УДК 533.17

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУЙ

© 2011 г.

В.В. Леманов, В.И. Терехов, К.А. Шаров, А.А. Шумейко

Институт теплофизики СО РАН им. С.С. Кутателадзе, Новосибирск

lemanov@itp.nsc.ru

Поступила в редакцию 24.08.2011

Экспериментально исследованы поля скоростей круглой и плоской изотермических микроструй воздуха, вытекающих в затопленное воздушное пространство. Измерения выполнены методом трассерной визуализации (PIV-метод) и с помощью термоанемометра. Получена пространственная картина формирования и распада ламинарной части струи и перехода к турбулентности. Показано, что длина ламинарной зоны круглой струи достигает значений $L/d_0 = 80–120$, при этом число Рейнольдса составляет $\mathrm{Re} = 600–3000$. Такая аномальная «дальнобойность» объясняется изменением профиля скорости по длине ламинарной части круглой струи: на срезе сопла – профиль скорости Пуазейля, далее, вниз по потоку, сначала он соответствует теории Бай-Ши-и, а затем заметно отклоняется от теории. Для плоской струи расстояние до зоны перехода значительно меньше, чем для круглой струи. Измеренные характеристики в турбулентной части струй хорошо согласуются с известными данными других авторов.

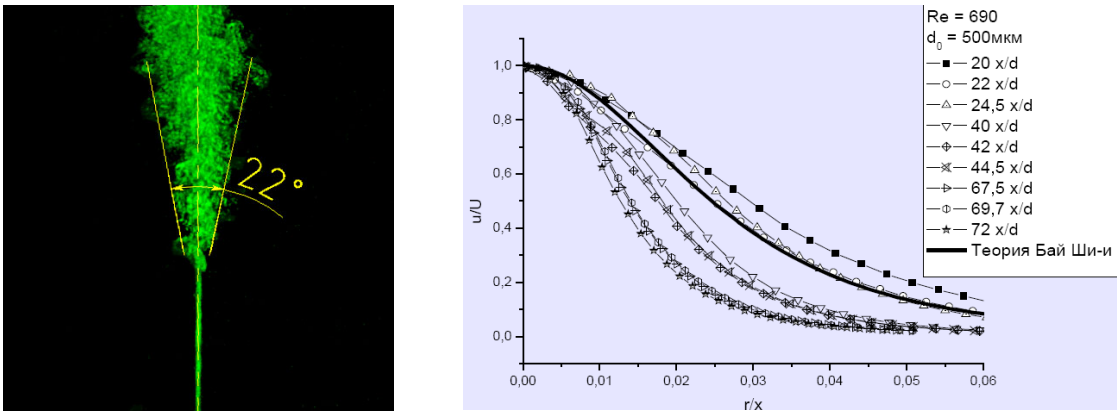
Ключевые слова: микроструи, неустойчивость, ламинарно-турбулентный переход, метод цифровой трассерной визуализации, турбулентность, визуализация.

Введение

С 90-х годов XX века наблюдается повышенный интерес к изучению микроструй, что связано с бурным развитием микро- и нанотехнологий, например, в качестве актюаторов в МЭМС-устройствах [1]. В настоящее время достаточно хорошо изучены жидкие микроструи со свободной границей раздела [2], газовые «синтетические» струи (с гармоническим законом вдува–отсоса) для управления пограничным слоем [1]. Появились первые работы по изучению ламинарно-турбулентного перехода в микроструях [3–6]. Целью настоящего исследования является экспериментальное изучение круглой и плоской микроструй с использованием PIV-метода (particle image velocimetry). Измерение мгновенных полей скоростей производилось с помощью 2D PIV-системы «ПОЛИС» (разработка Института теплофизики СО РАН), подробные характеристики смотри в [7]. Круглые микроструи формировались с помощью стеклянных каналов диаметром $d_0 = 500$, 1000 мкм и длиной $100d_0$. Плоский канал образован двумя стеклянными пластинами размерами 16×70 мм и имеет высоту $d_0 = 600$ мкм. Струя воздуха вытекала в затопленное воздушное пространство – камеру из оргстекла размером 150×150×400 мм. Визуализация течения и PIV-измерения выполнялись с помощью генератора водного аэрозоля. Также проводились измерения термоанемометром DISA55M с миниатюрным зондом DISA55P11. Диапазон чисел Рейнольдса составил $\mathrm{Re} = U_0 d_0/\nu = 300×3000$.

Результаты и обсуждение

На первом этапе были выполнены опыты по визуализации течения в микроструях с помощью PIV-системы. Так, на рис. 1*а* представлена картина течения в зоне ламинарно-турбулентного перехода круглой струи ($d_0 = 1000$ мкм, $\mathrm{Re} = 1320$). На рисунке видно, как ламинарное течение разрушается и быстро переходит в турбулентное. Угол раскрытия струи на турбулентном участке составляет 20–24°, что соответствует данным других авторов. В то же время угол раскрытия в ламинарной части составляет 1–2°, что существенно меньше, чем предсказывает теория. Такое «аномальное» поведение подтверждается и профилями скорости по длине ламинарной струи, представленными на рис. 1*б*. Скорость в текущей точке u нормирована к скорости на оси в данном сечении U, радиус r – на расстояние до начала струи x. Первоначальное распределение скорости Пуазейля на выходе из канала достаточно быстро преобразуется к струйному и хорошо согласуется с теорией, и затем вниз по потоку заметно отклоняется от теории. При этом зона перехода лежит на расстоянии $x/d \approx 90$. Поля скоростей, измеренные PIV-методом, представили пространственную картину формирования ламинарной зоны и перехода к турбулентности.



