

УДК 533.6.011.5

СТРУКТУРА ТЕЧЕНИЯ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ЕДИНИЧНОЙ МИКРОСТРУИ С ПОТОКОМ СВЕРХЗВУКОВОЙ СТРУИ

В. И. Запрягаев, Н. П. Киселев

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН,
630090 Новосибирск
E-mail: nkiselev@itam.nsc.ru

Экспериментально исследована структура течения на начальном участке сверхзвуковой недорасширенной струи при наличии стационарного искусственного возмущения в виде единичной микроструи. Выявлено влияние газодинамических и геометрических параметров микроструи на структуру основного сверхзвукового течения, а также существенное влияние микроструй на изменение полного давления в слое смешения сверхзвуковых струй. Показано, что в результате взаимодействия микроструи и потока основной струи формируются возмущения двух типов, распространяющиеся в потоке основной струи: возмущение, вызываемое следом за микроструей, и более слабое возмущение в виде незначительного скачка уплотнения (типа волн Маха).

Ключевые слова: сверхзвуковая струя, микросопло, микроструя.

Поиск возможностей интенсификации смешения в высокоскоростных течениях является одной из фундаментальных задач аэрогазодинамики. Экспериментально установлено, что в слое смешения начальный участок сверхзвуковой неизобарической струи, истекающей из осесимметричного сопла, имеет трехмерную структуру.

В настоящее время ведутся исследования по интенсификации процессов смешения путем генерации продольных вихревых структур в сверхзвуковых струях различной конфигурации с помощью различных устройств формирования вихрей: гофров, шевронов, табов, дольчатых смесителей. В работе [1] путем изменения давления в микроструе исследовалась степень ее проникновения в основную струю. При этом наблюдалось смещение слоя смешения струи к оси, зависящее от давления в микроструе. Вдув микроструи под углом интенсифицирует процессы смешения газов. Экспериментально исследовано влияние вдува струй в основное течение, образованное парными струями, на уровень шума результирующего течения [2]. Две соосные сверхзвуковые струи генерируют сильные автоколебания. Амплитуда результирующего высокочастотного шума с дискретными составляющими достигает большой величины. Использование вдува 16 микроструй в основное сверхзвуковое течение на выходе из микросопел и основного сопла (число Маха $M = 1,5$) приводит к существенному снижению общего уровня широкополосного шума и устранению высокочастотного шума при частоте 6 и 12 кГц. Струи, вдуваемые в основной поток, использовались для подавления акустических волн при взаимодействии течения с плоской преградой в экспериментах, имитирующих вертикальный взлет и посадку [3]. Имеется ряд работ, посвященных изучению способов уменьшения уровня генерируемого струей шума в сверхзвуковых

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 05-08-01215).

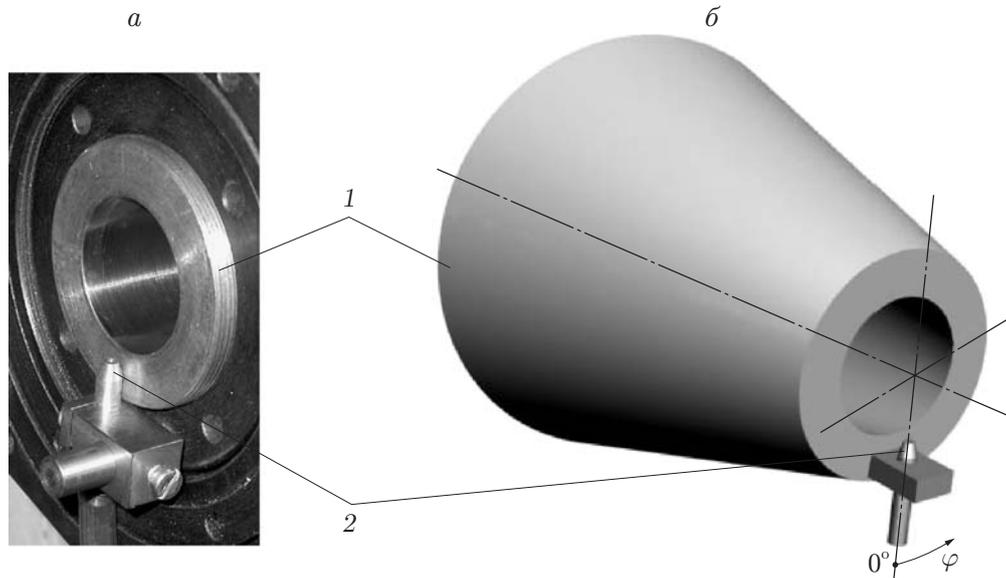


Рис. 1. Фотография (а) и схема (б) основного сопла ($M_a = 1,0$) и устройства с микросоплом:

