

УДК 533.6

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ
ДОЗВУКОВЫХ ГАЗОВЫХ МИКРОСТРУЙ
К АКУСТИЧЕСКИМ ВОЗМУЩЕНИЯМ**

© 2011 г.

*И.С. Цырюльников*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск,
Новосибирский госуниверситет

tsivan@ngs.ru

Поступила в редакцию 15.06.2011

Приведены результаты экспериментального исследования устойчивости и ламинарно-турбулентного перехода в плоской дозвуковой гелиевой микроструе, истекающей в атмосферу, как для естественных возмущений, так и для контролируемых периодических акустических воздействий на микрострую. Получены данные визуализации среднего и мгновенного поля течения шлирен-методом и методом PIV. Измерены характеристики пульсаций массового расхода, методом биспектрального анализа получены данные о нелинейном взаимодействии возмущений на этапе ламинарно-турбулентного перехода в микроструе.

Ключевые слова: устойчивость, ламинарно-турбулентный переход, микроструя, биспектральный анализ.

В последние годы наблюдается растущий интерес к изучению высокоскоростных дозвуковых и сверхзвуковых газовых микроструй в силу потенциальной возможности их использования в микрореактивных двигателях, в микроустройствах пневмоники, для охлаждения элементов микроэлектроники и для активного управления газодинамическими течениями [1, 2]. Принципиальной проблемой микротечений и, в частности, микроструй является роль масштабного фактора в ряде явлений, наблюдаемых в макроскопических струях. Это, в частности, касается развития неустойчивости сдвигового течения и восприимчивости струйного течения к акустическому воздействию. Решение этой проблемы может быть получено в исследованиях среднего течения и характеристик пульсаций в газовых струях, истекающих из микросопел различного размера в диапазоне от долей миллиметра до нескольких микрон и сопоставления полученных данных с результатами для макроскопических сопел.

В настоящем исследовании впервые представлены экспериментальные результаты развития естественных и контролируемых возмущений в плоской дозвуковой микроструе гелия.

Развитие естественных и искусственных возмущений изучалось в микроструе гелия, истекающего в атмосферу из щелевого звукового сопла шириной $h = 17$ мкм и длиной 1.875 мм. Размер шероховатостей кромки сопла составлял

величину $\cong 1$ мкм. Использование гелия позволило визуализировать шлирен-методом поле микротечения за счет большой разницы в показателе преломления между гелием и воздухом. Величина P_0/P_a варьировалась в пределах от 1.027 до 1.1, что соответствует истечению дозвуковой струи с начальной скоростью $u_0 = 176 \div 345$ м/с. При этом число Рейнольдса струи, вычисленное по ширине сопла и скорости на его срезе, изменялось в пределах 28÷55, что соответствует истечению ламинарной струи.

Возмущения массового расхода в микроструе измерялись термоанемометром постоянного сопротивления А.А. Lab Ltd в диапазоне частот до 50 кГц. На низкоскоростном участке струи на расстоянии 1.5÷20 мм от среза сопла были получены характеристики собственных возмущений микроструи и возмущений возникающих при воздействии на нее монохроматических акустических волн интенсивностью L до 125 дБ в диапазоне частот $f = 4 \div 20$ кГц. Акустические волны создавались динамиком, расположенным вблизи струи, направленность излучения которого была нормальна к длине сопла. При использовании внешнего акустического воздействия шлирен-визуализация течения осуществлялась со стробоскопическим источником света, что позволило получить осредненные картины струйного течения, соответствующие определенной фазе акустических колебаний.

Измерения полей скорости выполнялись методом PIV с помощью лазерной микродиагностической системы фирмы DANTEC. Ввод трассирующих частиц осуществлялся двумя способами: в микросопло и в окружающую микрострую атмосферу. На рис. 1 представлена шпирен-визуализация гелиевой струи без акустического воздействия (а) и с акустическим воздействием (б); $P_0/P_a = 1.024$; $f = 4.25$ кГц; $L = 115$ дБ.

