

УДК 533.6.011.5:532.525.2

© 1997 г. В.И. ЗАПРЯГАЕВ, А.В. СОЛОТЧИН

РАЗВИТИЕ ПРОДОЛЬНЫХ ВИХРЕЙ В НАЧАЛЬНОМ УЧАСТКЕ СВЕРХЗВУКОВОЙ НЕИЗОБАРИЧЕСКОЙ СТРУИ ПРИ НАЛИЧИИ МИКРОНЕРОВНОСТЕЙ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ СОПЛА

Представлены результаты экспериментального исследования влияния локализованных микронеровностей внутренней поверхности сопла на формирование и развитие азимутальных неоднородностей на границе сверхзвуковой недорасширенной струи. Приведены данные о влиянии указанных неровностей, размеры которых сопоставимы с толщиной вытеснения пограничного слоя на срезе сопла, на спектральный состав волновых чисел азимутальных неоднородностей. Определен характер зависимости амплитуды спектральных составляющих от продольной координаты для естественной и искусственной шероховатости сопла, изменение которых коррелирует с газодинамической структурой начального участка неизобарической струи.

Относительно недавно было установлено, что на границе сверхзвуковой недорасширенной струи, истекающей из осесимметричного сопла в затопленное пространство, существует стационарная азимутальная неравномерность распределений газодинамических параметров [1, 2]. Ранее подобный эффект был замечен при исследовании сверхзвуковой струи, истекающей в полуограниченный осесимметричный канал [3]. Трехмерная структура течения обнаружена также и в струях разреженного газа [4, 5]. Течение с продольными вихрями в сверхзвуковых нерасчетных струях при высоких числах Рейнольдса исследовалось и на других установках, где кроме зондовых методов измерения и шпирен-снимков течения применялась визуализация поперечного сечения струи с использованием метода лазерного ножа [6, 7]. Возникновение трехмерных особенностей в слое смешения сверхзвуковой струи авторы связывают с гертлеровской неустойчивостью, что подтверждается расчетами, приведенными в [8]. Влияние шероховатости внутренней поверхности сопла на формирование продольных вихрей в струе недостаточно изучено, хотя и делались попытки прояснить влияние этого фактора [4, 6]. Существенное различие в азимутальном распределении газодинамических величин на одних и тех же режимах истечения струй, но из разных сопел и на различных установках [1, 2, 6, 7, 9] наводит на мысль о наличии неконтролируемого параметра, влияющего на режим формирования и развития продольных вихревых структур. Таким параметром может быть неконтролируемая шероховатость поверхности сопла.

Эксперименты были выполнены на струйной установке с применением системы автоматизированного сбора данных, которая содержит коммутатор аналоговых сигналов, аналого-цифровой преобразователь и блоки управления двигателями механизмов перемещения. Система сбора данных связана с персональной ЭВМ, что позволяет регистрировать одновременно давление и температуру в форкамере установки; давление, измеряемое трубкой полного напора, и азимутальный угол, соответствующий положению приемника относительно оси струи. Процедура эксперимента заключалась в получении зависимостей полного давления как от азимутального угла φ , так и от радиуса для различных поперечных сечений струи, т.е. $P_r(x, r, \varphi)$. Струйная установка имела механизм вращения сопла, управление которым осуществлялось с помощью ЭВМ.

P_0 , кПа	x'_1	M_j	P_a/P_h	$Re_d \cdot 10^{-6}$
392.0	3,25	1,56	2,12	1,30
490.0	3,75	1,71	2,65	1,71
588.0	4,0	1,83	3,18	1,95

