значения белого шума на частотах, близких к частотам дискретной составляющей $\sigma^0 = \sigma/P_0'$ (черные точки). Здесь 4 — для $M_n=1.5$, $Re=4 \cdot 10^5$, 5 — для $M_n=2$, $Re=6.4 \cdot 10^5$, 6 — для $M_n=3$, $Re=7 \cdot 10^5$. С ростом l^0 значения σ_*^0 и σ^0 увеличиваются; параметры M_n , Re практически не оказывают влияния на уровни дискретной составляющей и белого шума. Результаты, представленные на фиг. 4, показывают, что относительные среднеквадратичные значения σ_{Σ}^0 , σ^0 , σ_*^0 образуют универсальные зависимости, которые можно использовать для получения уровней пульсаций давления вблизи дна цилиндрических полостей для различных M_n , $Re (Re > 10^5)$, T_0/T_w и l^0 .

Поступила 28 VI 1978

ЛИТЕРАТУРА

1. Елисеев Ю. Б., Черкез А. Я. Об эффекте повышения температуры торможения при обтекании газом глубоких полостей. Изв. АН СССР, МЖГ, 1971, № 3.
2. Шустов В. И. Экспериментальное исследование влияния числа Re на характер обтекания осесимметричных тел с выемкой в носовой части. Уч. зап. ЦАГИ, 1973, т. 4, № 3.
3. Гилинский М. М., Лебедев М. Г. Исследование сверхзвукового обтекания вогнутых тел идеальным газом. Научн. тр. ин-та механ. МГУ, 1976, № 44.
4. Антонов А. Н., Грецов В. К., Шалаев С. П. Нестационарное сверхзвуковое обтекание тел с установленной впереди иглой. Изв. АН СССР, МЖГ, 1976, № 5.
5. Антонов А. Н., Грецов В. К. Экспериментальное исследование характеристик нестационарных отрывных зон, возникающих в сверхзвуковом потоке на игле со щитком. Изв. АН СССР, МЖГ, 1977, № 4.