

03

Экспериментальное исследование структуры сверхзвуковых плоских недорасширенных микроструй

© В.М. Анискин^{1,2}, А.А. Маслов^{1,2}, С.Г. Миронов^{1,2},
И.С. Цырюльников^{1,2}, И.В. Тимофеев¹

¹ Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск

² Новосибирский государственный университет

E-mail: aniskin@itam.nsc.ru

Поступило в Редакцию 9 декабря 2014 г.

Экспериментально исследована структура сверхзвуковых плоских недорасширенных микроструй. Характерный размер микросопел составлял от 47 до 175 μm при ширине сопла 2410–3900 μm . Рабочим газом являлся воздух комнатной температуры. Диапазон чисел Рейнольдса составлял от 1280 до 9460. Определены размеры первой бочки струи. Впервые определена дальнобойность сверхзвуковых плоских недорасширенных микроструй. Показано, что для струи, истекающей из сопла высотой 47 μm , реализуется режим большой дальнобойности.

В связи со значительными прикладными возможностями микроскопических газовых и жидкостных устройств возникает интерес к изучению течения газа на микромасштабах. Касается это как течения газа в микроканалах, так и истечения газа из отверстий микронных размеров. В зависимости от давления на выходе из отверстия струя может быть как дозвуковой, так и сверхзвуковой. Дозвуковые и сверхзвуковые микроструи могут применяться в управлении макротечениями, для уменьшения шума, в струйных системах охлаждения.

Экспериментальных работ по исследованию сверхзвуковых струйных микротечений немного [1–5]. Подробное изучение структуры осесимметричных сверхзвуковых микроструй выполнено в работах [3,4]. Было показано, что нет отличия в относительных размерах бочек микро- и макроструй. Однако при некоторых значениях нерасчетности происходит значительное увеличение дальнобойности микроструй по

Размеры сопел и параметры эксперимента

$h, \mu\text{m}$	$w, \mu\text{m}$	w/h	n	Re	Mj	Kn_{max}
175	3900	22.3	1–2	5170–9460	1–1.52	0.00019
130	3823	29.4	1–2.3	3690–8054	1–1.6	0.00028
83.3	3823	45.9	1–3.2	2360–7225	1–1.83	0.00042
65.2	3290	50.7	1–3.7	1750–6574	1–1.93	0.00057
52.5	3000	57.1	1–3.5	1465–4937	1–1.88	0.00068
47	2410	51.3	1–4	1280–5055	1–1.97	0.00078

сравнению с дальнобойностью макроструй. Под дальнобойностью струи понимается расстояние от среза сопла до точки на оси струи, в которой скорость достигает местной скорости звука. Смена режима большой дальнобойности на режим дальнобойности, характерный для макроструй, происходит при числах Рейнольдса от 1100 до 2100 и связана с ламинарно-турбулентным переходом в струе.

Существует большое количество экспериментальных и теоретических работ, рассматривающих структуру, шум и взаимодействие с преградой сверхзвуковых прямоугольных макроструй [6–8]. Однако отсутствуют данные по дальнобойности двумерных сверхзвуковых макроструй.

Экспериментальных работ по исследованию структуры сверхзвуковых плоских микроструй нет, за исключением работы [5], в которой приведены некоторые данные только при одном числе Рейнольдса.

Целью данной работы является определение основных характеристик сверхзвуковых плоских недорасширенных микроструй — размера первой бочки и дальнобойности микроструй. На основе технологии, разработанной в [4], изготовлены двумерные микросопла. Сопло имело цилиндрическую форкамеру диаметром 4 mm и клиновидно сужающуюся сопловую часть. Размеры сопел и параметры эксперимента приведены в таблице. В таблице обозначено: h — высота сопла, w — ширина сопла, n — нерасчетность струи (отношение статического давления на срезе сопла к давлению окружающего пространства), Re — число Рейнольдса, рассчитанное по высоте сопла и параметрам газа на срезе сопла, Mj — число Маха струи, Kn — число Кнудсена.

