

Д. А. Бунтин, А. А. Маслов, Т. А. Чимытов, А. Н. Шиплюк

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН  
ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия

Новосибирский государственный университет  
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия  
E-mail: tchimytov@gmail.com

## СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ НЕЛИНЕЙНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ПОРИСТОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ГИПЕРЗВУКОВОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования нелинейной стадии ламинарно-турбулентного перехода в гиперзвуковом пограничном слое. Эксперименты были проведены в гиперзвуковой аэродинамической трубе типа Т-326 Института теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН. В качестве модели использовался остроконечный конус с пористой поверхностью. При помощи статистического анализа сигналов, полученных с датчиков термоанемометра, показано, что характер распределений в пограничном слое коэффициентов асимметрии и эксцесса для сплошной и пористой поверхностей качественно совпадает. Одновременно с этим показано возрастание коэффициентов асимметрии и эксцесса на пористой поверхности. Из анализа профилей среднего напряжения и пульсаций среднего напряжения на датчике термоанемометра сделан вывод о задержке ламинарно-турбулентного перехода пористой поверхностью.

*Ключевые слова:* гиперзвуковое течение, устойчивость пограничного слоя, пористая поверхность, нелинейное взаимодействие, статистический анализ, коэффициент асимметрии и эксцесса.

### Введение

Исследование ламинарно-турбулентного перехода в гиперзвуковом пограничном слое является одной из фундаментальных задач в газовой динамике и одновременно имеет большую практическую ценность для развития космической техники и авиации. В настоящее время считается, что возникновение турбулентности связано с потерей устойчивости изначально ламинарного течения, по крайней мере для малых начальных амплитуд возмущений в пограничном слое. Условно процесс перехода в случае малых амплитуд возмущений может быть разделен на три основные стадии: 1) возникновение волн неустойчивости в пограничном слое (проблема восприимчивости); 2) линейное развитие возмущений (по линейной теории устойчивости); 3) нелинейное взаимодействие волн неустойчивости. Именно на последней стадии происходит

турбулизация изначально ламинарного течения.

Известно, что при гиперзвуковых течениях доминирующую роль в переходе оказывают акустические возмущения (вторая мода) [1; 2], тогда как в случае до- и сверхзвуковых скоростей доминирующими являются вихревые возмущения (первая мода – волны Толмина – Шлихтинга). В 1998 г. Малмус и Федоров предложили концепцию управления ламинарно-турбулентным переходом при гиперзвуковых скоростях потока при помощи ультразвуков поглощающих покрытий (УПП) [3]. В этой концепции предполагается, что поглощение акустической энергии при помощи таких покрытий стабилизирует вторую моду, увеличивая таким образом длину ламинарного участка течения.

В работе [4] получено первое экспериментальное подтверждение того, что пористое покрытие задерживает ламинарно-тур-

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке АВЦП «РНПВШ» № 2.1.1/3963 и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 09-08-00679).

булентный переход. В экспериментах [5], где в качестве УПП использовалась пористая поверхность с нерегулярной структурой пористости, на остром конусе методом искусственных волновых пакетов подробно исследовалась устойчивость пограничного слоя, и было показано хорошее соответствие экспериментальных данных с результатами расчетов. Аналогичные эксперименты были проведены с использованием ультразвук поглощающего покрытия с регулярной микроструктурой [6], где подавление второй моды оказалось не таким сильным, как для покрытия с хаотичной пористостью.

Первые исследования нелинейных процессов в гиперзвуковом пограничном слое были проведены в работе [7], где показано, что за счет нелинейного взаимодействия происходит генерация гармоники второй моды (волны с удвоенной частотой). Существование субгармонического резонанса на нелинейной стадии ламинарно-турбулентного перехода гиперзвукового пограничного слоя впервые обнаружено в работе [8].

В работе [9] исследовались нелинейные механизмы ламинарно-турбулентного перехода на пористой поверхности с регулярной микроструктурой. При помощи биспектрального анализа исследовались нелинейные взаимодействия волн возмущений в слое максимальных пульсаций. Было обнаружено подавление субгармонического резонанса, что следовало из подавления второй моды пористым покрытием. Одновременно с этим наблюдалось незначительное усиление нелинейных взаимодействий, связанных с первой модой.