Внутренняя поверхность сопла была обработана по 7-му классу чистоты, при этом величина естественных микронеровностей не превышала 0,002 мм. Искусственные микронеровности в виде крупинок сферической формы наклеивались на внутреннюю поверхность сопла на расстоянии 0,6–1,0 мм от его среза. Диаметр и местоположение микронеровностей контролировались по микроскопу. Газодинамические параметры трех исследованных режимов для конвергентного сопла с числом Маха на его срезе $M_a = 1$ приведены в таблице. Здесь P_0 соответствует давлению в форкамере струйной установки; $x'_1 = x_1/R_a$ – длина первой ячейки струи, отнесенная к радиусу среза сопла R_a ; M_j – число Маха, соответствующее изэнтропическому расширению потока в недорасширенной струе от давления на срезе сопла P_a до давления в окружающей среде P_h (P_a/P_h – степень нерасчетности струи); Re_d – число Рейнольдса, вычисленное по диаметру среза сопла и параметрам потока в выходном сечении сопла.

Схема и шпирен-фотография струи приведены на фиг. 1, а, б. На схеме фиг. 1, а указаны характерные размеры струи, такие, как длина первой и второй ячеек x_1 и x_2 ; расстояние до диска Маха x_c ; диаметр диска Маха d_c ; угол θ_j , который соответствует углу разворота потока в веере волн разрежения вблизи кромки сопла. Здесь же указаны характерные кривые, поясняющую структуру струи. Линия I соответствует наблюдаемой на шпирен-фотографиях границе струи, которая может быть определена также по результатам пневмометрических измерений как местоположение точек $r_s(x)$, где измеряемое трубкой Пито давление равно [10]

$$P_t(r_s, x) = 0,01P_t(r_1, x)$$

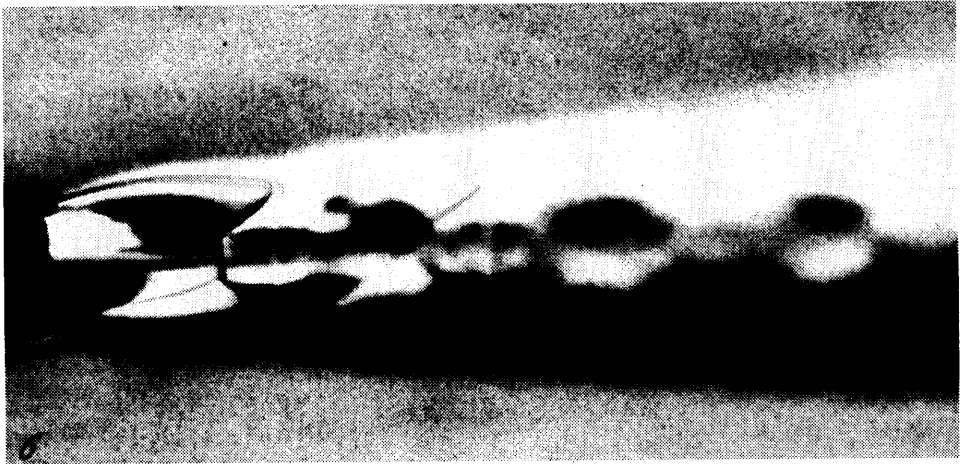
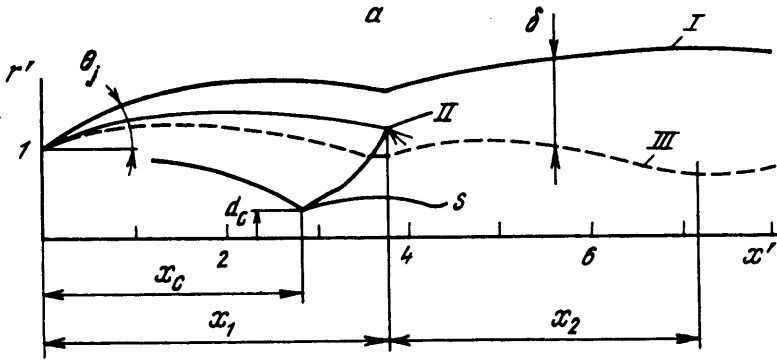
Здесь r_1 – значение радиуса, при котором регистрируется максимальное давление в данном сечении струи. Линия III связывается с положением внутренней границы слоя смешения сверхзвуковой нерасчетной струи. Линия II, отчетливо наблюдаемая в первой ячейке струи, скорее всего связана с линией максимальных градиентов плотности и близка по положению к линии, на которой локальное число Маха $M = 1$. Линия S соответствует слою смешения, исходящему из тройной точки пересечения скачков уплотнения.