1 — сопло, 2 — микросопло

струях с использованием сопел с шевронами и табами (см., например, [4]). В настоящее время активно используются методы и устройства для формирования продольных вихрей с целью интенсификации смешения и уменьшения уровня шума, генерируемого струей. В работах [1–4] описаны методики управления процессами смешения с помощью продольных вихрей, генерируемых искусственными возмущениями в виде микроструй.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование структуры течения сверхзвуковой струи на начальном участке при воздействии единичной микроструи на основной поток, а также зависимости процесса взаимодействия от интенсивности микроструи и положения области, в которой это взаимодействие происходит.

Эксперименты проводились на холодном воздухе с использованием струйного модуля гиперзвуковой аэродинамической трубы периодического действия Т-326 Института теоретической и прикладной механики СО РАН [5]. Микроструя истекает через сужающееся сопло (микросопло) с внешним диаметром $d = 3$ мм и диаметром выходного сечения $d_j = 1,5$ мм. Внутренний контур микросопла имеет форму конуса (конвергентное микросопло). Вдув микроструи проводился по нормали к границе сверхзвуковой недорасширенной струи. Фотография и схема основного профилированного сопла и микроструйной установки показаны на рис. 1. Форма внутреннего контура основного конвергентного сопла соответствует профилю Витошинского, а его радиус на выходе равен $R_a = 15$ мм. Степень шероховатости внутренней поверхности основного сопла определяется как средняя высота микронеровностей на профиле сопла и равна $k \approx 0,25$ мкм. В основном сопле с числом Маха $M_a = 1$ реализовано истечение сверхзвуковой слаборасширенной струи, степень нерасчетности которой $n_p = P_a/P_c = 2,64$ (P_a — давление на срезе сопла, P_c — давление в рабочей камере струйного модуля). Число Рейнольдса вычисляется по параметрам потока и диаметру на срезе сопла и равно $Re_d = 2,21 \cdot 10^6$. Газодинамические параметры микроструи варьировались с помощью изменения подводимого к микросоплу давления P_{0j} , которое принимало значения $P_{0j} = 0,12, 0,20, 0,41$ МПа. При указанных значениях давления P_{0j} в экспериментах производился вдув микроструй с параметрами $N_j = P_{0j}/P_c = 1,33, 2,22, 4,44$. При $N_j = 1,33$ формировалась высокоскоростная

