

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОЛНОГО ДАВЛЕНИЯ В ГИПЕРЗВУКОВОЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЕ С КОНИЧЕСКИМИ И ПРОФИЛИРОВАННЫМИ СОПЛАМИ

МЕЖИРОВ И. И., ЧИСТОВ Ю. И.

Измерены экспериментальные значения коэффициента восстановления полного давления  $\gamma$  газового потока, вытекающего из осесимметричных конических и профилированных гиперзвуковых сопел в расположенный за ними цилиндрический канал при диаметре канала, равном или большем выходного диаметра сопла, а также при наличии в тракте камеры Эйфеля при числах  $M=4,83-12,4$  в изэнтропическом ядре.

Показано, что значения  $\gamma$  незначительно (на  $\sim 5\%$ ) отличаются от соответствующей величины для прямого скачка уплотнения при числе  $M_\phi$ , определяемом для одномерного течения отношением площади цилиндрического канала к площади критического сечения сопла.

В работе [1] теоретически показано, что коэффициент восстановления полного давления  $\gamma$  газового потока, вытекающего из гиперзвукового сопла в расположенный за ним цилиндрический канал, не зависит от толщины пограничного слоя на стенках сопла и режима течения в нем (числа  $Re$ ) и равен коэффициенту восстановления в прямом скачке уплотнения при  $M=M_\phi$ , где  $M_\phi$  — число  $M$  «фиктивного» потока, определяемое для одномерного течения отношением диаметра канала к диаметру критического сечения сопла. Это правило остается справедливым и в том случае, когда диаметр канала превышает диаметр выходного сечения сопла.

В работе [2] теория [1] была подтверждена опытами, проведенными с несколькими профилированными осесимметричными гиперзвуковыми соплами, обеспечивающими однородный газовый поток в выходном характеристическом ромбе.

В настоящей работе эти данные существенно дополнены результатами систематических исследований серии конических гиперзвуковых сопел (полный диапазон изменения числа  $M_n$  в изэнтропическом ядре всех сопел составляет  $4,83-12,4$ ) при диаметре выходного сечения сопла, равном или меньшем диаметра цилиндрического канала. Ряд экспериментов проведен при наличии камеры Эйфеля между соплом и цилиндрическим участком выхлопного канала.

1. Исследования проводились в гиперзвуковой аэродинамической трубе периодического действия. Рабочий газ — воздух.

Газ, подогретый в омическом подогревателе (максимальная температура  $1100\text{ K}$ ), поступает в форкамеру, а отсюда в коническое гиперзвуковое сопло с полууглом раскрытия  $\alpha/2=6^\circ$  или в профилированное сменное сопло, обеспечивающее на выходе однородный газовый поток. Конструкция конического сопла позволяла использовать два размера выходного сечения:  $D_c=150\text{ мм}$  (сопло № 1) и  $D_c=100\text{ мм}$  (сопло № 2). Изменение чисел  $M$  на выходе из конических сопел достигалось за счет смены вставок в районе критического сечения. Было использовано восемь вставок с диаметрами критического сечения  $d_*=3,0; 4,2; 6,0; 6,5; 8,4; 10,9; 15; 20\text{ мм}$ . Все профилированные сопла имели диаметр выходного сечения  $150\text{ мм}$ .

За соплами располагался либо цилиндрический канал диаметром  $150\text{ мм}$ , либо тот же канал в комбинации с камерой Эйфеля ( $370 \times 370 \times 400\text{ мм}$ ). Длина канала была равна  $11,3-17$  калибрам. За цилиндрическим каналом устанавливался конический диффузор, из которого воздух поступал в систему эжекторов, обеспечивающую перепад давления, достаточный для запуска аэродинамической трубы.

При экспериментах измерялись давление и температура воздуха в форкамере ( $p_0, T_0$ ), распределение полного давления за прямым скачком уплотнения  $p_0'$  на срезе сопла, распределение полного давления  $p_{01}$  в конце цилиндрического канала. Кроме того, измерялось статическое давление  $p$  в рабочей части трубы, по резкому падению которого фиксировался момент запуска сопла. Все измерения проводились при минимальном превышении давления  $p_0$  над давлением запуска.

Распределения давления  $p_0'$  и  $p_{01}$  измерялись единичными насадками, которые с заданным небольшим шагом перемещались во время запуска по диаметру канала. Величины давлений  $p_0, p_0'$  и  $p_{01}$  регистрировались шеститочечным самопишущим прибором класса 0,25. Температура газа в форкамере измерялась с помощью трехточечной гребенки термопар.