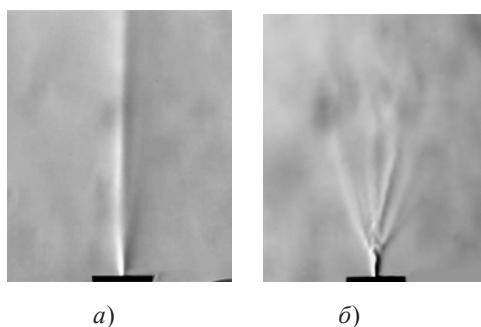


Рис. 1

Акустическое воздействие приводит к возникновению отчетливо видимых на картинах шпирен-визуализации быстрорастущих синусоидальных возмущений поля течения струи, распаду компактного потока и формированию течения с большим углом расширения, образованного несколькими отдельными струями (см. рис. 1). Максимальное расширение струи достигается при скорости истечения $u_0 \cong 200$ м/с на частоте воздействия $f = 4.25$ кГц, что соответствует числу Струхалия $3.6 \cdot 10^{-4}$. Точка расщепления и угол расширения струи слабо зависят от интенсивности звука до $L \cong 125$ дБ. Относительный уровень акустических пульсаций скорости для этой интенсивности звука не превышал величины 0.05%. Было также обнаружено, что увеличение скорости струи и частоты звука снижает эффект акустического воздействия на струю.

На рис. 2 изображены спектры пульсаций в гелиевой струе для двух расстояний от сопла $P_0/P_a = 1.024$, $f = 4.25$ кГц; $L = 125$ дБ, $1 - X = 1.5$ мм, $2 - X = 20$ мм). Анализ спектров возмущений в струе без акустического воздействия показал наличие вблизи сопла только слабых пульсаций на уровне шумов термоанемометра (рис. 2а). При удалении зонда от сопла в струе возникают широкополосные низкочастотные возмущения, амплитуда которых быстро нарастает вниз по потоку. При акустическом воздействии в струе вблизи сопла доминируют пульсации на частоте возбуждения и на частотах

гармоник (рис. 2б). При удалении от сопла в струе возникают и усиливаются широкополосные низкочастотные возмущения, которые становятся сравнимыми по амплитуде с пульсациями на частоте возбуждения. При этом в спектрах наблюдается исчезновение гармоник основной частоты возбуждения.

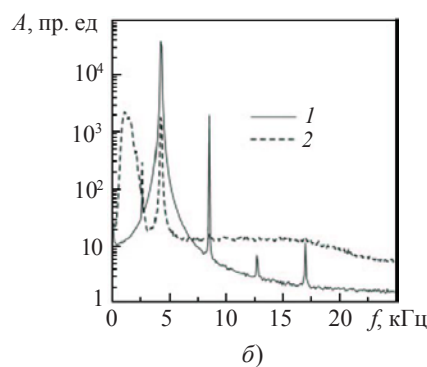
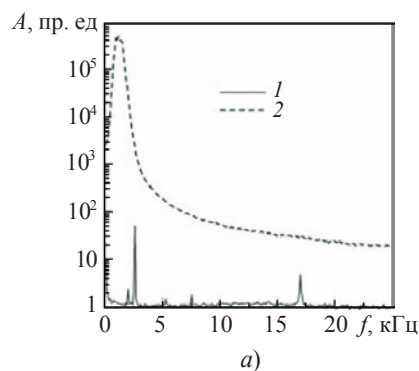


Рис. 2

Сопоставление полученных данных с результатами обширных исследований по акустическому воздействию на макроскопические струи [3] показало более высокую степень воздействия акустики на микрострую при равных значениях интенсивности звука и при существенно более низких значениях числа Струхалия.

Работа выполнена при финансовой поддержке междисциплинарного интеграционного проекта Президиума СО РАН №110 и проекта фундаментальных исследований Президиума РАН №11/10.

Список литературы

1. Lou H., Alvi F.S., Shih C. // AIAA J. 2006. V. 44, No 1. P. 58–66.
2. Kumar V., Alvi F.S. // AIAA J. 2006. V. 44, No 2. P. 273–281.
3. Гиневский А.С., Власов Е.В., Каравосов Р.К. Акустическое управление турбулентными струями. М.: Физматлит, 2001. 240 с.

**AN EXPERIMENTAL STUDY OF STABILITY OF SUBSONIC GAS MICROJETS
TO ACOUSTIC DISTURBANCES***I.S. Tsyryulnikov*

An experimental study of stability and laminar-turbulent transition of the plane subsonic helium microjet flowing into the atmosphere is performed for the natural disturbances and for the controlled periodic acoustic influence on the microjet. The data on visualization of average and instantaneous flow fields has been obtained by schlieren method and PIV method. The characteristics of the pulsations of mass flow rate are measured. The nonlinear interaction of perturbations in the stage of laminar-turbulent transition in a microjet is investigated using bispectral analysis.

Keywords: stability, laminar-turbulent transition, microjet, bispectral analysis.