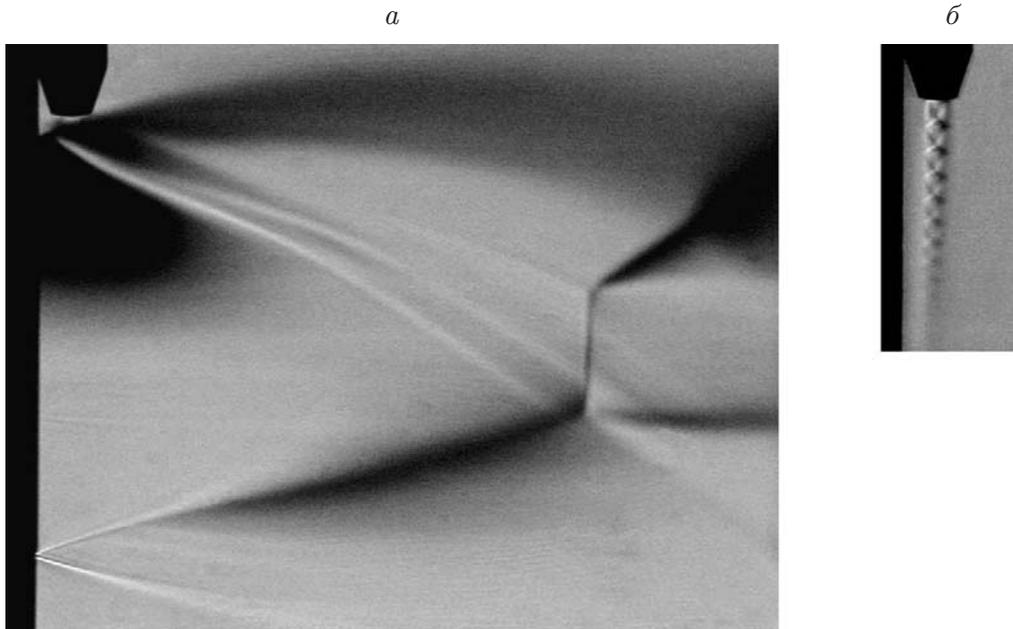


Рис. 2. Шлирен-фотографии основной недорасширенной струи ($M_a = 1,0$, $n_p = 2,64$) при наличии сверхзвуковой микроструи ($M_a = 1,0$, $N_j = 4,44$) (а) и сверхзвуковой слабонедорасширенной микроструи ($N_j = 4,44$) (б)

дозвуковая микроструя; при $N_j = 2,22, 4,44$ наблюдалось истечение сверхзвуковых микроструй с числом Маха на срезе микросопла $M_a = 1,0$ и степенью нерасчетности $n_{pj} = 1,17$ (для $P_{0j} = 0,20$ МПа) и $n_{pj} = 2,35$ (для $P_{0j} = 0,41$ МПа). В экспериментах также менялось положение микроструи, характеризуемое продольной x_j и радиальной r_j координатами среза микросопла. При заданном значении P_{0j} с помощью трубки Пито в продольных сечениях струи x в зависимости от радиальной r и угловой φ координат измерялось полное давление $P_t(x, r, \varphi)$.

Шлирен-фотографии основной недорасширенной струи ($n_p = 2,64$) при наличии сверхзвуковой микроструи ($N_j = 4,44$, $M_a = 1,0$, $Re_d = 0,4 \cdot 10^5$) и сверхзвуковой слабонедорасширенной микроструи ($N_j = 4,44$) представлены на рис. 2. Основной сверхзвуковой поток направлен слева направо, течение микроструи — сверху вниз. Визуализация картины течения осуществлялась с помощью теневого прибора ИАБ-451 с использованием шлирен-метода. Съёмки проводились цифровой фотокамерой CV-M10 (разрешение 640×480 пикселей) фирмы “JAI”. На рис. 2 видно, что при взаимодействии сверхзвуковой недорасширенной струи с потоком сверхзвуковой микроструи течение имеет ударно-волновую структуру. В области взаимодействия микроструи с основным потоком отчетливо видны две симметричные волны, направленные вдоль потока и соответствующие скачку уплотнения перед микроструей. Поскольку течение в микроструе является слабонедорасширенным, регистрируется многоблочная структура течения, возникающая при небольших значениях степени нерасчетности невзаимодействующей микроструи (рис. 2,б). Структура течения в микроструе аналогична структуре течения в основной недорасширенной струе. На рис. 2,б показана микроструя, истекающая из микросопла, положение которого относительно основного сопла задается параметрами $\bar{x}_j = 0,167$, $\bar{r}_j = 1,13$ ($\bar{x}_j = x_j/R_a$ — расстояние от среза основного сопла до центра микросопла; $\bar{r}_j = r_j/R_a$ — расстояние от оси симметрии основного сверхзвукового потока недорасширенной струи до среза микросопла).