Зависимость относительной толщины слоя смешения на границе струи $\delta' = \delta/R_a$ от относительного расстояния $x' = x/R_a$ для трех исследованных режимов в диапазоне азимутальных углов, соответствующих невозмущенному течению, может быть представлена единым аппроксимирующим выражением ($x' < 8$)

$$\delta' = 0,157x' + 0,048$$

Пограничный слой на срезе сопла для исследуемых режимов истечения струи с большой вероятностью является ламинарным. Последнее основано как на результатах измерения профиля полного давления в слое сдвига вблизи среза сопла [11], так и анализ данных по измерению числа Рейнольдса перехода от ламинарного течения к турбулентному [12].

Зависимость давления $P_t(\varphi)$ от азимутального угла для одного из исследуемых режимов течения $P_0 = 490$ кПа в различных сечениях струи представлена на фиг. 2. Различным кривым соответствуют различные значения $P_t = 0$, которые обозначены как O_1, O_2, O_3, O_4, O_5 . Зависимости $P_t(\varphi)$ получены при значении радиуса $r = r_4$, где $P_t(r_4) \sim 0,5P_t(r_1)$. Положение сферической частицы диаметром 150 мк соответствует

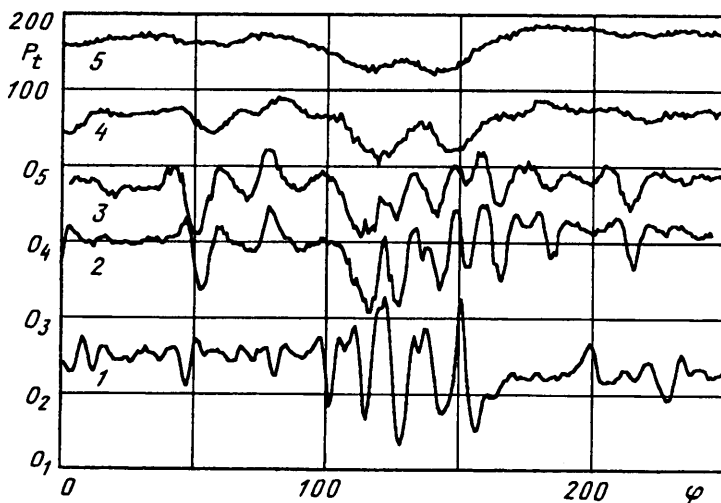


Фиг. 1. Схема (а) и шлирен-фотографии (б) сверхзвуковой недорасширенной струи, истекающей из конвергентного сопла, $M_a = 1$ при степени нерасчетности струи $P_a/P_h = 2,65$ и числе Рейнольдса $Re_d = 1,71 \cdot 10^6$

$\varphi_0 = 122^\circ$. Диаметр микронеровности k соизмерим с толщиной вытеснения δ^* пограничного слоя на срезе сопла, что для такого соотношения, как $k/\delta^* \approx 1$, ведет к турбулизации ламинарного пограничного слоя непосредственно за микронеровностью [13].

Вид зависимости полного давления от азимутального угла меняется с увеличением расстояния от среза сопла, что проявляется в уменьшении градиентов $dP_t/d\varphi$ и амплитуды изменения полного давления. Увеличенная амплитуда изменения измеренного полного давления P_t соответствует диапазону азимутальных углов $\Delta\varphi = 90-190^\circ$, что отвечает возмущениям в слое сдвига, которые развились в результате воздействия локализованной шероховатости, расположенной при $\varphi_0 = 122^\circ$. Центр волнового пакета находится примерно при $\varphi_w = 140^\circ$ и не совпадает с положением локализованной шероховатости. Различие $\varphi_w - \varphi_0$ существенно превышает точность измерения азимутального угла, которая в данном случае равна 1° .

