

УДК 532.525.2:533.6.011.72

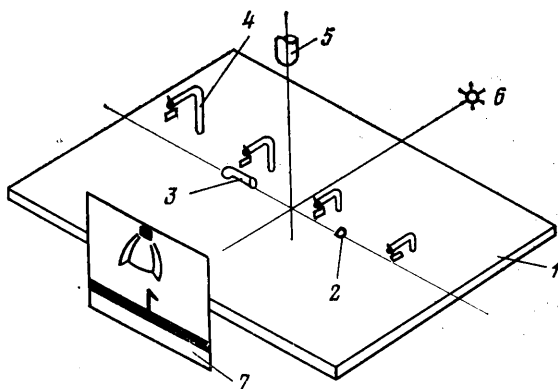
ВЛИЯНИЕ ВЯЗКОСТИ НА ТЕЧЕНИЕ В ЦИРКУЛЯЦИОННОЙ ЗОНЕ ПЕРЕД ПЛОСКОЙ ПРЕГРАДОЙ, ПЕРПЕНДИКУЛЯРНОЙ ОСИ СВЕРХЗВУКОВОЙ НЕДОРАСШИРЕННОЙ СТРУИ

СОКОЛОВ Е. И., ШАТАЛОВ И. В.

Натекание сверхзвуковой струи на преграду сопровождается при определенной комбинации газодинамических и геометрических параметров образованием перед нею центральной циркуляционной зоны. Впервые такие течения были обнаружены опытным путем в струях большой плотности и описаны в [1-2], в [3] указан диапазон параметров, в котором эти течения существуют. В настоящее время на основе модели идеального газа проведены численные расчеты струй с циркуляционными зонами (например, [4]), для приосевой области ударного слоя предложено их аналитическое описание [5]. В то же время принципиально важным как для трактовки имеющихся результатов, так и для создания новых расчетных методов является вопрос о степени влияния вязкости на течение с циркуляционной зоной. Какие-либо систематические опытные данные или теоретические оценки, позволяющие дать ответ на него, отсутствуют.

Ниже приводятся результаты серии экспериментов по исследованию течения перед преградой высокочувствительными флюгерными зондами, в которой с целью непосредственного изучения влияния вязкости на процесс взаимодействия характерное число Рейнольдса струи варьировалось в широких пределах за счет изменения давления торможения, а нерасчетность струи и удаление преграды от сопла оставались неизменными. Указанные параметры назначались так, чтобы в соответствии с рекомендациями [3] гарантировать существование циркуляционной зоны перед преградой в струях большой плотности.

1. Экспериментальные исследования струй, взаимодействующих с преградами, проводились в барокамере объемом 15 м^3 , внутри которой на координатнике монтировалась плоская преграда 1 размером $250 \times 350 \text{ мм}$ (фиг. 1). В преграде имеется дренажное отверстие 2 диаметром 1 мм, в этой плоскости расположен и приемник полного напора 3 того же диаметра. Параллельно плоскости замера давлений с шагом 40 мм расположен ряд Г-образных держателей 4 флюгерных зондов. Каждый зонд представляет собой плоскость размером $1 \times 2 \text{ мм}$, частично сбалансированную противовесом. Для уменьшения влияния трения зонды монтируются на шлифованные оси сечением 0,2 мм на рубиновых камнях. В экспериментах использовалось 4-5 зондов, установленных на расстоянии 3, 6, 9, 12 и 16 мм от преграды в плоскости симметрии (фиг. 1). При выбранной форме и расположении держателей течение в плоскости симметрии не возмущается и зонды не затекают друг друга.



Фиг. 1

Конструкция зонда гарантирует его чувствительность к направлению потока с полным давлением вплоть до 20 Па, но в то же время является достаточно прочной для измерений в потоках большой плотности. Изображения зондов, преграды и сопла 5 с помощью точечного источника света 6, установленного перед иллюминатором барокамеры, проектировались на полупрозрачный экран 7, расположенный вне барокамеры с противоположной стороны. В ходе эксперимента преграда перемещалась координатником в продольном направлении со скоростью 37,5 мм/мин с одновременной регистрацией видимых на экране положений зондов. В одном режиме регистрировалось 120–140 положений, что позволило достаточно полно судить о поле направлений скоростей в исследуемой области, где при перемещении преграды всегда находился только один зонд. Координатник обеспечивал установку и перемещение преграды в трех взаимно перпендикулярных направлениях с точностью 0,01 мм.