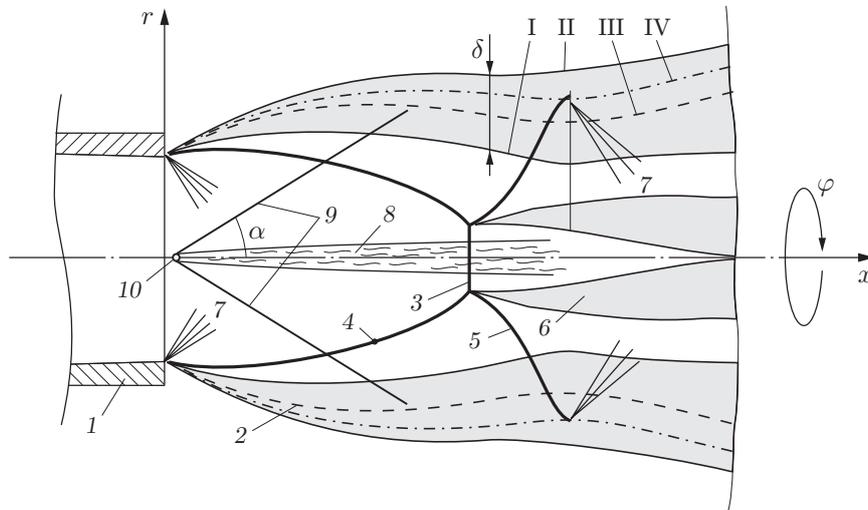


Рис. 3. Структура течения на начальном участке сверхзвуковой недорасширенной струи при наличии микроструи:

1 — сопло ($R_a = 15$ мм); 2 — слой смешения (I, II — внутренняя и внешняя границы, III — середина слоя смешения, IV — линия, вдоль которой число Маха $M = 1$ постоянно); 3 — диск Маха; 4, 5 — висячий и отраженный скачки уплотнения; 6 — слой сдвига, формирующийся за точкой пересечения скачков уплотнения 3, 4, 5; 7 — веер волн разрежения, 8 — след микроструи, 9 — волны Маха, 10 — микросопло

На рис. 3 представлена схема расположения основных ударно-волновых элементов при взаимодействии сверхзвуковой недорасширенной струи с микроструей.

Эксперимент проводился следующим образом. После установления заданного давления P_0 в форкамере струйного модуля аэродинамической трубы, давления P_{0j} в форкамере микроструйной установки и фиксации положения трубки Пито относительно продольной оси x проводились измерения радиальных профилей давления $P_t(r)$. Затем при фиксированных значениях координат x , r измерялось азимутальное распределение давления $P_t(\varphi)$. Пневмоприемник полного давления перемещался по радиусу с шагом 0,2 мм, а по углу — с шагом 1° . Погрешность измерения давления в струе, равная среднеквадратичному отклонению давления по времени, составляла 0,1 %.

Характерные радиальные профили измеренного полного относительного давления для невозмущенной (“чистой”) струи и струи с микроструями при различных положениях микросопла представлены на рис. 4. Измерения давления $P_t(r)$ проводились с помощью трубки Пито в одной плоскости с осью микросопла при величине угла $\varphi = 0^\circ$ (см. рис. 1, б). Из рис. 4, а следует, что внутренняя граница r_1 основной струи, соответствующая максимуму давления на профиле, с увеличением параметра N_j смещается к оси струи. Внешняя граница струи r_2 для микроструй с $N_j = 2,22; 4,44$, соответствующая радиусу $r/R_a = 1,6$ на профиле, также смещается. Наиболее слабое воздействие на основное течение оказывает микроструя $N_j = 1,33$, положение внешней границы которой практически совпадает с положением внешней границы для “чистой” струи и соответствует радиусу $r/R_a = 1,5$ (табл. 1). В табл. 1 представлены данные о положении границ слоя смешения при различных газодинамических параметрах микроструй.

На рис. 4, б показано влияние интенсивности микроструи на структуру основной струи. Видно, что с увеличением параметра N_j воздействие микроструи на основной сверхзвуковой поток увеличивается. В диапазоне радиусов $r/R_a = 0,45 \div 0,55$ регистрируется деформация висячего скачка уплотнения. В “чистой” струе висячий скачок уплотнения на-