Во всех предыдущих работах для определения эффектов нелинейности использо-

вался биспектральный анализ. В данной работе исследуется нелинейная стадия перехода на пористой поверхности с регулярной структурой методом статистического анализа.

### Экспериментальное оборудование

Эксперименты проводились в гиперзвуковой аэродинамической трубе баллонно-эжекторного типа Т-326 Института теоретической и прикладной механики имени С. А. Христиановича СО РАН с диаметром профилированного сопла 200 мм. Число Маха набегающего потока составляло  $M = 6$ , давление в форкамере  $P_0 = 10^6$  Па, и температура в форкамере  $T_0 = 390$  К. В ходе эксперимента значения параметров  $P_0$  и  $T_0$  поддерживались постоянными с погрешностью 0,06 и 0,25 % соответственно.

Пульсации массового расхода измерялись термоанемометром постоянного тока, работающим в диапазоне частот от 0 до 500 кГц. Датчики термоанемометра были изготовлены из вольфрамовых проволок длиной 1 мм и диаметром поперечного сечения 5 мкм. Перегрев нити составлял около 0,4, поэтому считалось, что датчик чувствителен только к пульсациям массового расхода, коэффициент чувствительности принимался равным 0,25.

Постоянная и переменная компоненты сигнала термоанемометра записывались при помощи двух 12-битных аналого-цифровых преобразователей в память компьютера. Частота оцифровки сигнала составляла 5 МГц.

Модель (рис. 1) представляла собой стальной остроконечный конус длиной 500 мм

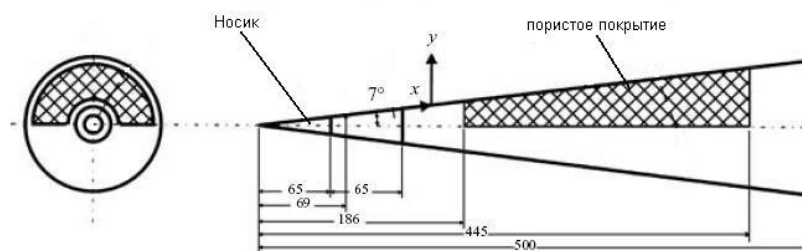


Рис. 1. Схема модели (размеры указаны в мм)

и углом полураствора  $7^\circ$ . Радиус закругления носика конуса не превышал 0,1 мм. Одна половина конуса покрыта пористым материалом, другая была сплошной. Пористое покрытие представляло собой металлический лист, перфорированный равноотстоящими друг от друга глухими цилиндрическими отверстиями с диаметром отверстий 50 мкм и расстоянием между ними около 100 мкм. Модель устанавливалась под нулевым углом атаки.

### Статистический анализ

Для определения эффектов нелинейности в работе используется следующее свойство Гауссового распределения: если распределение пульсаций с изначально Гауссовым распределением начинают существенно отклоняться от Гауссового распределения, это означает, что в системе присутствуют нелинейные взаимодействия, поскольку линейные операции над сигналом не влияют на нормальное распределение [10; 11]. Таким образом, анализируя отклонение распределения пульсаций сигнала от распределения Гаусса, можно определить, присутствуют ли в сигнале нелинейные процессы, а по степени отклонения оценить степень нелинейности. Для определения нормальности распределения полученных данных рассчитывались коэффициенты асимметрии и эксцесса [11]:

$$S = \frac{E \left\langle \left( \frac{E_{cp} - x}{\sigma} \right)^3 \right\rangle}{\sigma^3} -$$

коэффициент асимметрии,

$$K = \frac{E \left\langle \left( \frac{E_{cp} - x}{\sigma} \right)^4 \right\rangle}{\sigma^4} -$$

коэффициент эксцесса,

где  $E \left\langle \dots \right\rangle$  – функция математического ожидания;  $\sigma$  – дисперсия;  $x$  – исследуемый сигнал.

Коэффициент асимметрии характеризует отклонение от симметрии полученного распределения. Для гауссового распределения  $S = 0$ . Коэффициент эксцесса характеризует уширение (либо сужение) сигнала относительно нормального распределения. Для распределения Гаусса  $K = 3$ .