№ сопла	γ	d_* , мм	$p_0 \cdot 10^5$, Па,	n	$Re_* \cdot 10^4$	Re_l	Re_s	n/r_a	Количество режимов
1	7/5	0,9	9,8–0,098	1000	11,7–0,117	2700–27	900–9	111	7
1	5/3	0,9	9,8–0,2	1000	11,8–0,24	2600–53	2560–50	111	7
2	7/5	2,83	4,9–0,012	80	21,5–0,01	17600–8,6	28000–4	27	8
3	5/3	4,2	4,9–0,004	53	27,4–0,02	26300–22	39000–32	25	11
4	7/5	5	4,9–0,002	44	38–0,02	41800–17	13000–5,4	20	52

Одновременно с фиксацией поля направлений датчиками ДМИ велось непрерывное измерение полного напора и статического давления. Тарировка датчиков проводилась по наклонному спиртовому и U-образному дибутылфталатному манометрам и периодически повторялась. Характеристики датчиков были стабильны и линейны в диапазоне 20–2·10⁴ Па.

Для создания струи в описываемых экспериментах были использованы сопла с коротким цилиндрическим выходом ($M_a=1$) и докритической частью, профилированной гладко сопряженными дугами окружностей. Рабочим газом служили воздух и аргон при температуре 17–22° С, которая контролировалась датчиком температуры прибора ВА-7-27А/1. Давление в ресивере p_0 (т. е. давление торможения струи) измерялось в зависимости от его уровня образцовыми стрелочными манометром или вакуумметром и U-образным дибутылфталатным манометром. Давление в барокамере p_∞ также измерялось U-образным манометром, а при малых значениях — вакуумметром ВТ-3 с лампой ПМТ-2, тарированной по манометру Мак-Леода. Погрешность измерения давлений максимальна для p_∞ и не превышала 7%.

Наблюдение волновой структуры в разреженных струях проводилось визуально при подсвечивании их тлеющим разрядом. Структура плотных струй наблюдалась непосредственно на экране 7.

Диапазон газодинамических и геометрических параметров, охваченных в экспериментах, приводится в таблице. Истекающие струи характеризуются нерасчетностью $n=p_a/p_\infty$ и числом $Re_l=Re_*(p_0/p_\infty)^{-1/2}$, которое показывает степень разреженности свободной струи. Согласно [6], при $Re_l > 100$ поток в области свободного расширения первой бочки струи можно считать изэнтропическим, а волновую структуру — близкой к структуре струи идеального газа. Число Рейнольдса Re_* вычисляется по параметрам в критическом сечении сопла и температуре торможения

$$Re_* = \rho_* a_* d_* / \mu(T_0) = [2/(\gamma+1)]^{(\gamma+1)/2(\gamma-1)} \rho_0 a_0 d_* / \mu(T_0)$$

$$\rho_0 a_0 = [\gamma(RT_0)^{-1}]^{1/2} p_0$$

Для количественного описания течения в ударном слое перед преградой введем число Re_s :

$$Re_s = \rho_s w_s \Delta / \mu(T_s) = \rho_c w_c \Delta / \mu(T_0) = Re_* q(M_c) q^{-1/2}(M_a) \Delta / d_*$$

Здесь индексы c и s приписаны параметрам на оси непосредственно перед и за центральным скачком, образующимся в струе на расстоянии Δ от преграды, $q(M)$ — расходная функция числа M , остальные обозначения — общепринятые. Число Re_s аналогично числу Рейнольдса Re_0 , которое является параметром подобия течений около затупленных тел в равномерном гиперзвуковом потоке для переходной области обтекания и вычисляется по характерному размеру тела и температуре T_0 [7].