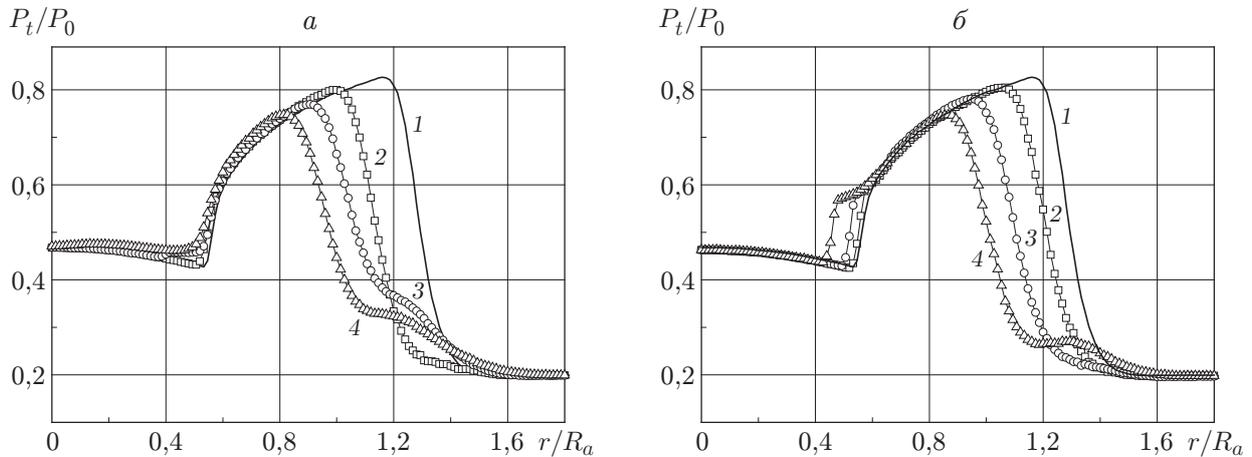


Рис. 4. Радиальные распределения полного относительного давления в продольном сечении струи $x/R_a = 2$ при различных положениях микросопла:
 а — $\bar{x}_j = 0,167$, $\bar{r}_j = 1,13$; б — $\bar{x}_j = 0,67$, $\bar{r}_j = 1,67$; 1 — “чистая” струя, 2 — $N_j = 1,33$,
 3 — $N_j = 2,22$, 4 — $N_j = 4,44$

Таблица 1

Положение границ слоя смешения при различных газодинамических параметрах

Тип струи	r_1	r_2
“Чистая”	1,16	1,5
$N_j = 1,33$	1,00	1,5
$N_j = 2,22$	0,90	1,6
$N_j = 4,44$	0,80	1,6

Таблица 2

Относительная толщина слоя смешения δ/R_a для различных струй

x/R_a	δ/R_a			
	“Чистая” струя	$N_j = 1,33$	$N_j = 2,22$	$N_j = 4,44$
1,5	0,22	0,38	0,52	0,72
2,0	0,40	0,58	0,70	0,87
3,0	0,44	0,69	0,90	0,99

блюдается на расстоянии $r/R_a = 0,53$ от оси струи. При наличии микроструи с $N_j = 2,22$ висячий скачок имеет место при $r/R_a = 0,51$, а для микроструи с $N_j = 4,44$ его положение соответствует значению $r/R_a = 0,45$. Для микроструи с $N_j = 1,33$ положение висячего скачка уплотнения совпадает с его положением в случае “чистой” струи. Для сверхзвуковых микроструй с $N_j = 2,22$; 4,44 увеличение продольной координаты микросопла x_j приводит к более сильной деформации висячего скачка уплотнения (прогибу к оси струи).

В трех продольных сечениях $x/R_a = 1,5$; 2,0; 3,0 при $\varphi = 0^\circ$ экспериментально определялась толщина слоя смешения струи $\delta/R_a = r_2 - r_1$ (табл. 2). С ростом интенсивности микроструй толщина слоя смешения увеличивается, следовательно, в области воздействия микроструи процесс смешения происходит более интенсивно.

При постоянных параметрах микроструи ($N_j = 1,33$; 2,22; 4,44, $\bar{x}_j = 0,167$, $\bar{r}_j = 1,13$), значениях продольной x и радиальной r координат основной сверхзвуковой струи определены азимутальные распределения давления $P_t(\varphi)$. Для каждого сечения струи получено 15 азимутальных распределений полного давления, измеренного трубкой Пито. Положение радиальных сечений изменялось в диапазоне от $r/R_a = 0,8$ ($r = 12$ мм) до $r/R_a = 1,7$ ($r = 25$ мм).