### Результаты и их обсуждения

На рис. 2 и 3 приведены графики пульсаций напряжения и среднего напряжения на

датчике термоанемометра на сплошной и пористой поверхностях конуса в трех различных положениях от носика модели  $x = 209, 215$  и  $315$  мм для сплошной поверхности;  $x = 181, 251$  и  $322$  мм для пористой поверхности). Здесь и далее поперечная координата  $y$  нормирована на толщину пограничного слоя  $\delta$ . На рис. 3 значения среднего напряжения нормированы на величину напряжения на границе пограничного слоя  $E_0$ . Из рисунков видно, что в последних сечениях ( $x = 315$  мм для сплошной поверхности и  $x = 322$  мм для пористой поверхности) профили среднего напряжения и пульсаций напряжения существенно отличаются от профилей, измеренных в первых двух сечениях. В профилях среднего напряжения (см. рис. 3) в последнем сечении нарушается автомодельность, что указывает на начало процесса ламинарно-турбулентного перехода. При этом отклонение на сплошной поверхности существенно больше, чем на пористой поверхности. Из рис. 2 видно, что слой максимальных пульсаций на сплошной поверхности в последнем сечении смещается ближе к стенке конуса на расстояние  $y/\delta = 0,6$ , что также указывает на начало процесса турбулизации пограничного слоя. В то же время для пористой поверхности слой максимальных пульсаций не смещается, однако так же, как и в случае сплошной поверхности, происходит уширение распределения пульсаций (рис. 2). Из вышесказанного следует, что и на пористой, и на сплошной поверхности в последних сечениях мы имеем дело с началом ламинарно-турбулентного перехода. Однако в случае сплошной поверхности, ламинарно-турбулентный переход находится уже на более развитой стадии.

На рис. 4 показаны графики распределения коэффициентов эксцесса и асимметрии поперек пограничного слоя на сплошной и пористой поверхностях в близких друг к другу сечениях ( $x = 209$  мм и  $x = 181$  мм соответственно). На пористой поверхности амплитуда отклонения асимметрии заметно выше, чем на сплошной поверхности. Характер поведения распределения статистических коэффициентов одинаков для обоих случаев: ниже области максимальных пульсаций коэффициент асимметрии отклоняется в отрицательную сторону, выше максимума в распределении интегральных пульсаций коэффициент отклоняется в положительную