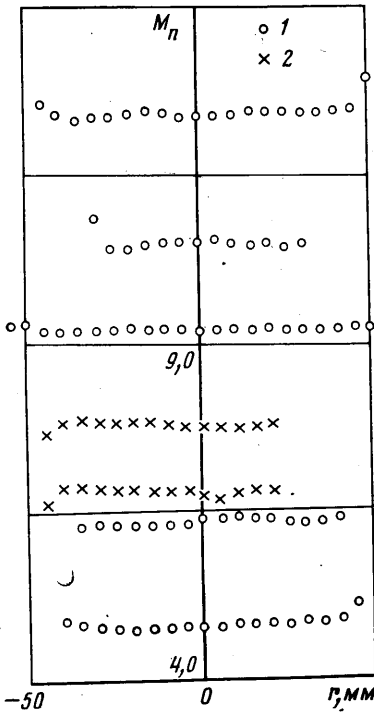
В работе приведены данные по 16 коническим и 6 профилированным гиперзвуковым соплам. Основные геометрические и газодинамические характеристики исследованных сопел приведены в таблице. Здесь  $d_*$  — диаметр критического сечения сопла,  $D_c$  — диаметр выходного сечения сопла,  $M_a$  — число  $M$ , вычисленное по отношению площади выхода сопла  $A$  к площади критического сечения  $A_*$ ,  $A_n$  — площадь изэнтропического ядра потока на выходе из сопла, определенного по измеренному значению  $M_n$  в ядре потока,  $M_\phi$  — «фиктивное» число  $M$ , вычисленное по отношению площади цилиндрического канала к площади критического сечения сопла. В случае цилиндрического канала, диаметр которого равен выходному диаметру сопла,  $M_\phi=M_a$ .

В таблице приведены также экспериментальные значения давления  $p_0$  и температуры  $T_0$  в форкамере трубы.

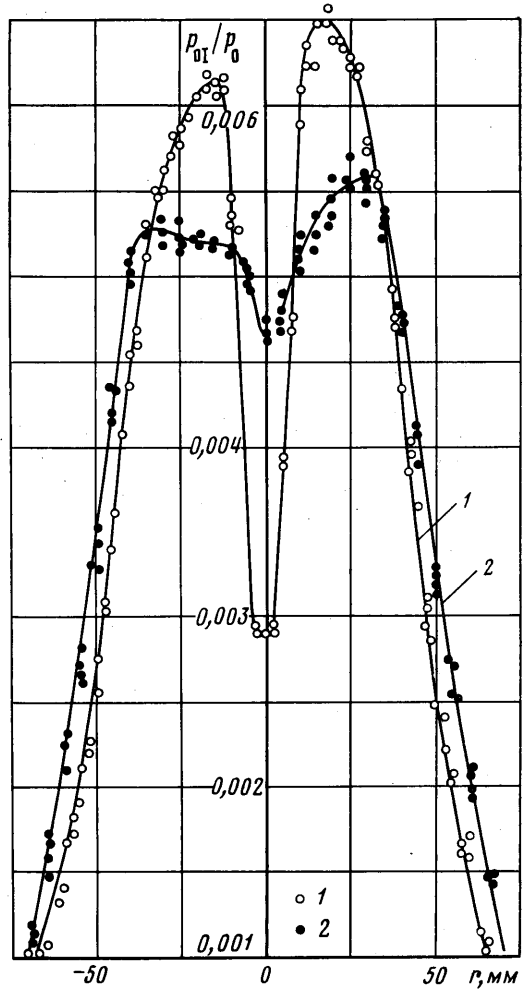
Укажем, что экспериментальные данные для конического сопла с  $d_* = 3,0$  мм при диаметре выхода  $D_c = 150$  мм получены при температуре торможения, несколько меньшей по сравнению с температурой, потребной для предотвращения равновесной конденсации воздуха ( $M_n = 12,4$ ).

При обработке результатов эксперимента воздух предполагался совершенным газом с показателем адиабаты  $\kappa = 1,4$ .

2. На фиг. 1 приведены распределения чисел  $M_n$  в выходных сечениях нескольких конических и профилированных сопел, рассчитанные по измеренным значениям отношения  $p_{01}/p_0$ . Точки 1 соответствуют коническим соплам, точки 2 — профилированным. Реализован диапазон чисел  $M_n = 4,83 - 12,4$ , причем в пределах изэнтропического ядра течение близко к однородному. Анализ полей чисел  $M_n$  показывает, что относительная площадь вытеснения пограничного слоя на срезе сопла ( $1 - A_n/A$ ) составляла от 13 до 50% площади выходного сечения сопла (см. таблицу).