Азимутальные распределения относительного давления для радиальных сечений струи $r/R_a = 1,0$; 1,2 при постоянном газодинамическом режиме течения вдуваемой микроструи ($N_j = 2,22$) в двух продольных сечениях струи $x/R_a = 1,5$; 2,0 представлены на

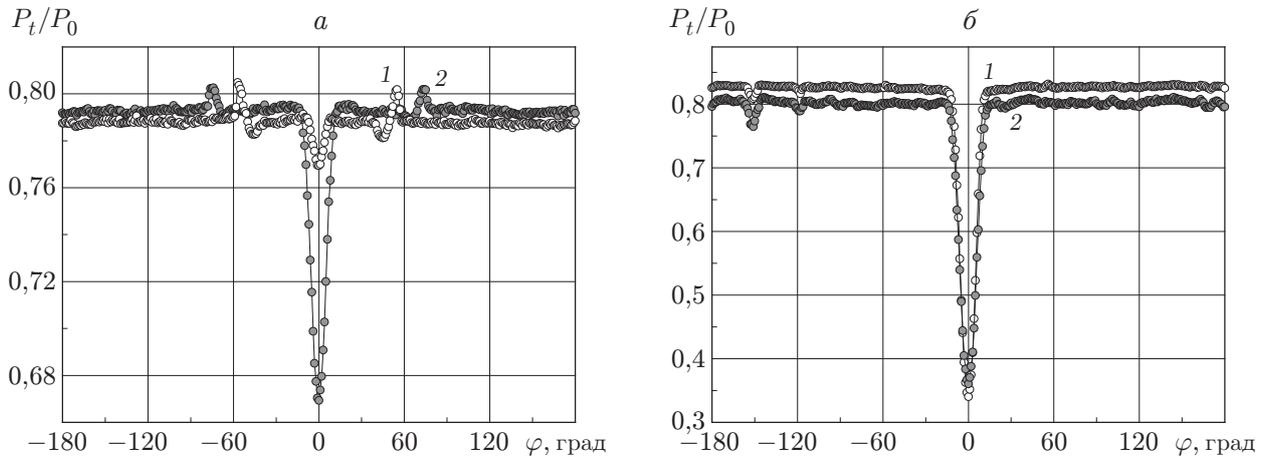


Рис. 5. Азимутальные распределения относительного давления при наличии микроструи с параметрами $N_j = 2,22$, $\bar{x}_j = 0,167$, $\bar{r}_j = 1,13$:
 а — $r/R_a = 1,0$, б — $r/R_a = 1,2$; 1 — $x/R_a = 1,5$, 2 — $x/R_a = 2,0$

рис. 5. При $\varphi = 0^\circ$ минимум измеренного полного давления соответствует оси микроструи и обусловлен наличием следа, формирующегося за микроструей, взаимодействующей с потоком основной струи, а также формированием двух крупномасштабных вихревых структур, возникающих при таком взаимодействии. Известно, что в течении в слое смешения сверхзвуковой недорасширенной струи имеет место неустойчивость Тейлора — Гертлера. Неоднородности давления, регистрируемые в азимутальном направлении, обусловлены наличием в слое смешения недорасширенной струи продольных вихрей типа вихрей Тейлора — Гертлера, развитию и формированию которых способствует “отрицательная кривизна” линий тока [6].

В сечении $x/R_a = 1,5$ (см. рис. 5,а) минимальное значение давления равно $P_t/P_0 = 0,77$, а при $x/R_a = 2,0$ $P_t/P_0 = 0,67$. Помимо следа наблюдаются симметричные максимумы давления, величина которых по сравнению с абсолютной величиной минимального давления (при $\varphi = 0^\circ$) достаточно мала. На рис. 5 видно, что максимальные значения давления практически равны. Течение в данном радиальном сечении соответствует сверхзвуковому течению в сжатом слое сверхзвуковой недорасширенной струи.

Помимо возмущений, обусловленных основным воздействием микроструи, возникают относительно слабые возмущения, вызываемые наличием перед микроструей скачка уплотнения. На расстоянии от среза сопла $x/R_a = 1,5; 2,0$ в сверхзвуковой части струи эти возмущения ослабевают и могут рассматриваться в качестве волн Маха. Возмущения типа волн Маха распространяются под углом α : $\sin \alpha = 1/M$ (M — локальное число Маха) [7]. Угол α можно определить из соотношения $\operatorname{tg} \alpha = r \Delta\varphi/\Delta x$, где $\Delta\varphi$ — разность углов φ_M при $x/R_a = 2,0$ и $x/R_a = 1,5$; φ_M — величина угла, при которой регистрируются максимумы давления, соответствующие волнам Маха на рис. 5,а ($\varphi_M = 74^\circ$ при $x/R_a = 2,0$, $\varphi_M = 54^\circ$ при $x/R_a = 1,5$); $\Delta x = 7,5$ мм; расстояние между сечениями $x/R_a = 2,0; 1,5$; $r = 15$ мм — радиус струи, при котором регистрируются волны Маха. Вычисленный угол Маха равен $\alpha = 33,5^\circ$ и соответствует числу Маха $M = 1,81$. Данное число Маха близко к струйному числу Маха, вычисленному по формуле для изэнтропического течения: $M_j = \sqrt{2[(P_0/P_c)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1]/(\gamma - 1)}$, которое в эксперименте поддерживалось постоянным и равным $M_j = 1,71$.