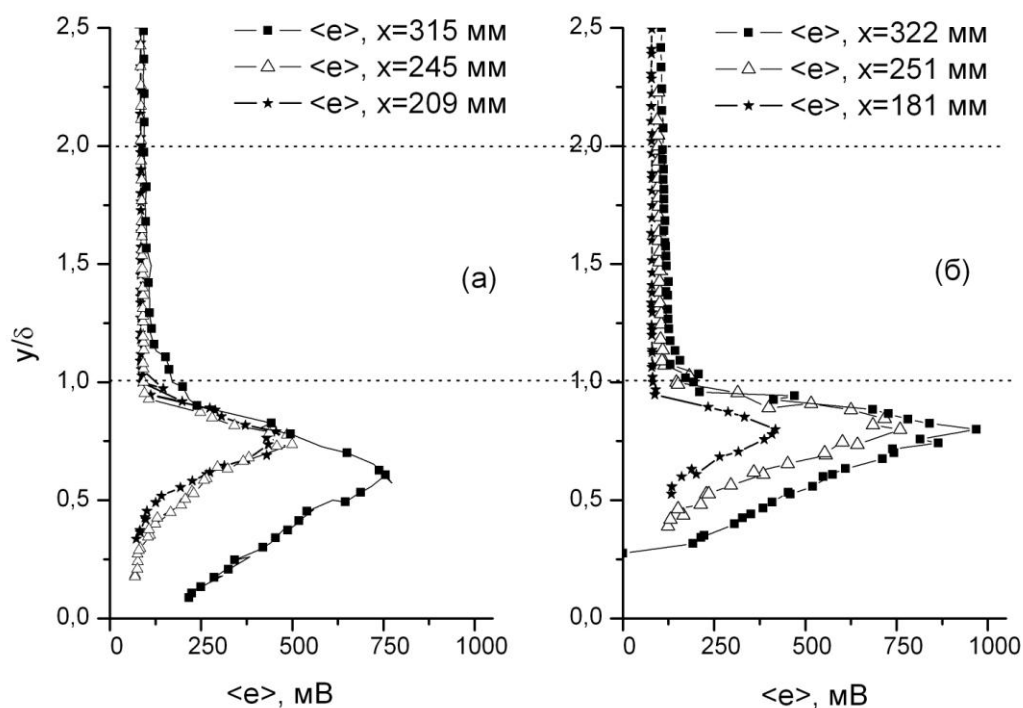


Рис. 2. График среднеквадратичных пульсаций на датчике термоанемометра в различных сечениях: а – для сплошной поверхности; б – для пористой поверхности

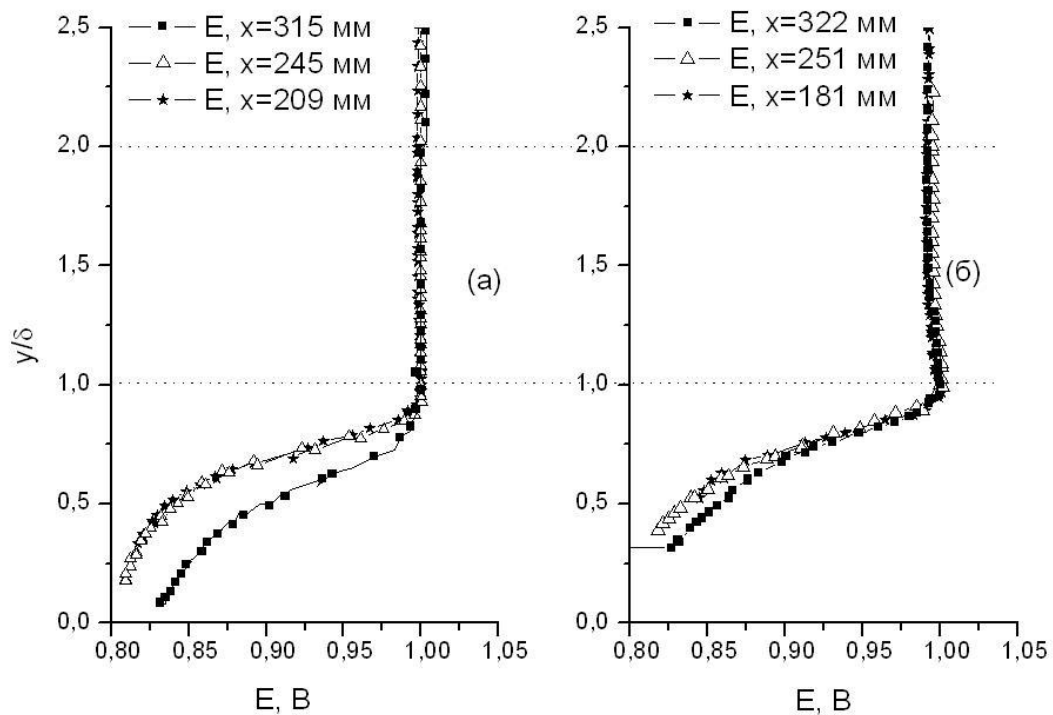


Рис. 3. График среднего напряжения на датчике термоанемометра в различных сечениях: а – для сплошной поверхности; б – для пористой поверхности

