

## **ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЕМ ВОЗМУЩЕНИЙ В УДАРНОМ СЛОЕ НА ПЛАСТИНЕ**

Т.В. Поплавская, С.В. Кириловский, А.А. Маслов, С.Г. Миронов, И.С. Цырюльников  
Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,  
Новосибирск  
Новосибирский государственный университет, Новосибирск

## **INTERFERENCE METHOD OF CONTROL OF EVOLUTION OF DISTURBANCES IN SHOCK LAYER AT PLATE**

T.V. Poplavskaya, S.V. Kirilovskiy, A.A. Maslov, S.G. Mironov, I.S. Tsyruльников  
Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, Novosibirsk  
Novosibirsk State University, Novosibirsk

*The present paper describes comprehensive experimental and numerical investigations of evolution of disturbances generated in the hypersonic viscous shock layer on a flat plate by external acoustic waves and by perturbations introduced into the shock layer from the surface of model. The interference control of pulsations intensity is possible because both external acoustic waves and the periodic controlled disturbances introduced on the plate surface generate, in a shock layer, entropy-vorticity disturbances with identical spatial distributions and phase velocities. The principle opportunity of suppression and amplification of disturbances using simultaneous influence on the shock layer of external acoustic waves and a blowing - suction near the plate leading edge has been demonstrated numerically and in experiment.*

### **Введение**

В последние годы в мире прилагаются значительные усилия, направленные на разработку методов управления ламинарно-турбулентным переходом. Исследовательские работы по управлению ведутся в области дозвуковых, сверхзвуковых и гиперзвуковых течений. Достижение этой цели даст большую экономическую выгоду, а в случае гиперзвуковых скоростей и саму возможность создания реальной конструкции летательного аппарата. Вязкий ударный слой (ВУС) всегда формируется на передних кромках гиперзвуковых летательных аппаратов, и происходящие в нем процессы влияют на течение ниже по потоку. Изучение эволюции возмущений в ВУС важно для разработки методов управления ламинарно-турбулентным переходом.

Задача управления возмущениями может быть решена разными методами, систематизация которых наиболее полно приведена в обзоре [1]. Все методы воздействия на развитие возмущений можно разбить на две большие группы: пассивные и активные. В пассивных методах воздействию подвергается среднее течение, измененные параметры которого приводят к прекращению роста и подавлению возмущений в пограничном слое. В пассивных методах управляющее устройство приводится в действие за счет специального источника энергии. Эти методы, как правило, весьма энергоемки, так как приходится изменять параметры больших масс газа, текущих в пограничном слое. Альтернативным путем управления переходом, более эффективным с энергетической точки зрения, является воздействие на сами возмущения – активный метод. В активных методах воздействие непосредственно на возмущения приводит к изменению их амплитуды. Здесь возможен выигрыш в затратах энергии, поскольку энергия пульсаций вначале их развития составляет всего лишь малую долю энергии среднего течения в пограничном слое.

Выбор метода активного воздействия на возмущения в ПС определяется параметрами среднего течения и типом моды возмущений. При воздействии внешних возмущений на гиперзвуковой ударный слой на пластине под углами атаки менее  $15^\circ$  в последнем генерируются преимущественно энтропийно-вихревые возмущения, а акустические затухают. В этих условиях возможно применение методов активного воздействия на возмущения, апробированных для дозвуковых пограничных слоев, в частности, подавление пульсаций искусственными периодическими возмущениями, находящимися в противофазе с подавляемыми пульсациями. В работе показано экспериментально и методом прямого

численного моделирования управление интенсивностью пульсаций ВУС путем введения в ударный слой локальных контролируемых возмущений типа вдув-отсос соответствующей амплитуды и частоты в противофазе к внешним акустическим волнам, т.е. интерференционным методом.