На рис. 5,б представлены азимутальные профили давления, полученные в слое смешения недорасширенной струи при $r/R_a = 1,2$, что соответствует середине слоя смешения

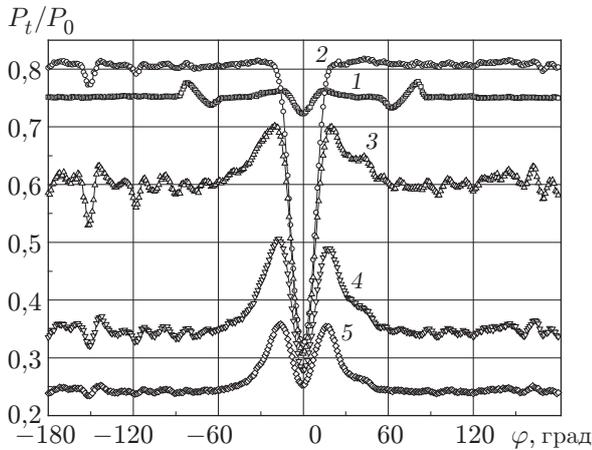


Рис. 6

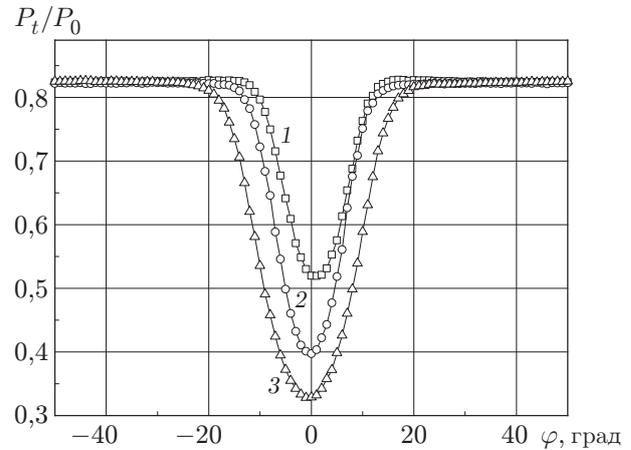


Рис. 7

Рис. 6. Азимутальные распределения относительного давления для микроструи с $N_j = 4,44$ при $x/R_a = 2,0$ и различных радиусах r/R_a :

1 — $r/R_a = 0,87$, 2 — $r/R_a = 1,20$, 3 — $r/R_a = 1,27$, 4 — $r/R_a = 1,33$, 5 — $r/R_a = 1,40$

Рис. 7. Азимутальные распределения относительного давления для различных микроструй при $r/R_a = 1,13$:

1 — $N_j = 1,33$, 2 — $N_j = 2,22$, 3 — $N_j = 4,44$

основной струи, где регистрируется максимальное среднеквадратичное отклонение измеренного полного давления [5]. Минимальные значения давления, обусловленные наличием микроструи, различаются незначительно. На рис. 5, б показан локальный минимум давления, имеющий место при $\varphi = -151^\circ$ и обусловленный наличием на внутренней поверхности сопла естественной микронеровности (царапин).