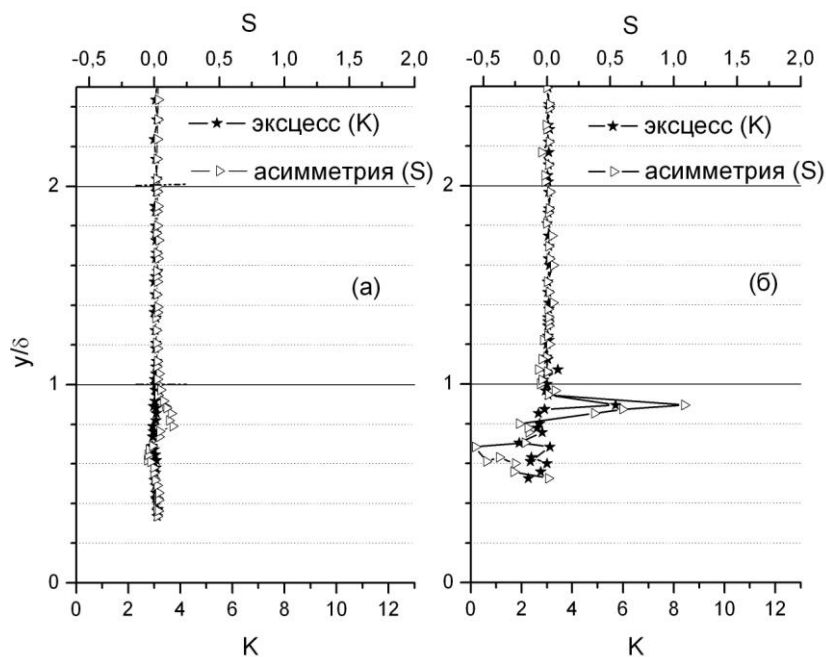


Рис. 4. Графики распределения коэффициентов эксцесса и асимметрии: *a* – на сплошной ( $x = 209$  мм); *б* – на пористой ( $x = 181$  мм) поверхности

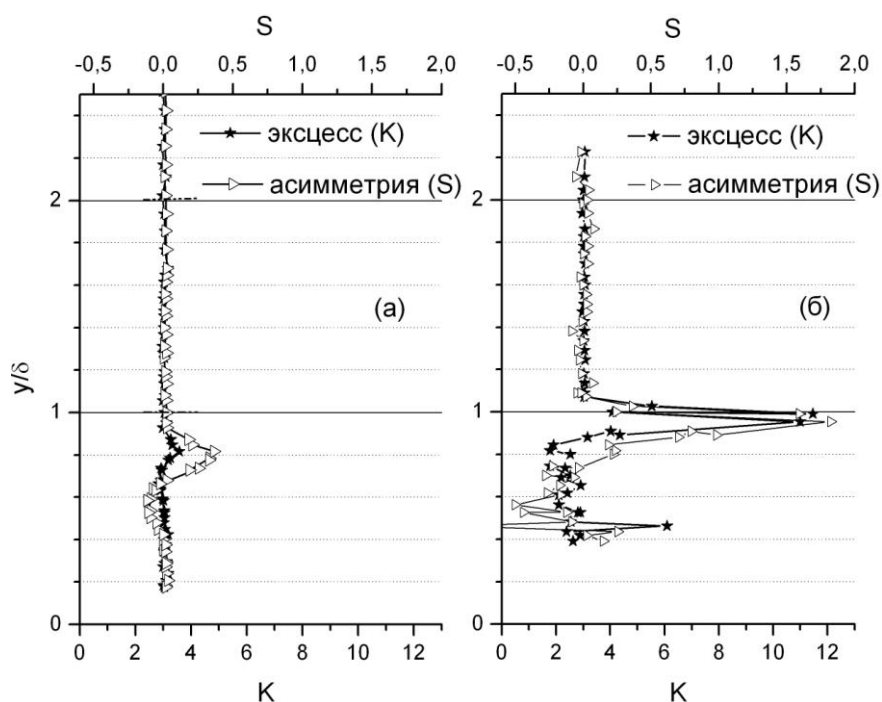


Рис. 5. Графики распределения коэффициентов эксцесса и асимметрии: *a* – на сплошной ( $x = 245$  мм); *б* – на пористой ( $x = 251$  мм) поверхности

сторону. В области слоя максимальных пульсаций коэффициент асимметрии близок к нулю. Коэффициент эксцесса остается постоянным по всей толщине пограничного слоя и соответствует распределению Гаусса.

На рис. 5 показаны графики распределения коэффициентов эксцесса и асимметрии в сечениях  $x = 245$  мм и  $x = 251$  мм для сплошной и пористой поверхностей соответственно. И на сплошной, и на пористой

поверхности наблюдается увеличение отклонения коэффициента асимметрии от распределения Гаусса. Появляется отклонение коэффициента эксцесса. Также наблюдается усиление интегральных пульсации.