Реализованные в экспериментах значения параметра Re_s приведены в таблице. Необходимый для расчета Re_s отход скачка Δ определялся при известных γ , M_s , n и расстоянии до преграды h по эмпирической формуле Б. Г. Семилетенко и В. Н. Ускова (см., например, [3]), величина M_s определялась из численных расчетов струй, истекающих в вакуум.

Характерные числа Рейнольдса Re_l и Re_s пропорциональны величине Re_* . Тем самым изменение Re_* за счет изменения p_0 позволило провести прямое исследование влияния вязкости на течение в ударном слое. Постоянство нерасчетности обеспечилось при этом регулированием давления p_∞ путем напуска в барокамеру соответствующего газа.

2. Эволюцию течения перед преградой при уменьшении Re_s рассмотрим на примере серии экспериментов со струями, истекающими из сопла № 4. На фиг. 2 приведены поля направлений вектора скорости, на фиг. 3 в том же линейном масштабе построены эпюры относительных избыточных давлений $P = (p - p_\infty) / p_0$. Сплошные кривые на фиг. 3 отвечают статическому давлению, штриховые — полному напору, замеряемому приемником, направленным к центральной точке растекания, штрихпунктирные — полному напору, замеряемому в противоположном направлении, координата $Y = y/r_s$ отсчитывается вдоль преграды от центральной точки торможения. Соответствующие параметры указаны ниже. Вариантам $a - e$ на фиг. 2, 3 соответствуют значения

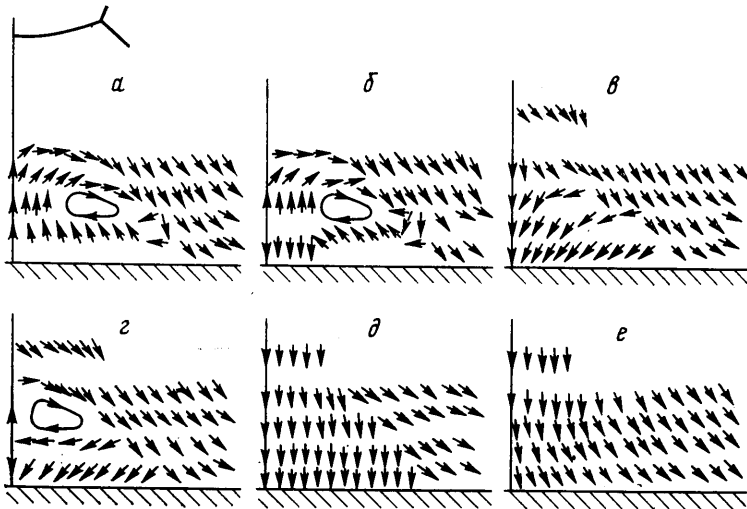
$Re_s =$	414	300	100	70	30	11
$Re_l =$	657	480	160	110	47	17

На фиг. 2, *a* приведено поле направлений, типичное для хорошо изученного течения с центральной циркуляционной зоной. Такое же течение наблюдалось и во всех экспериментах при больших Re_s . Тонкие замкнутые кривые на фиг. 2 ограничивают область, находясь в которой флюгерные зонды вращались в указанном стрелкой направлении. Повидимому, такое поведение зонда связано с его прохождением через центр циркуляционной зоны. На эпюре статического давления виден четкий периферийный максимум (фиг. 3, *a*). Полный напор в направлении от оси превосходит статическое давление, что свидетельствует о течении к центру. Пересечение кривых на фиг. 3, *a* соответствует периферийной точке торможения. Эта точка видна и на фиг. 2, *a*. Там же приведена волновая структура, наблюдаемая на экране.