Фиг. 1

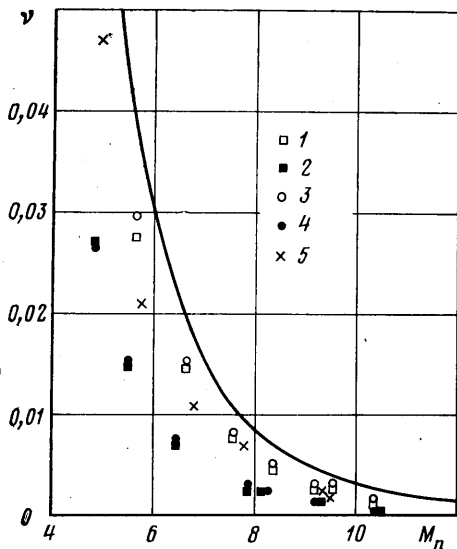


Фиг. 2

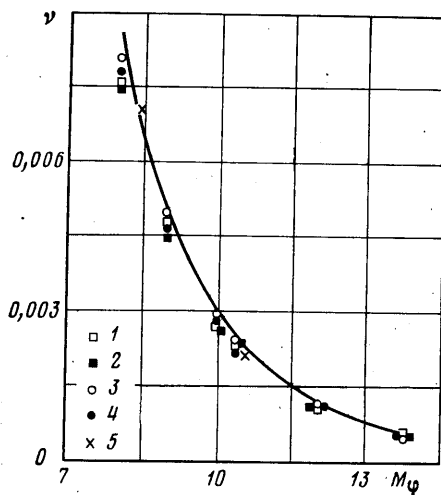
На фиг. 2 приведены распределения отношения полного давления  $p_{01}$  к давлению  $p_0$  по радиусу цилиндрического канала при диаметре канала 150 и 100 мм (соответственно кривые и точки 1 и 2). Измерения проведены непосредственно после запуска установки. Значения коэффициента восстановления полного давления  $\nu$  вычислялись по формуле

$$\nu = \int_0^1 \frac{p_{01}}{p_0} d(r^2)$$

В приведенной формуле  $r$  — отношение текущего радиуса к радиусу канала. Возможность такого способа осреднения полного давления обосновывается в работах [3-5].



Фиг. 3



Фиг. 4

На фиг. 3 экспериментальные значения  $\gamma$  построены в зависимости от числа  $M_n$  в ядре потока. Здесь и ниже точки 1 и 2 соответствуют данным, полученным при наличии камеры Эйфеля с  $D_c=150$  и 100 мм, точки 3 и 4 — для цилиндрических каналов с  $D_c=150$  и 100 мм, точки 5 — для профилированных сопел. Там же имеется кривая коэффициента восстановления полного давления в прямом скачке уплотнения при  $M=M_n$ . Видно, что опытные данные для разных сопел не коррелируются зависимостью  $\gamma=f(M_n)$  и не соответствуют расчетной кривой.

На фиг. 4 экспериментальные и расчетные данные построены в виде зависимости  $\gamma=f(M_\phi)$ . Опытные точки, полученные как в гладком цилиндрическом канале,

$d_*$ , мм	$M_a$	$A/A_*$	$M_n$	$A_n/A_*$	$A_n/A$	$M_\phi$	$p_0 \cdot 10^{-5}$	$T_0$ , К
------------	-------	---------	-------	-----------	---------	----------	---------------------	-----------

Конические сопла № 1,  $D_c=150$  мм

20,0	6,07	55,88	5,65	41,25	0,74	6,07	5,8	450
15,0	6,94	100,2	6,60	80,32	0,80	6,94	10,25	570
10,9	7,99	189	7,60	150,6	0,796	7,99	15	720
8,4	8,95	318,8	8,35	231,3	0,725	8,95	20,6	870
6,5	9,99	533	9,22	366,2	0,68	9,99	26	970
6,0	10,34	627,6	9,52	425,3	0,68	10,34	26	970
4,2	12	1276	10,42	651	0,51	12	31	990
3,0	13,8	2505	12,4	1494	0,59	13,8	37,6	1000

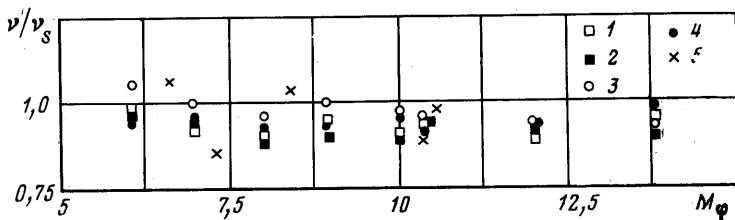
Конические сопла № 2,  $D_c=100$  мм

20,0	5,0	25	4,83	21,79	0,87	6,07	5,75	350
15,0	5,75	44,40	5,52	37,43	0,84	6,94	10,5	450
10,9	6,67	84,13	6,40	70,23	0,83	7,99	15,25	550
8,4	7,49	141	7,12	112,3	0,80	8,95	20,75	650
6,5	8,39	236,5	7,85	174,4	0,74	9,99	25,8	800
6,0	8,69	276,6	8,15	207,0	0,75	10,34	25,6	800
4,2	10,12	567	9,30	381,2	0,67	12	30,6	1000
3,0	11,66	1112	10,52	681,1	0,61	13,8	37,8	1000