На рис. 6 показаны графики распределения коэффициентов эксцесса и асимметрии, а также распределение среднего напряжения и пульсация напряжения на датчике термоманометра в сечениях  $x = 315$  мм и  $x = 322$  мм для сплошной и пористой поверхностей соответственно. Отклонения от Гауссова распределения на обеих поверхностях заметно выросли. В пограничном слое не осталось области, где статистические коэффициенты были бы равны значениям нормального распределения. Кроме того, область отклонения коэффициентов начинает выходить за границу пограничного слоя как на сплошной, так и на пористой поверхности. Однако на сплошной поверхности область отклонения простирается выше, чем на пористой поверхности. Если отклонение от нормального распределения для сплошной поверхности наблюдается вплоть до  $y/\delta = 1,6$ , то для пористой поверхности – до  $y/\delta = 1,4$  (указано стрелками на рис. 6). Выход нелинейных взаимодействий за пограничный слой свидетельствует о начале формирования турбулентного пограничного

слоя. Причем на сплошной поверхности это формирование идет быстрее, подтверждая сделанный нами ранее вывод о том, что процесс перехода задерживается пористым покрытием.

Как видно из всех графиков, распределение коэффициентов на пористой поверхности имеет разброс (даже вне пограничного слоя) в отличие от гладкого распределения на сплошной поверхности. Одной из возможных причин такого разброса является не такое хорошее отношение сигнал-шум, как при измерениях на сплошной поверхности.

### Выводы

В работе исследовались нелинейные процессы в гиперзвуковом пограничном слое на остром конусе под нулевым углом атаки. При помощи статистического анализа были проанализированы нелинейные процессы в пограничном слое.

Показано, что характер распределений в пограничном слое коэффициентов асимметрии и эксцесса для сплошной и пористой поверхностей качественно совпадает. При этом амплитуды отклонения статистических коэффициентов на пористой поверхности заметно выше, чем на сплошной поверхности.

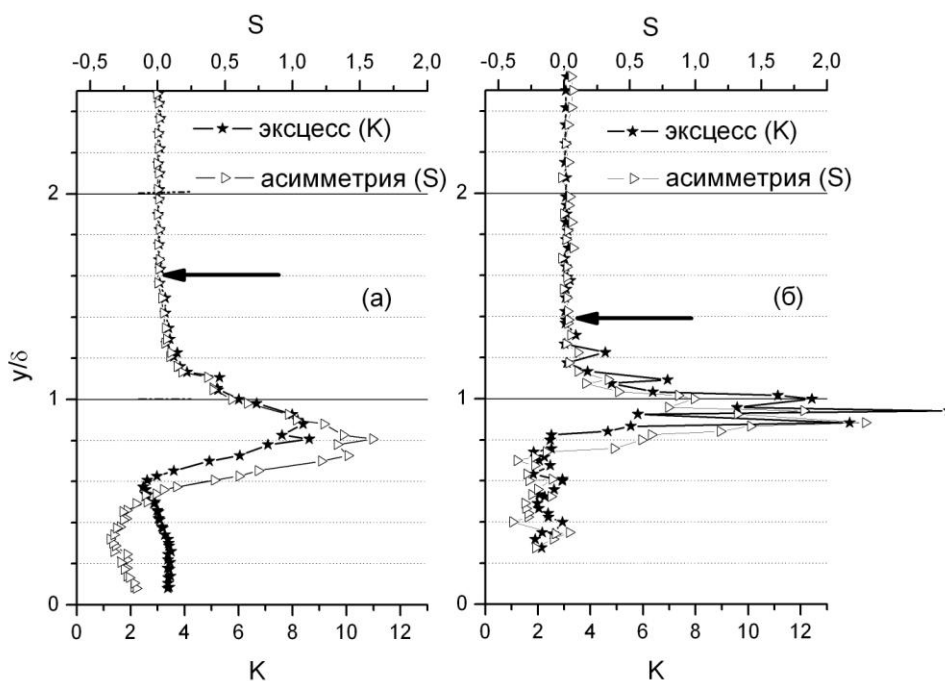


Рис. 6. Графики распределения коэффициентов эксцесса и асимметрии: а – на сплошной ( $x = 315$  мм); б – на пористой ( $x = 322$  мм) поверхности