Исследование сверхзвуковых плоских микроструй осуществлялось визуализацией течения прямотеневым методом, а также примене-

нием миниатюрной трубки Пито. Использовался воздух комнатной температуры в качестве рабочего газа. Сверхзвуковая струя истекала в атмосферу. Трубка Пито, выполненная из стекла (внешний диаметр $40\ \mu\text{m}$, внутренний — $20\ \mu\text{m}$), закреплялась на державке, которая передвигалась в пространстве микроманипулятором Narishige NT-88E по трем взаимно перпендикулярным направлениям с точностью $\pm 1\ \mu\text{m}$. Положение микротрубки Пито контролировалось с помощью стереоскопического микроскопа Nikon SMZ1500.

На рис. 1 в качестве примера показаны фотографии визуализации течения струи (вдоль большей оси), истекающей из сопла высотой $175\ \mu\text{m}$ при различном давлении в форкамере. Пилообразная структура на фотографиях — масштабный элемент. На фотографиях отчетливо видна ударно-волновая структура сверхзвуковой струи. На рис. 2 приведено продольное распределение давления, измеренного трубкой Пито, (P'_0) для струи, истекающей из сопла высотой $83.3\ \mu\text{m}$. Измерения выполнены вдоль линии пересечения плоскостей симметрии сопла. На графике видно квазипериодическое изменение P'_0 , связанное с ударно-волновой структурой струи. По фотографиям визуализации течения (рис. 1) и распределению давления вдоль струи (рис. 2) был определен размер первой бочки струи. Полученные данные приведены на рис. 3, а. На графике сплошной линией показана зависимость размера первой бочки, полученной при расчетах плоской струи [7], истекающей из сопла высотой $1\ \text{mm}$. Пунктирной линией показано теоретическое соотношение для невязкого газа, предложенное в работе [8].

По данным, приведенным на рис. 3, а были получены эмпирические зависимости размера первой бочки сверхзвуковых плоских недорасширенных микроструй воздуха

$$L_s/h = 2.35\sqrt{n-1} \text{ при } n \leq 2, \quad L_s/h = 1.23n - 0.1 \text{ при } n > 2.$$

Видно, что размер первой бочки двумерных сверхзвуковых струй при $n > 2$ изменяется линейно с увеличением нерасчетности струи.

Дальнобойность сверхзвуковых плоских микроструй определялась по распределению P'_0 вдоль линии пересечения плоскостей симметрии струи. Результаты приведены на рис. 3, б, на котором видно, что дальнобойность сверхзвуковых плоских струй, истекающих из сопел шириной более $52.5\ \mu\text{m}$, хорошо совпадает друг с другом. Однако для струи, истекающей из сопла высотой $47\ \mu\text{m}$ при $n < 1.2$, дальнобойность выше, чем для остальных микроструй — реализуется режим большой