### **Экспериментальное оборудование и методы диагностики**

Эксперименты проведены в гиперзвуковой азотной аэродинамической трубе ИТПМ СО РАН при числе Маха 21, при фиксированном единичном числе Рейнольдса  $Re_{1\infty} = 6 \cdot 10^5 \text{ м}^{-1}$ , температуре торможения  $T_0 = 1200\text{К}$  и температурном факторе  $T_w/T_0 = 0.26$ . Пластина была выполнена из низкоуглеродистой стали и в плане представляет собой трапецию длиной 240 мм, с размером передней кромки 100 мм, задней кромки – 80 мм. Толщина пластины составляла 8 мм, острая передняя кромка пластины была выполнена в виде клина углом  $7^\circ$  и радиусом притупления  $\cong 0.05$  мм. Боковые кромки пластины были также клиновидные с углом  $20^\circ$ .

Акустические возмущения внешнего потока создавались с помощью искрового разряда, контролируемые периодические возмущения вводились в ударный слой с помощью кососрезного газодинамического свистка с передней кромки пластины.

В трубных экспериментах измерялась величина средней плотности и пульсаций плотности методом электронно-пучковой флюоресценции. Этот метод, адаптированный для измерений характеристик пульсаций плотности (спектра и фазы пульсаций, фазовой скорости возмущений), подробно описан в [2].

### **Численное моделирование**

Хорошо известно [3], что в пограничных слоях при больших числах Маха наиболее неустойчивыми являются возмущения, распространяющиеся под нулевым углом к направлению основного течения. Это означает, что на ранних стадиях перехода к турбулентности течение остается двумерным. В данной работе расчетное исследование выполнено методом прямого численного моделирования с помощью программы расчета полных двумерных нестационарных уравнений Навье-Стокса, разработанной в ИТПМ СО РАН Кудрявцевым А.Н. [4].

Расчетная область представляет собой прямоугольник, часть нижней стороны которого совпадает с поверхностью пластины. Равномерная расчетная сетка состояла из  $N_x=1050$  ячеек вдоль потока и  $N_y=240$  ячеек в поперечном направлении (для нулевого угла атаки). Сначала производился расчет стационарного течения

При решении задачи взаимодействия внешних акустических возмущений с ВУС переменные на левой и верхней границе расчетной области задавались в виде суперпозиции стационарного основного течения и плоской монохроматической звуковой волны, имеющий следующий вид:

$$\begin{pmatrix} u' \\ v' \\ p' \\ \rho' \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} \pm \cos \theta \\ \mp \sin \theta \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \exp[i(k_x x + k_y y - \omega t)].$$

Здесь  $\theta$  – угол распространения внешней акустической волны,  $A$  – ее амплитуда,  $k_x = k \cos \theta$ ,  $k_y = -k \sin \theta$  – компоненты волнового вектора, связанного с круговой частотой  $\omega = 2\pi f$  дисперсионным соотношением  $k = \omega / (M_\infty \cos \theta \pm 1)$ . Здесь верхний (нижний) знак соответствует быстрой (медленной) акустической волне.

Искусственные возмущения, вводимые в эксперименте с помощью цилиндрического свистка с косым срезом, являются возмущениями типа периодического вдува-отсоса, осуществляемого локально, вблизи передней кромки пластины. При численном решении

задачи они моделировались заданием граничного условия для поперечного массового расхода на некотором участке поверхности пластины:

$$\rho v'|_{y=0} / \rho_{\infty} c_{\infty} = B \sin\left(\pi \frac{x-x_1}{x_2-x_1}\right) \sin \omega t$$

Здесь  $B$  – амплитуда,  $x_1$  и  $x_2$  – границы области, где вводилось возмущение. В остальном расчет велся так же, как в случае акустических возмущений.

### Обсуждение результатов

В [5,6] показано, что при воздействии на гиперзвуковой ударный слой пластины как внешних акустических возмущений, так и возмущений типа вдув-отсос изнутри ударного слоя, в ВУС генерируются и развиваются волны энтропийно-вихревой моды, а акустические затухают (см. рис. 1).

