

03

Экспериментальное исследование дозвуковых микроструй, истекающих из плоского сопла

© В.М. Анискин^{1,2}, А.А. Маслов^{1,2}, К.А. Мухин¹

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 12 апреля 2017 г.

Выполнены эксперименты по исследованию дозвуковых ламинарных микроструй, истекающих из плоского сопла. Размер сопла составлял $83.3 \times 3600 \mu\text{m}$. Числа Рейнольдса, вычисленные по высоте сопла и средней скорости потока на срезе сопла, составляли от 58 до 154. Рабочим газом являлся воздух комнатной температуры. Определено распределение скорости и пульсаций скорости газа вдоль осевой линии струи. Показано принципиальное отличие полученных характеристик ламинарных дозвуковых микроструй от турбулентных струй макроразмера. На основе измерений пульсаций скорости показано наличие ламинарно-турбулентного перехода и определено его местоположение.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.14.44817.16502

Современная тенденция к миниатюризации технических устройств различного приложения пробуждает интерес к изучению течения жидкости и газа на микромасштабах. Поскольку реализуемые скорости жидкости и газа в этой области, как правило, невелики, то такое движение характеризуется малыми значениями чисел Рейнольдса. Дозвуковые и сверхзвуковые микроструйные течения, вследствие их

возможности применения для управления макротечениями, в струйных системах охлаждения, позиционирования микроспутников, находятся в зоне внимания [1–7].

Экспериментальных работ по исследованию турбулентных струй макроразмера, истекающих из сопел прямоугольной формы, достаточно много (см. [8] и ее ссылки). В литературе рассматривались вопросы влияния соотношения сторон сопла, числа Рейнольдса, формы сопла, наличия и отсутствия боковых стенок и другие на характер распространения турбулентной струи. По характеру поведения скорости на осевой линии турбулентной макроструи выделяют три основные области: первая — область потенциального течения, где скорость струи не изменяется вдоль осевой линии; вторая — характерная область струи, где темп падения скорости пропорционален $(x/h)^{-0.5}$ (x — расстояние от среза сопла, h — высота сопла) и третья — область, где струя становится квазисимметричной и темп падения скорости пропорционален $(x/h)^{-1}$. Экспериментальных работ по исследованию дозвуковых ламинарных микроструй, истекающих из сопел прямоугольной формы, единицы [4,5]. В данных работах использовалось сопло высотой 50 и длиной 2000 μm . Часть результатов данных работ, в частности распределение скорости вдоль осевой линии струи, вызывает сомнение в достоверности. Существует ряд работ, объединенных в монографию [6] и посвященных устойчивости микроструй при различном воздействии на них. Однако в них отсутствуют данные по основным характеристикам свободных струй.

Целью данной работы является расширение представления о поведении плоских струй на микромасштабе и определение их основных характеристик: распределение скорости и пульсаций скорости газа вдоль осевой линии струи при различных числах Рейнольдса.

На основе технологии, разработанной в [1], изготовлено двумерное микросопло. Сопло имело цилиндрическую форкамеру диаметром 4 mm и клиновидно сужающуюся сопловую часть. Высота сопла h составляла 83.3 μm , ширина сопла w — 3823 μm . Соотношение сторон $h/w = 46$.

Исследование дозвуковой микроструи осуществлялось с помощью термоанемометра. Датчик термоанемометра имел длину вольфрамовой нити 200 μm и диаметр 2 μm . Тарировка датчика проводилась на специально изготовленной для этой цели миниатюрной аэродинамической трубе, располагавшейся рядом с микросоплом. Диаметр выходного