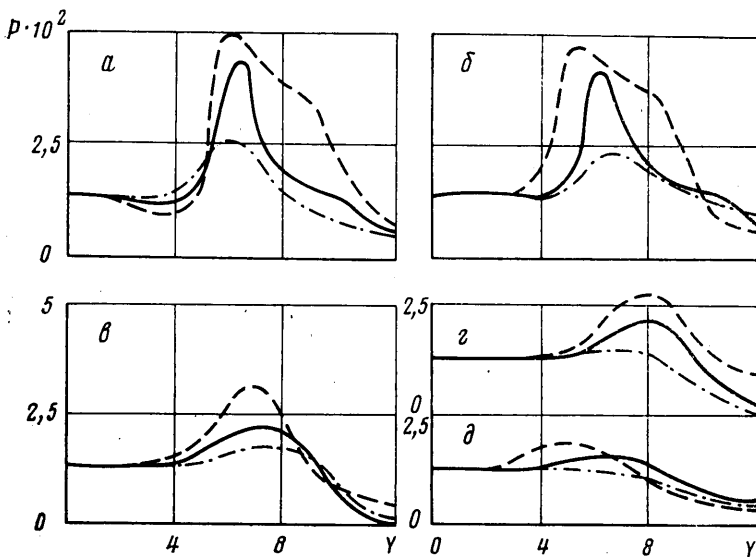
При уменьшении Re_s флюгерные зоны в окрестности центральной точки торможения начинают указывать на наличие течения к преграде (фиг. 2, *b*). Это можно объяснить формированием здесь второй циркуляционной зоны с направлением, противоположным течению в основной зоне. Периферийный максимум давления по-прежнему ярко выражен и занимает то же положение, однако полные напоры в двух направлениях практически совпадают близ оси со статическим давлением (фиг. 3, *b*). Это говорит о малости скоростей течения в окрестности центра преграды. Такое течение наблюдалось в четырех режимах при $Re_s = 300 - 200$.

Неожиданной оказалась эволюция течения при уменьшении числа Рейнольдса до величины $Re_s = 160$. Это привело к формированию течения, резко отличающегося от описанного выше. Типичное поле направлений для него приведено на фиг. 2, *e*. Видно, что здесь значительную часть ударного слоя занимает область с течением к центру преграды. Кроме того, зонды

четко обрисовывают периферийную точку растекания. Периферийный максимум на этом режиме расположен дальше, чем в предыдущих случаях, и его уровень меньше (фиг. 3, *в*). В целом распределение давлений стало более плавным. Размеры зондов не позволили установить их ближе к преграде и выяснить, существует ли течение от центра непосредственно у



Фиг. 2



Фиг. 3

поверхности. Такое течение — единственный путь эвакуации газа, стекающего к оси выше в ударном слое. Отметим, что взаимное расположение кривых 1 и 2 на фиг. 3, *в* как раз свидетельствует о радиальном растекании. Из-за своеобразия поля направлений описываемый тип течения был назван режимом «фиктивного стока». Оно наблюдалось в шести опытах при $Re_0 = 80-40$. Течение является стационарным и симметричным. Последнее установлено экспериментами с поворотом ресивера вокруг оси.

Описанные до сих пор режимы реализовывались при $Re_0 > 100$ (табл. 2), когда течение в струе перед центральным скачком практически невязкое.

Перед преградой наблюдается четко выраженная волновая структура, качественно не отличающаяся от приведенной на фиг. 2, а.

Дальнейшее уменьшение параметра Re_s до величины $Re_s=70$ приводит к появлению в ударном слое «всплывшей» циркуляционной зоны (фиг. 2, з). Характер распределения давлений при этом не меняется, однако уровень периферийного максимума статического давления здесь уменьшился еще более (фиг. 3, з). При $Re_s=32$ циркуляционное течение фиксируется только одним, вторым сверху зондом. При дальнейшем уменьшении Re_s «всплывшая» зона уже не наблюдается. Всего было исследовано семь режимов со «всплывшей» зоной в диапазоне $Re_s=70-30$.