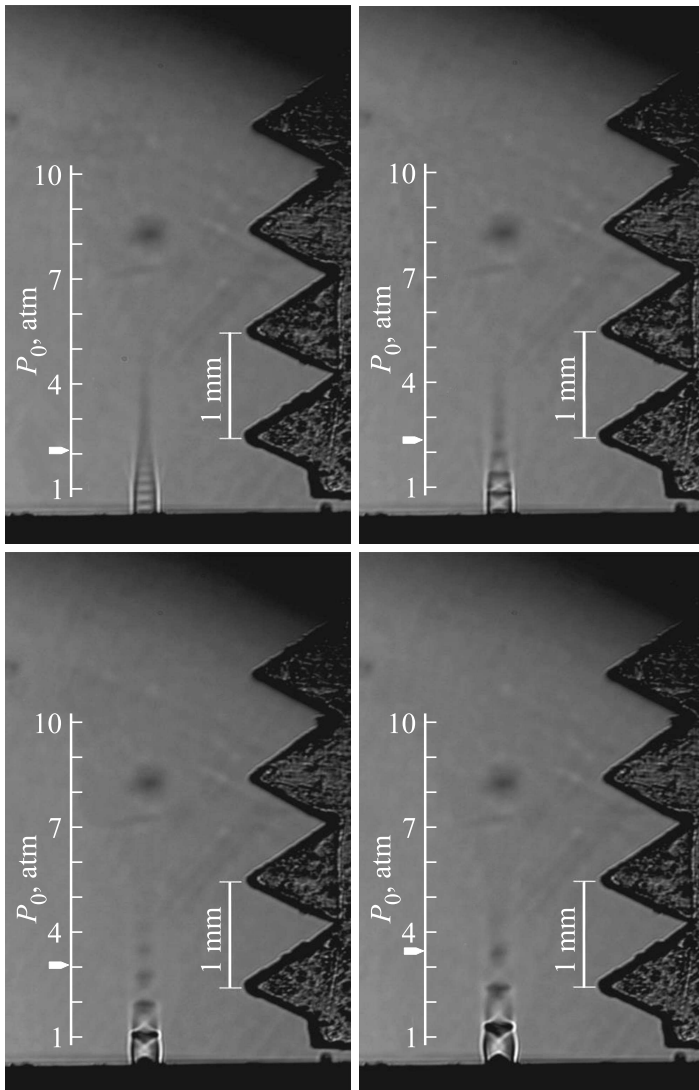


Рис. 1. Визуализация течения микроструи воздуха, истекающей из сопла высотой $175 \mu\text{m}$.

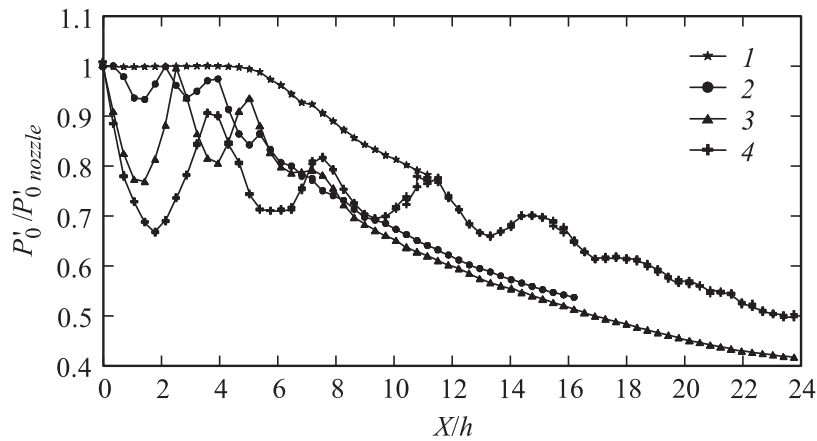


Рис. 2. Продольное распределение P'_0 , высота сопла $83.3 \mu\text{m}$. 1 — $n = 1.04$, 2 — $n = 1.54$, 3 — $n = 2.14$, 4 — $n = 3.2$.

дальнобойности струи. При $n \cong 1.2$ режим большой дальнобойности заканчивается, и в дальнейшем для $n > 1.2$ дальнобойность струи, истекающей из сопла высотой $47 \mu\text{m}$, не отличается от дальнобойности струй, истекающих из сопел с большей высотой. Подобное увеличение дальнобойности наблюдается и для сверхзвуковых осесимметричных микроструй [4]. В работе [4] было показано, что дальнобойность осесимметричных струй, истекающих из сопел диаметром более $60 \mu\text{m}$, соответствует дальнобойности осесимметричных макроструй. При диаметре сопла менее $60 \mu\text{m}$ наблюдаются режимы с большой дальнобойностью микроструй.

Число Рейнольдса, соответствующее смене режима дальнобойности (для сверхзвуковой плоской микроструи $h = 47 \mu\text{m}$), составляет $Re = 1700 \pm 60$, что коррелирует с числами Рейнольдса смены режима для осесимметричных струй, лежащих в диапазоне $Re = 1100 - 2100$.

В работе [9] было показано, что режим большой дальнобойности сверхзвуковых осесимметричных микроструй связан с ламинарным течением в слое смешения струи. Можно предположить, что увеличение дальнобойности сверхзвуковых плоских микроструй также связано с ламинарным течением в слое смешения.