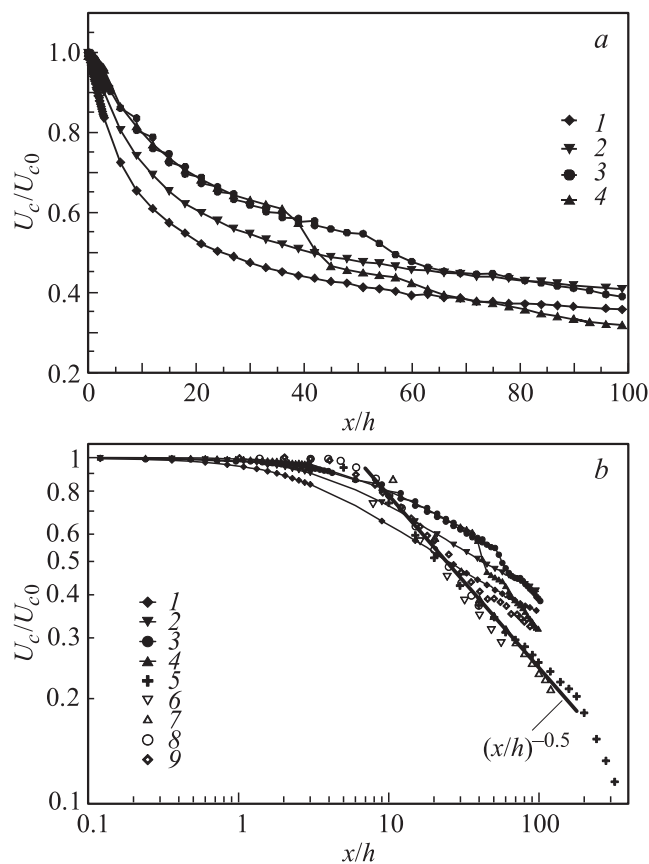


Рис. 1. Распределение скорости газа вдоль осевой линии струи в линейном (a) и логарифмическом (b) масштабах. Числа Рейнольдса: 1 — 58; 2 — 88; 3 — 130; 4 — 154; 5 — 17 800, $h/w = 40$ [9]; 6 — 2770, $h/w = 40$ [10]; 7 — 30 000, $h/w = 38.5$ [11]; 8 — 81 400, $h/w = 44$ [12]; 9 — 1800, $h/w = 40$ [13].

сечения трубы 5.5 mm. Тарировка датчика проводилась до и после эксперимента. Датчик термоанемометра крепился к державке (нить датчика располагалась параллельно большой оси сопла) и перемещался в пространстве вдоль осевой линии с помощью микроманипулятора

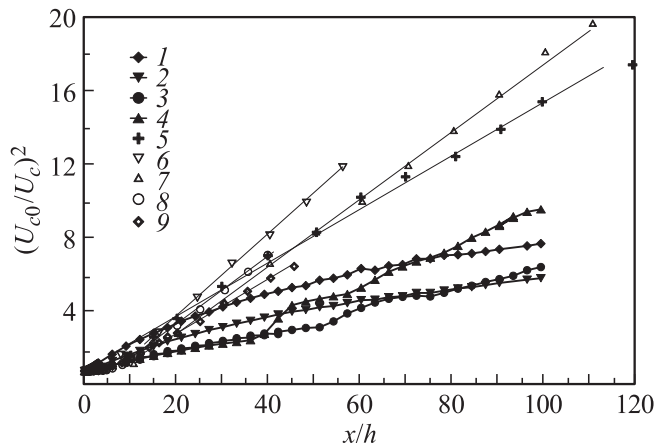


Рис. 2. Темп падения скорости на осевой линии струи (обозначения кривых в подписи к рис. 1).

Narishige NT-88E в диапазоне расстояний x/h от 0 до 100. Положение датчика контролировалось с помощью стереоскопического микроскопа Nikon SMZ1500. Использовался воздух комнатной температуры в качестве рабочего газа. Поток газа задавался регулятором расхода Bronkhorst EL-Flow. Средняя скорость газа на срезе сопла составляла от 11 до 28.7 м/с. Максимальное число Рейнольдса, достигнутое в экспериментах, определялось максимальным значением регулятора расхода и составляло 154. Дозвуковая струя истекала в атмосферу, боковые стенки у струи отсутствовали.

На рис. 1 приведено распределение скорости газа вдоль осевой линии струи в линейном и логарифмическом масштабах. Здесь U_c — скорость газа на осевой линии, U_{co} — скорость газа на срезе сопла. При $Re = 58$ и 88 (рис. 1, *a*) наблюдается плавное изменение скорости во всем исследованном диапазоне x/h , в то время как при $Re = 130$ и 154 видны участки различного темпа изменения скорости. На рис. 1, *b* показаны те же данные, но в логарифмическом масштабе и в сравнении с данными турбулентных макроструй [9–14]. Необходимо отметить, что если для турбулентных макроструй область потенциального течения составляет 5–6 калибров сопла, то для микроструй, в зависимости от числа Рейнольдса, эта область изменяется от 3 до 0.4

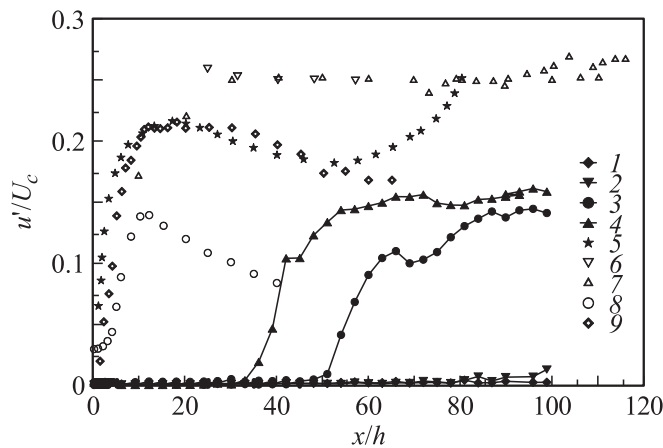


Рис. 3. Уровень турбулентности на осевой линии струи. 5 — [14], $h/w = 40$, $Re = 3700$ (обозначения остальных кривых в подписи к рис. 1).

калибров. Это приводит к тому, что на начальном участке микроструи ($0 < x/h < 10-20$) скорость падает несколько быстрее, чем в случае турбулентной струи.