Показано, что нелинейные процессы на обеих поверхностях выходят за границу пограничного слоя. Но на пористой поверхности формирование турбулентного слоя отстает в развитии от случая сплошной поверхности. Задержку ламинарно-турбулентного перехода пористым покрытием можно увидеть также по профилям среднего напряжения и пульсаций среднего напряжения на датчике термоанемометра. Таким образом, пористость задерживает ламинарно-турбулентный переход, при этом увеличиваются коэффициенты эксцесса и асимметрии. Для детального исследования нелинейных процессов необходимо провести биспектральный анализ.

### Список литературы

1. Mack L. M. Boundary Layer Stability Theory // JPL. Pasadena. 1969. Document 900-277. Rev. A.
2. Maslov A. A., Shipluk A. N., Buntin D. A., Sidorenko A. A. Mach 6 Boundary-Layer Stability Experiments on Sharp and Blunted Cones // AIAA J. 2006. Vol. 43. P. 71–76.
3. Malmuth N. D., Fedorov A. V., Shalaev V., Cole J., Khohlov A. Problems in High Speed Flow Prediction Relevant to Control // AIAA Paper 98-2695.
4. Rasheed A., Hornung H. G., Fedorov A. V., Malmuth N. D. Experiments on Passive Hypersonic Boundary Layer Control Using an Ultrasonically Absorptive Surface // AIAA J. 2002. Vol. 40. P. 481–489.
5. Fedorov A., Shipluk A., Maslov A., Burov E., Malmuth N. Stabilization of a Hypersonic Boundary Layer Using an Ultrasonically Absorptive Coating // J. Fluid Mech. 2003. Vol. 479. P. 99–124.
6. Fedorov A., Kozlov V., Shipluk A., Maslov A., Sidorenko A., Burov E., Malmuth N. Stability of Hypersonic Boundary Layer on Porous Wall with Regular Microstructure // AIAA Paper 2003-4147, July 2003.
7. Kimmel R. L., Kendall J. M. Nonlinear Disturbances in Hypersonic Boundary Layer // AIAA Paper 91-0320, Jan. 1991.
8. Шиплюк А. Н., Бунтин Д. А., Маслов А. А., Чокани Н. Нелинейные механизмы начальной стадии ламинарно-турбулентного перехода при гиперзвуковых скоростях // ПМТФ. 2003. Т. 44, № 5. С. 64–71.
9. Chokani N., Buntin D. A., Shipluk A. N., Maslov A. A. Nonlinear Aspects of Hypersonic Boundary-Layer Stability on a Porous Surface // AIAA J. 2005. Vol. 43. P. 149–155.
10. Popoulis A. Probability, Random Variables and Stochastic Processes. McGraw-Hill Book Company, 1965. 582 p.
11. Львовский Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул. М.: Высш. шк., 1982. 224 с.

Материал поступил в редколлегию 07.04.2009

D. A. Buntin, A. A. Maslov, T. A. Chimytov, A. N. Shipluk

### STATISTICAL ANALYSIS OF NONLINEAR PROCESSES ON A POROUS SURFACE IN A HYPERSONIC BOUNDARY LAYER

Experimental investigation of nonlinear stage of the transition to turbulence in a hypersonic boundary layer is presented. The experiments were carried out in a hypersonic wind tunnel T-326 at the Institute of theoretical and applied mechanics SB RAS. The model was a sharp cone with porous surface. Using the statistical analysis of the signals obtained by means of hot-wire it was shown that skewness and kurtosis distribution in a boundary layer on both solid and porous surface are in a qualitative agreement. At the same time the growing of skewness and kurtosis on a porous surface was shown. Analysis of mean voltage and rms voltage pulsation profiles of the hot-wire sensors showed that there is a delay of the laminar-turbulent transition on a porous surface.

*Keywords:* hypersonic flow, boundary layer stability, porous surface, nonlinear interaction, statistical analysis, skewness and kurtosis.