а) *б*)

Рис. 1

Расположение зоны ламинарно-турбулентого перехода в плоской струе, зарегистрированной с помощью визуализации, также подтверждено измерениями с помощью термоанемометра. Оно соответствует максимуму пульсаций скорости. Координаты L зоны перехода в струях представлены на рис. 2.

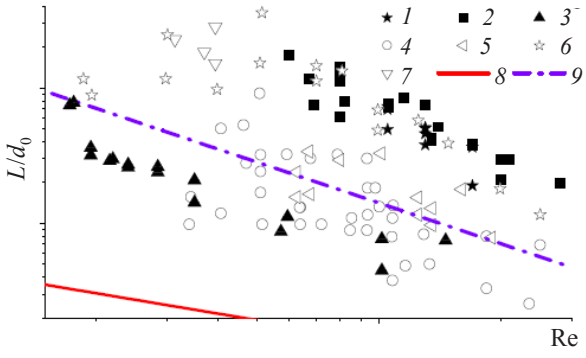


Рис. 2

Как видно, полученные значения заметно расслаиваются для круглых (*1*, *2*) и плоских (*3*) струй. Длина ламинарной зоны в круглых струях примерно в два раза больше, чем в плоских. Так, координата зоны ламинарно-турбулентного перехода для круглой струи может достигать $L/d_0 = 80–120$, при этом число Рейнольдса составляет $\mathrm{Re} = 600–3000$. Значения, полученные из опыта для плоской струи, согласуются с данными из [3] (линия *9*, высота сопла 50–360 мкм). Данные для круглых струй разных авторов заметно расслаиваются. Самые высокие значения длины ламинарной части струи достигают $L/d_0 > 300$ (Reynolds A.J., 1962, точки *7*), наиболее низкие значения длины – $L/d_0 < 20$ (Becker H.A., Massaro T.A., 1968, линия *8*). Необходимо заметить, что большинство авторов, за исключением авторов статьи [3], определяло длину ламинарной части струи по фотографиям, полученным в результате визуализации течения в струях.

Изучалась также турбулентная зона затопленных микроструй. Измерялись продольные и поперечные составляющие средней скорости, нормальные и касательные напряжения Рейнольдса. Проводилось сопоставление PIV-измерений с термоанемометрическими данными. Анализ полученных результатов показал, что характеристики на турбулентном участке струи соответствуют известным опытным данным для турбулентных струй. Так, профили средней скорости, продольных и поперечных пульсаций скорости, касательных напряжений хорошо согласуются с опытами Lumley J.L. (1993) для больших чисел Рейнольдса.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант №10-08-00105).

Список литературы

1. Ho C.M., Tay Y.C. //Annu. Rev. Fluid Mech. 1998. V. 30 P. 579.

2. Squires T.M., Quake S.R. // Rev. Mod. Phys. 2005. V. 77. P. 977.

3. Gau C. et al. // Phys. Fluids. 2009. V. 21. P. 092001.

4. Фомин В.М. и др. // Докл. РАН, 2010. Т. 433. С. 635.

5. Козлов В.В. и др. // Вестн. НГУ. 2010. Т. 5. С. 28.

6. Koller-Milojevic D., Schneider W. // Fluid Dyn. Res. 1993. V. 12. P. 307.

7. Терехов В.И. и др. // Теплофизика и аэромеханика. 2008. Т. 15. С. 427.

EXPERIMENTAL STUDY OF MICROJETS

V.V. Lemanov, V.I. Terekhov, K.A. Sharov, A.A. Shumeyko

Velocity fields of round and plane isothermal micro-jets of air flowing into a submerged air space are experimentally investigated. The PIV-method and a thermal anemometer were used for the measurements. A 3D-picture of the formation and break-down of the laminar part of the jet and of the transition to turbulence is obtained. The length of the laminar zone of the round jet is shown to reach the values of $L/d_0 = 80–120$, with Reynolds numbers of $\mathrm{Re} = 600–3000$. Such an abnormal «long range» is explained by the change in the velocity profile along the laminar part of the round jet: at the mouth of the nozzle it is Poiseuille's velocity profile, and further down the stream it first corresponds to Bay-Shi-I theory and then noticeably deviates from it. For the plane jet, the distance to the transition zone is considerably smaller than for the round one. The measured characteristics in the turbulent part of the jets agree well with the data published by other authors.

Keywords: microjets, instability, laminar-turbulent transition, particle image velocimetry, turbulence, visualization.