При $x' = 2,0$ и $2,5$ вид зависимостей $P_t(\varphi)$ для различных значений степени нерасчетности струи различается несущественно. Следует заметить, что длина первой ячейки струи при нерасчетности, равной $2,65$, составляет $x'_1 = 3,75$. Различие формы кривых зависимостей $P_t(\varphi)$ для различных режимов в сечениях, близких к концу первой ячейки, может быть объяснено различной кривизной линий тока, так как толщина слоя смещения и осредненное число Маха при данном значении радиуса слабо изменяются в



Фиг. 2. Зависимость измеренного приемником полного давления P_t (кПа) от азимутального угла φ (град) для режима течения $P_0/P_1 = 2,65$. Кривые 1–5 соответствуют сечениям струи $x' = 1,06$; 2,0; 3,0; 4,0 и 5,0 соответственно

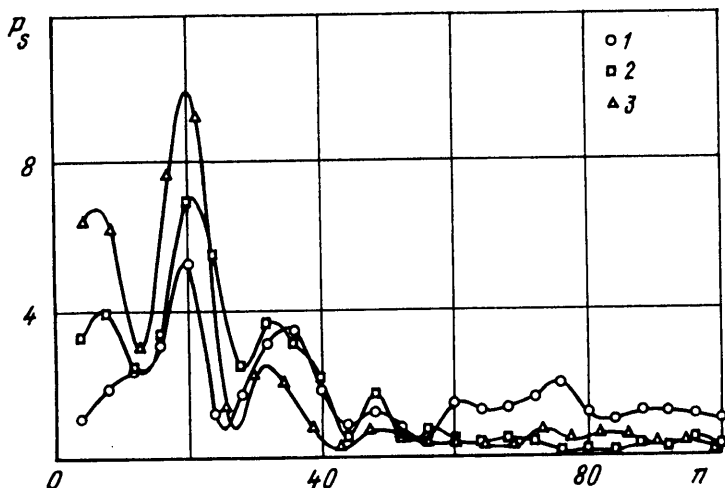
данном сечении струи. Это обстоятельство заставляет более внимательно рассмотреть кривизну линий тока вблизи внешней границы струи, что было сделано в [11].

Граница струи имеет непостоянную кривизну (см. фиг. 1). Видно, что в конце первой ячейки происходит изменение знака кривизны. Согласно имеющимся расчетным данным, знак и значение кривизны линий тока являются определяющими для развития возмущений гертлеровского типа [14]. Увеличение кривизны (уменьшение радиуса кривизны) способствует усилению возмущений этого типа. Изменение знака кривизны ведет к затуханию возмущений (случай выпуклой поверхности для течения с градиентом скорости, соответствующим течению в пограничном слое) [14].

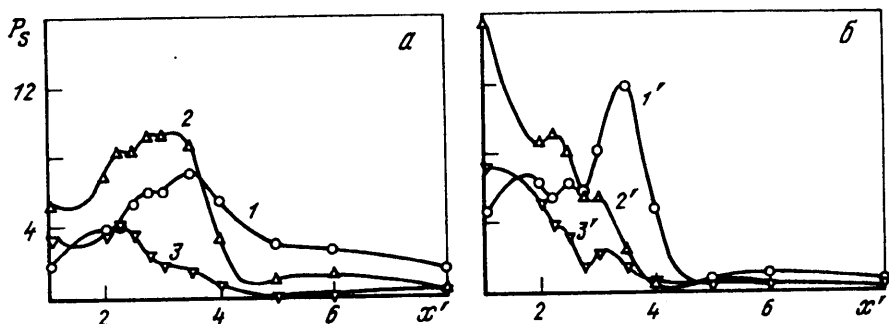
Таким образом, вид кривых зависимости полного давления от азимутального угла (см. фиг. 2) указывает на то, что наблюдаемая неравномерность распределения газодинамических величин в слое сдвига сверхзвуковой струи создается продольными вихрями типа вихрей Тейлора – Гертлера.