Профилированные сопла,  $D_c=150$  мм

27,60	5,22	29,6	4,9	23,7	0,78	5,22	5,75	450
18,82	6,59	63,5	5,75	44,4	0,70	6,59	10,9	540
13,47	7,29	124	6,8	91,59	0,733	7,29	13	660
9,79	8,38	235	7,8	169,4	0,718	8,38	8,75	830
6,0	10,32	625	9,35	390,9	0,622	10,32	29,2	1050
5,7	10,56	692	9,5	535,9	0,595	10,56	46	990

так и в ступенчатом канале, при наличии камеры Эйфеля и без нее удовлетворительно согласуются с расчетной кривой  $v_s(M_\phi)$ , где  $v_s$  — коэффициент восстановления полного давления в прямом скачке уплотнения при  $M=M_\phi$ . Можно заметить, что экспериментальные точки в большинстве случаев располагаются несколько ниже расчетной кривой. Для оценки величины расхождения на фиг. 5 представлена зависимость  $v/v_s=f(M_\phi)$ . Видно, что величина  $v/v_s$  практически не зависит от  $M_\phi$ . В рассмотренном диапазоне чисел  $M_\phi$  отклонение от расчета лежит в пределах 5%, т. е. средние экспериментальные значения коэффициента восстановления полного



Фиг. 5

давления составляет около 0,95 от расчетных величин. Эта небольшая разница обусловлена, вероятно, силами трения на стенках канала.

Из данных работы [2] следует, что правило, сформулированное в [1], удовлетворительно выполняется уже при  $M_\phi \approx 3,7$  ( $M_n=3$ ).

Приведенные данные можно рассматривать в целом как убедительное доказательство справедливости теории, изложенной в работе [1].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Межиров И. И. О потерях полного давления в гиперзвуковой аэродинамической трубе. — Инж. ж., 1965, т. 5, № 2, с. 243–248.
2. Межиров И. И., Чистов Ю. И. Исследование восстановления полного давления в потоке за гиперзвуковыми соплами. — Уч. зап. ЦАГИ, 1984, т. 12, № 2, с. 110–113.
3. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1976. 888 с.
4. Лыжин О. В., Межиров И. И. Об осреднении полного давления неравномерного газового потока. — Уч. зап. ЦАГИ, 1980, т. 11, № 3, с. 60–65.
5. Гродзовский Г. Л. Осреднение параметров течения при испытании элементов турбомашин. — Уч. зап. ЦАГИ, 1980, т. 11, № 3, с. 51–59.

Москва

Поступила в редакцию  
6.VII.1982

УДК 532.546

### О СВЯЗИ ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТОВ ТЕНЗОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ И ПРОНИЦАЕМОСТИ ПОРИСТЫХ СРЕД

КРЕЧЕТОВА Т. Н., РОММ Е. С.

Зависимость фильтрационных свойств горных пород от условий их нагружения является одним из наименее изученных вопросов в общей проблеме связи физических свойств пористых систем и действующими на эти системы нагрузками. Выполненные к настоящему времени экспериментальные [1] и теоретические [2, 3] исследования касаются главным образом зависимости коэффициента проницаемости пород-коллекторов нефти и газа от испытываемого этими породами всестороннего (гидростатического) сжатия. В данной работе установлена связь между параметрами неравномерного разноосного нагружения породы и тензором ее проницаемости.

1. Рассмотрим модель пористой среды, обладающую определенными геометрическими и упругими свойствами. Будем полагать, что поровое пространство модели состоит из пустот двух типов: щелевидных каналов (трещин) и гидродинамически связанных с ними сферических полостей, радиус которых много больше раскрытия трещин. Пусть далее трещины в модели группируются в системы с параметрами, зависящими в общем случае от ориентировки системы в пространстве, которая определяется единичным вектором нормали к плоскости трещины. Системой будем называть совокупность равностоящих друг от друга трещин с одинаковыми значениями раскрытия. Если поровый объем модели заполнен жидкостью, внутри которой существует градиент давления  $V_p$ , то истинная скорость движения жидкости в трещинах