Пространственные структуры генерируемых возмущений при воздействии извне и изнутри ударного слоя практически подобны (Рис.2). Расчеты и измерения также показали [5], что продольные фазовые скорости возмущений, порождаемые как внешними акустическими волнами, так и источником вдув-отсос на поверхности модели, совпадают. Это позволяет при условии подбора соответствующей фазы и амплитуды вдува-отсоса реализовать интерференционную схему управления интенсивностью пульсаций в ВУС. Для нулевого угла атаки возможность такого управления была продемонстрирована численно и экспериментально [7,8].

В экспериментах в гиперзвуковом потоке мощным электрическим разрядом создаются периодические акустические волны, которые взаимодействуют с ударным слоем на пластине и порождают в нем возмущения. Кососрезный газодинамический свисток, расположенный под пластиной вблизи ее носика, также вводит в ударный слой пластины периодические возмущения давления. В случае равенства частот возмущений внешнего потока и пульсаций от свистка, при определенном соотношении их фаз возможно интерференционное подавление (усиление) пульсаций в ударном слое на пластине. На рис.3 приведены экспериментальные зависимости амплитуды пульсаций плотности на верхней границе пограничного слоя пластины  $\rho'/\rho'_{\max}$  в сечении  $x = 0.63$  от величины нормированного на

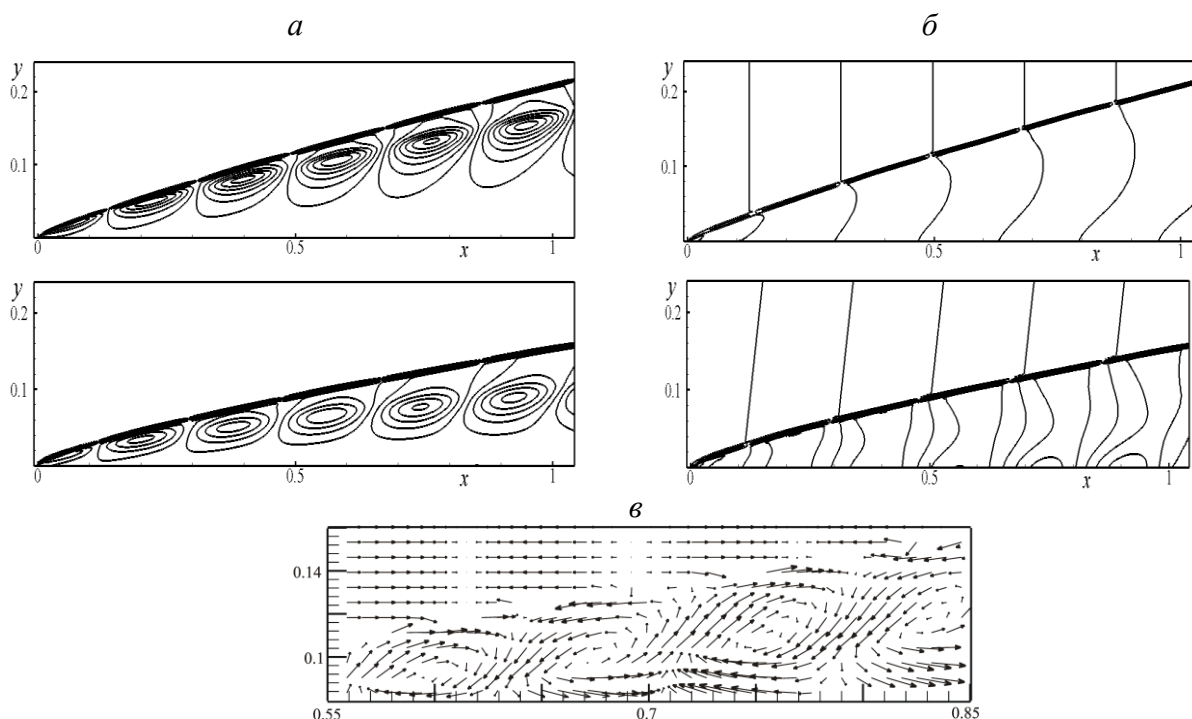


Рис.1. Расчетные поля пульсаций энтропии (а) и давления (б) в ударном слое для разных углов атаки: сверху вниз –  $\alpha = 0, 10^\circ$ ; (в) векторное поле пульсаций скорости, индуцированное внешней медленной акустической волной с  $\theta = 0^\circ$ ,  $A = 0.028$ ,  $f = 38.4$  кГц,  $M_\infty = 21$ ,  $Re_L = 1.44 \cdot 10^5$  ( $\alpha = 0^\circ$ ).