Спектральный анализ наблюдаемых азимутальных неоднородностей проведен в предположении, что возмущения от различных участков поверхности с различной шероховатостью формируют неодинаковые спектры в слое смешения. Пример спектра волновых чисел неоднородностей $P_s(n)$, регистрируемых приемником полного давления, приведен на фиг. 3. Здесь n соответствует азимутальному волновому числу. В данном случае диапазон азимутальных углов $\Delta\varphi = 0-90^\circ$, при которых проводился спектральный анализ, соответствует естественным возмущениям поверхности сопла. Здесь кривые 1, 2, 3 соответствуют трем сечениям струи $x' = 1,06$; 2,0 и 3,0 при давлении в ресивере установки $P_0 = 490,0$ кПа.

Спектральный состав возмущений ограничен значениями волновых чисел $n < 40$. Отчетливо наблюдаются отдельные спектральные составляющие, которые для естественных возмущений в диапазоне азимутальных углов $\Delta\varphi = 0-90^\circ$ принимают значения $n = 8$; 20; 32. Для диапазона азимутальных углов $\Delta\varphi = 90-190^\circ$, соответствующих вынужденным возмущениям, спектр имеет подобный вид, однако значения волновых чисел, при которых наблюдаются максимумы, отличаются от области влияния естественных возмущений и равны 14; 28 и 39.



Фиг. 3. Амплитуды спектральных составляющих давления P_s (кПа), соответствующие естественным возмущениям, в зависимости от волнового числа n . Кривые 1, 2, 3 соответствуют сечениям струи $x' = 1,06; 2,0$ и $3,0$. Степень нерасчетности струи $P_d/P_h = 2,65$



Фиг. 4. Зависимости амплитуд спектральных составляющих P_s (кПа) от продольной координаты x' для естественных (а) и искусственных возмущений (б) соответственно. Кривые 1, 2, 3 отвечают значениям волновых чисел $n = 8; 20$ и 32 ; кривые 1', 2', 3' - $n = 14; 28$ и 39

Зависимости амплитуд спектральных составляющих P_s от продольной координаты x' представлены на фиг. 4 (для естественных и искусственных возмущений - а и б соответственно).

Общим в поведении выделенных спектральных компонент является резкое уменьшение их амплитуд до уровня шумовых составляющих при расстояниях $x' > 4,0$, что соответствует концу первой ячейки сверхзвуковой струи. Однако при расстояниях $x' < 4,0$ характер поведения отдельных мод в начальном участке струи различен для диапазона азимутальных углов с естественными $\Delta\varphi = 0-90^\circ$ и искусственными $\Delta\varphi = 90-190^\circ$ возмущениями.

Естественные возмущения имеют максимум в зависимости $P_s(x')$, положение которого смещается от среза сопла с увеличением размера продольных вихрей (уменьшение волнового числа n). Амплитуда мелкомасштабных продольных вихрей, соответствующих вынужденным возмущениям, уменьшается с расстоянием от среза сопла ($n = 28, 39$). Амплитуда спектральной составляющей с более крупными вихрями так

же, как и для области соответствующих естественным возмущениям, имеет максимум ($n = 20$) (фиг. 4,б).

Существенным обстоятельством является резкое уменьшение амплитуды спектральных составляющих ($n = 28$ и 39), что объясняется наличием локальной микронеровности, которая генерирует эти спектральные составляющие.