Поскольку описанной перестройке течения соответствуют величины $Re_s < 100$, когда в струе происходит размывание ударных волн и переход четко выраженного ударного слоя в диффузную область сжатия перед преградой, исчезновение «всплывшей» циркуляционной зоны обусловлено, по-видимому, непосредственным влиянием вязкости. Однако и после этого поле направлений вектора скорости сохраняет некоторые особенности. Флюгерные зонды указывают на существование перед преградой области практически покоящегося газа, растекание которого начинается от периферийных точек торможения, сохраняющих положение, занятое при больших Re_s (фиг. 2, д). Виден периферийный максимум давления, который близок здесь по величине к давлению в центральной точке торможения (фиг. 3, д). Дальнейшее уменьшение Re_s приводит, наконец, к формированию в ударном слое радиального растекания (фиг. 2, е), которому соответствует эпюра давления с одним центральным максимумом.

Описанные выше типы течения наблюдались при уменьшении давления торможения струй во всех опытах, параметры которых указаны в таблице. Для конкретного сопла одному значению Re_s при неизменных n и h всегда соответствовала одна и та же качественная картина течения. Все перестройки в ударном слое, за исключением последней, происходили при четко выраженной волновой структуре струи. Видимо, поэтому, несмотря на высокую чувствительность течения к изменению параметра Re_s , его оказалось недостаточно для количественного описания границ выявленных в экспериментах режимов.

Реализованные в экспериментах абсолютные значения отходов скачка от преграды лежали в диапазоне 25–32 мм, что во много раз больше характерного размера зонда. Какие-либо возмущения волновой структуры струи при прохождении зондов через ударный слой не наблюдались.

3. Проведенное исследование позволило установить, что вязкость оказывает существенное влияние на течение с центральной циркуляционной зоной перед преградой, перпендикулярной оси струи. Увеличение степени влияния вязкости, вызванное уменьшением давления торможения, заставляет поле течения перед преградой перестраиваться последовательно от режима с одной и двумя циркуляционными зонами к режиму «фиктивного стока», застойной зоны, и только после этого перед преградой формируется течение с радиальным растеканием. По-видимому, механизм формирования названных режимов следует искать в совместном влиянии неравномерности потока перед преградой и вязкости. Первая обусловлена развитой волновой структурой струи, вторая ведет к утолщению пограничного слоя на преграде, слоев смещения, ударных волн и с уменьшением давления торможения все более определяет течение в целом.

Авторы благодарят Пулова В. К., Смирнова Н. А. и Стельмакова Э. С. за помощь в проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гинзбург И. П., Семилетенко Б. Г., Терпигорьев В. С., Усков В. Н. Некоторые особенности взаимодействия сверхзвуковой недорасширенной струи с плоской преградой. — Инж.-физ. ж. 1970, т. 19, № 3, с. 412–417.
2. Губанова О. И., Лунев В. В., Пластинина Л. Н. О центральной срывной зоне при взаимодействии сверхзвуковой недорасширенной струи с преградой. — Изв. АН СССР. МЖГ, 1971, № 2, с. 135–138.

3. Гинзбург И. П., Соколов Е. И., Усков В. Н. Типы волновой структуры при взаимодействии недорасширенной струи с безграничной плоской преградой.— ПМТФ, 1976, № 1, с. 45–50.
4. Кузьмина В. Е., Матвеев С. К. О численном исследовании неустойчивого взаимодействия сверхзвуковой струи с плоской преградой.— ПМТФ, 1979, № 6, с. 93–99.
5. Соколов Е. И. Течение в ударном слое перед преградой, перпендикулярной оси сверхзвуковой недорасширенной струи.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1977, № 4, с. 51–58.
6. Волчков В. В., Иванов А. В., Кисляков Н. И., Ребров А. К., Сухнев В. А., Шарфутдинов Р. Г. Струи низкой плотности за звуковым соплом при больших перепадах давления.— ПМТФ, 1973, № 2, с. 64–73.
7. Гусев В. Н., Коган М. Н., Перепухов В. А. О подобии и изменении аэродинамических характеристик в переходной области при гиперзвуковых скоростях потока.— Уч. зап. ЦАГИ, 1970, т. 1, № 1, с. 24–33.

Ленинград

Поступила в редакцию
21.IX.1981