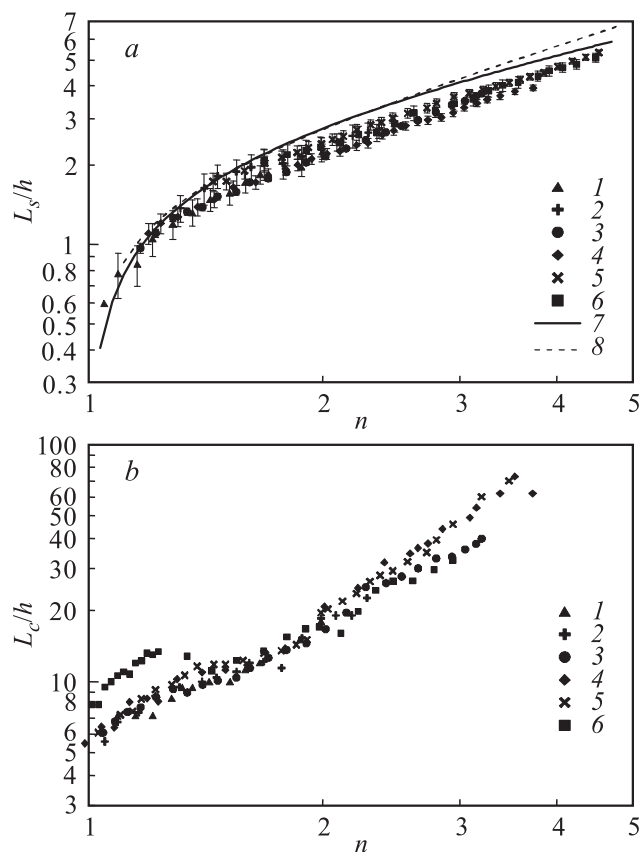


Рис. 3. Размер первой бочки струи (а) и дальность двумерных сверхзвуковых микроструй: 1 — $h = 175 \mu\text{m}$, 2 — $h = 130$, 3 — $h = 83.3$, 4 — $h = 65.3$, 5 — $h = 52.5$, 6 — $h = 47 \mu\text{m}$, 7 — [7], 8 — [8].

Таким образом, в работе были установлены основные характеристики сверхзвуковых плоских нерасширенных микроструй: получен размер первой бочки струи и впервые определена дальность микроструй.

Для расширения представления о структуре и поведении сверхзвуковых плоских струй микронных размеров требуется проведение дополнительных комплексных исследований.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта Правительства РФ для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных учреждениях высшего профессионального образования от 04.03.2014 г. № Z50.31.0019.

Список литературы

- [1] *Scroggs S.D., Settles G.S.* // *Exp. Fluids*. 1996. V. 21. P. 401–409.
- [2] *Phalnicar K.A., Kumar R., Alvi F.S.* // *Exp. Fluids*. 2008. V. 44. P. 819–830.
- [3] *Анискин В.М., Маслов А.А., Миронов С.Г.* // *Письма в ЖТФ*. 2011. Т. 37. В. 22. С. 10–15.
- [4] *Aniskin V.M., Mironov S.G., Maslov A.A.* // *Microfluidics and Nanofluidics*. 2013. V. 14. Iss. 3. P. 605–614.
- [5] *Aniskin V.M., Mironov S.G., Maslov A.A.* // *Int. J. Microscale and Nanoscale Thermal and Fluid Transport Phenomena*. 2012. V. 3. N 1. P. 49–59.
- [6] *Sheeran W.J., Dosanjh S.* // *AIAA Journal*. 1968. V. 6. P. 540–542.
- [7] *Kashimura H., Masuda Y., Miyazato Y., Matsuo K.* // *J. Thermal Science*. 2011. V. 20. N 2. P. 133–138.
- [8] *Tam C.K.W.* // *J. Sound and Vibration*. 1988. V. 121–1. P. 135–147.
- [9] *Анискин В.М., Маслов А.А., Миронов С.Г.* // *Письма в ЖТФ*. 2013. Т. 39. В. 16. С. 47–54.