Заключение. Экспериментальное исследование локальной микронеоднородности, установленной на внутренней поверхности конвергентного сопла вблизи его среза, подтвердило ранее высказанное предположение о существенной роли уровня и характера начальных возмущений поверхностной шероховатости сопла на формирование и развитие продольных вихрей в начальном участке сверхзвуковой струи. Такое сильное влияние граничных условий на срезе сопла подтверждает факт существования переходного процесса в начальном участке сверхзвуковой струи, истекающей в затопленное пространство при числах Рейнольдса $(2-5) \cdot 10^6$. Переходный процесс подразумевает переход от ламинарного течения в пограничном слое сопла к турбулентному в слое смешения сверхзвуковой струи. При этом переход осуществляется за счет первоначального развития стационарных возмущений типа продольных вихрей Тейлора – Гертлера с последующей турбулизацией течения в слое смешения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Запругаев В.И., Солотчин А.В.* Пространственная структура течения в начальном участке сверхзвуковой недорасширенной струи: Препринт № 23–88. Новосибирск: ИТПМ, 1988. 21 с.
2. *Запругаев В.И., Солотчин А.В.* Трехмерная особенность структуры течения в сверхзвуковой недорасширенной струе // ПМТФ. 1991. № 4. С. 42–47.
3. *Глотов Г.Ф., Мороз Э.К.* Продольные вихри в сверхзвуковых течениях с отрывными зонами // Уч. зап. ЦАГИ. 1977. Т. 8. № 4. С. 44–53.
4. *Novopashin S.A., Perepelkin A.L.* Axial symmetry loss of a supersonic preturbulent jet // Phys. Lett. A. 1989. V. 135. № 4, 5. P. 290–293.
5. *Teshima K.* Three-dimensional characteristics of supersonic jets // Proc. 17th Conf. on Rarefied Gas Dynam., Aachen, BRD, 1990. P. 1042–1048.
6. *Krothapalli A., Buzyna G., Lourenco L.* Streamwise vortices in an underexpanded axisymmetric jet // Phys. Fluids A. 1991. V. 3. № 8. P. 1848–1851.
7. *Arnette S.A., Samimy M., Elliott G.S.* On streamwise vortices in high Reynolds number supersonic axisymmetric jets // Phys. Fluids. A. 1993. V. 5. № 1. P. 187–202.
8. *Желтухин Н.А., Запругаев В.И., Солотчин А.В., Терехова Н.М.* Спектральный состав и структура стационарных вихревых возмущений Тейлора – Гертлера сверхзвуковой неизобарической струи // Докл. РАН. 1992. Т. 325. № 6. С. 1133–1137.
9. *Запругаев В.И., Миронов С.Г., Солотчин А.В.* Спектральный состав волновых чисел продольных вихрей и особенности структуры течения в сверхзвуковой струе // ПМТФ. 1993. № 5. С. 41–47.
10. *Абрамович Г.Н., Крашенинников С.Ю., Секундов А.Н., Смирнова И.П.* Турбулентное смешение газовых струй. М.: Наука, 1974. 272 с.
11. *Запругаев В.И., Солотчин А.В.* Экспериментальное исследование влияния шероховатости сопла на продольные вихревые образования в сверхзвуковой струе // ПМТФ. 1997. № 1. Т. 38. С. 86–96.
12. *Глотов Г.Ф., Гоженко Г.Ф., Фейман М.И.* Исследование присоединенной массы недорасширенных затопленных струй газа // Тр. ЦАГИ. 1971. Вып. 1377. 13 с.
13. *Van Driest E.R., Blumer C.B.* Boundary-Layer transition at supersonic speeds-three-dimensional roughness effects (Spheres) // J. Aerospace Sci. 1962. V. 29. № 8. P. 909–916.
14. *Floryan J.M.* On the Gortler instability of boundary layers // Progr. Aerospace Sci. 1991. V. 28. № 3. P. 235–271.

Новосибирск

Поступила в редакцию
4.XII.1995