Несмотря на различные числа Рейнольдса, для турбулентных струй имеется область падения скорости, характеризующаяся наклоном $(x/h)^{-0.5}$ (рис. 1, *b*). Темп падения скорости турбулентных струй принято характеризовать тангенсом угла наклона зависимости $(U_{co}/U_c)^2$ от x/h . Такая зависимость приведена на рис. 2. Видно, что для турбулентных струй существует разброс по углу наклона зависимости $(U_{co}/U_c)^2$ от x/h , объясняемый главным образом различными типами сопел и различным начальным уровнем турбулентности. Однако для ламинарных микроструй темп падения скорости совершенно иной. Он характеризуется существенной нелинейностью и ярко выраженной зависимостью от числа Рейнольдса: чем меньше число Рейнольдса, тем интенсивнее падение скорости на осевой линии. В целом темп падения скорости ламинарных микроструй значительно меньше, чем турбулентных (исключая начальную область струи $0 < x/h < 10-20$, где проявляется малая величина области потенциального течения).

На рис. 3 представлен уровень турбулентности вдоль осевой линии струй. Видно, что на выходе из сопла уровень турбулентности в

микроструях практически на порядок меньше, чем для турбулентных макроструй. Низкий уровень турбулентности характерен для ламинарных течений. Когда число Рейнольдса составляет 154, при $x/h \cong 36$ происходит резкий рост уровня турбулентности, приводящий впоследствии к турбулизации микроструи. Именно при значении $x/h \cong 36$ происходит заметное изменение темпа падения скорости струи (рис. 1, *a*). При $x/h > 63$ уровень турбулентности практически не меняется. Таким образом, при $Re = 154$ можно выделить три области: область ламинарного течения микроструи ($x/h < 36$), область ламинарно-турбулентного перехода ($36 < x/h < 63$) и область турбулентного течения микроструи ($x/h > 63$). Все три области прослеживаются на темпе падения скорости на осевой линии струи (рис. 1, *a*).

При $Re = 130$ также наблюдается ламинарно-турбулентный переход, начало которого характеризуется резким ростом уровня турбулентности, и происходит он дальше от среза сопла, при $x/h \cong 53$. Из графика ясно, что область турбулентного течения струи начинается за пределами диапазона измерений.

Положение ламинарно-турбулентного перехода в зависимости от числа Рейнольдса, определенное термоанемометрическими измерениями в данной работе, согласуется с данными работы [7], в которой положение ламинарно-турбулентного перехода в мини- и микроструях определялось методами визуализации течения: PIV- и LIF-методами.

При $Re = 88$ в конце исследованного диапазона расстояний наблюдается незначительный рост уровня турбулентности, связанный, по видимому, также с началом ламинарно-турбулентного перехода. При $Re = 58$ струя остается ламинарной во всем диапазоне достигнутых расстояний x/h .

Таким образом, в работе показано существенное отличие поведения плоских микроструй от турбулентных макроструй. Выявлено, что в целом темп падения скорости микроструй меньше, чем макроструй, что позволяет микроструям переносить свой импульс на большее относительное расстояние. Значительное изменение уровня турбулентности вдоль осевой линии позволяет определить области ламинарного, переходного и турбулентного течений. Для расширения представления о структуре и поведении ламинарных струй микронных размеров требуется проведение дополнительных комплексных исследований.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 17-19-01157.

Список литературы

- [1] *Aniskin V.M., Mironov S.G., Maslov A. A., Tsyryulnikov I. S.* // Microfluid. Nanofluid. 2015. V. 19. I. 3. P. 621–634.
- [2] *Анискин В.М., Маслов А.А., Миронов С.Г.* и др. // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. В. 10. С. 97–103.
- [3] *Aniskin V.M., Mironov S.G., Maslov A.A.* // Microfluid. Nanofluid. 2013. V. 14. I. 3. P. 605–614.
- [4] *Gau C., Shen C.H., Wang Z.B.* // Phys. Fluids. 2009. V. 21. Art. № 092001.
- [5] *Chang C.J., Shen C.H., Gau C.* // Nanoscale Microscale Thermophys. Eng. 2013. V. 17. P. 50–68.
- [6] *Грек Г.Р., Козлов В.В., Литвиненко Ю.А.* Устойчивость дозвуковых струйных течений и горение. Новосибирск, 2013. 240 с.
- [7] *Анискин В.М., Леманов В.В., Маслов Н.А.* и др. // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. В. 1. С. 94–101.
- [8] *Deo C.R.* Experimental Investigations of the Influence of Reynolds Number and Boundary Conditions on a Plane Air Jet. PhD Thesis, 2005.
- [9] *Sforza P.M., Steiger M.H., Trentacoste N.* // AIAA J. 1966. V. 4. N 5. P. 800–806.
- [10] *Bashir J., Uberoi M.S.* // Phys. Fluids. 1975. V. 18. N 4. P. 405–410.
- [11] *Gutmark E., Wygnanski I.* // J. Fluid Mech. 1976. V. 73. N 3. P. 465–495.
- [12] *Hussain A.K.M.F., Clark A.R.* // Phys. Fluids. 1977. V. 20. N 9. P. 1416–1426.
- [13] *Deo R.C., Mi J., Nathan G.J.* // Exp. Thermal Fluid Sci. 2007. V. 31. P. 825–838.
- [14] *Sfeir A.* // AIAA J. 1979. V. 17. N 10. P. 1055–1060.