Характерные азимутальные распределения давления для различных радиальных положений приемника полного давления представлены на рис. 6. Видно, что данные, полученные при различных значениях радиуса r , хорошо согласуются. Также на рис. 6 видно, что зависимости $P_t(\varphi)$ подобны вследствие наличия микроструи. В сжатом слое основной струи (кривая 1 на рис. 6) наблюдаются симметричные максимумы давления, которые соответствуют волнам Маха. При увеличении радиуса в слое смешения струи помимо минимума, регистрируемого при $\varphi = 0^\circ$, при $\varphi = \pm 20^\circ$, $r/R_a = 1,27$ и $\varphi = \pm 17^\circ$, $r/R_a = 1,33$; $1,40$ возникают дополнительные максимумы давления (кривые 3–5 соответственно). На внешней границе струи ($r/R_a = 1,4$) (кривая 5 на рис. 6) абсолютные минимальные и максимальные отклонения давления становятся сопоставимыми. Появление максимумов, расположенных симметрично относительно минимума давления при $\varphi = 0^\circ$, обусловлено формированием двух продольных вихрей. В результате формирования двух крупномасштабных противоположно вращающихся продольных вихрей образуется течение в радиальном направлении (минимум давления при $\varphi = 0^\circ$), способствующее втеканию низконапорного газа внутрь струи. Возникающий при $\varphi = \pm(17 \div 20)^\circ$ максимум давления соответствует течению высоконапорного газа, направленному к внешней границе струи. Расчетная схема подобного течения, формирующегося за табом, расположенным на срезе сопла, приведена в [8]. При $\varphi = 0^\circ$ минимальное значение давления увеличивается пропорционально росту интенсивности вдуваемой микроструи (рис. 7).

В заключение отметим, что при взаимодействии расположенной вблизи среза сопла микроструи, ось которой перпендикулярна оси основной струи, в слое смешения происхо-

дит формирование двух продольных вихревых структур. Скачок уплотнения, формирующийся перед микроструей в потоке основной струи, проникает глубоко внутрь этой струи, вызывает возмущение течения в сжатом слое и деформацию всякого скачка уплотнения. Наиболее существенное воздействие оказывает микроструя с максимальным давлением (микроструя с $N_j = 4,44$). При увеличении давления в микроструе происходит локальная деформация слоя смешения основной недорасширенной струи, что можно трактовать как увеличение его толщины.

В результате взаимодействия микроструи и основной струи наблюдаются возмущения двух типов. Более сильное возмущение обусловлено наличием следовой компоненты микроструи и генерацией двух продольных вихрей, а более слабое проявляется в виде возмущений типа волн Маха, распространяющихся в сверхзвуковой области слоя смешения основной струи. При увеличении давления в микроструйной установке интенсивность следа микроструи возрастает. В экспериментах с микроструями отмечается полная контролируемость геометрических и газодинамических параметров микроструи и результирующего стационарного возмущения в области течения струи.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Collin E., Barre S., Bonnet J. P.** Supersonic mixing enhancement by radial fluid injection // Proc. of the Euromech. colloquium 403, Poitiers (France), 2–4 Nov., 1999. Poitiers: Futuroscope, 2000. P. 55–64.
2. **Alkisar M. B., Krothapalli A., Choutapalli I., Lourenco L.** Structure of supersonic twin jets // AIAA J. 2005. V. 43, N 11. P. 2309–2318.
3. **Huadong Lou, Farrukh S. Alvi, Chang Shih.** Active and passive control of supersonic impinging jets // AIAA J. 2006. V. 44, N 1. P. 58–66.
4. **Khritov K. M., Kozlov V. Ye., Krasheninnikov S. Yu., et al.** On the prediction of turbulent jet noise using traditional aeroacoustic methods // J. Aeroacoustic. 2005. V. 4, N 3/4. P. 289–324.
5. **Запрягаев В. И., Киселев Н. П., Павлов А. А.** Влияние кривизны линий тока на интенсивность продольных вихрей в слое смешения сверхзвуковых струй // ПМТФ. 2004. Т. 45, № 3. С. 32–43.
6. **Запрягаев В. И., Солотчин А. В.** Трехмерная особенность структуры течения в сверхзвуковой недорасширенной струе // ПМТФ. 1991. № 4. С. 42–47.
7. **Кочин Н. Е.** Теоретическая гидромеханика / Н. Е. Кочин, И. А. Кибель, Н. В. Розе. М.: Физматгиз, 1963. Ч. 2.
8. **Запрягаев В. И., Кавун И. Н., Киселев Н. П., Солотчин А. В.** Влияние крупномасштабных продольных вихрей на течение в сверхзвуковой недорасширенной струе // Тез. докл. 21-го Всерос. семинара “Струйные, отрывные и нестационарные течения”, Новосибирск, 15–18 авг. 2007 г. Новосибирск: Параллель, 2007. С. 112–113.

Поступила в редакцию 25/IV 2008 г.