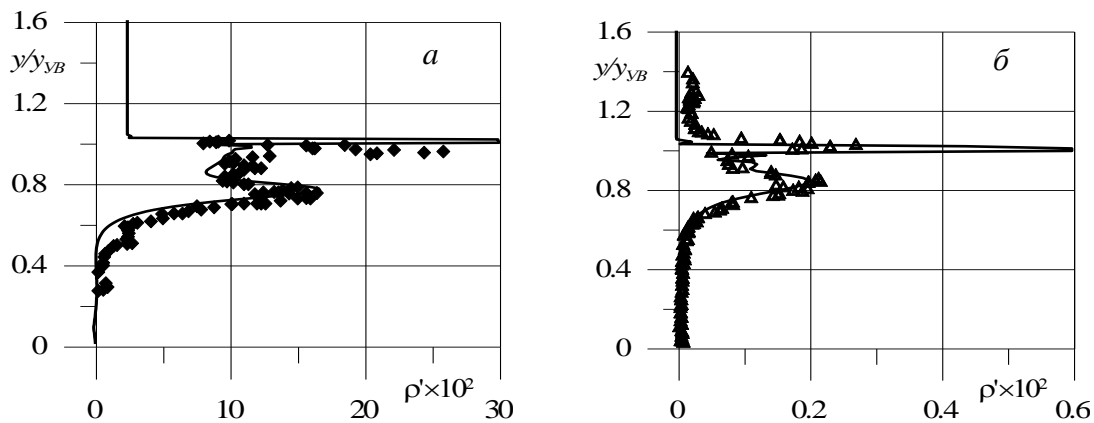


Рис.2. Распределения пульсаций плотности поперек ударного слоя для  $M_\infty = 21$ ,  $Re_L = 1.44 \times 10^5$ , генерируемые внешней акустической волной (а); генерируемые источником типа вдув-отсос (б): символы – эксперимент, сплошная кривая – расчеты  $A = 0.028$ ,  $f = 38.4$  кГц.

период колебаний временного сдвига  $\Delta\tau/T$  между пульсациями внешнего потока и возмущениями, генерируемыми кососрезным свистком. Здесь  $\rho'_{\max}$  – уровень пульсаций плотности на границе пограничного слоя при синфазном воздействии внешней акустической волны и периодических возмущений вдув-отсос. Для сравнения приведены соответствующие данные прямого численного моделирования. Видно, что соотношение амплитуд внешних и внутренних возмущений позволяет осуществить почти полное подавление возмущений в ударном слое. В численном моделировании производился подбор амплитуды и фазы вдува-отсоса, необходимых для подавления пульсаций в ВУС, следующим образом. Сначала отдельно решались задачи взаимодействия ВУС с внешней акустической волной и локализованным возмущением типа вдув-отсос при одинаковой частоте. Затем по полученным распределениям пульсаций плотности на верхней границе ПС определялись новые амплитуды и фазы начального возмущения, необходимые для подавления.

При малых углах атаки ( $\alpha \leq 15^\circ$ ) для управления энтропийно-вихревыми возмущениями в ВУС на пластине также можно использовать интерференционный метод. На рис. 4 показаны расчетные изолинии пульсаций плотности и профили среднеквадратичных пульсаций плотности при  $\alpha = 10^\circ$ . Видно почти полное подавление пульсаций на границе ПС при противофазном запуске начальных возмущений. Для иллюстрации также показано поле мгновенных пульсаций плотности при синфазном взаимодействии источников возмущений (Рис.4з,з). Видно, что амплитуда пульсаций на верхней границе пограничного слоя удваивается.

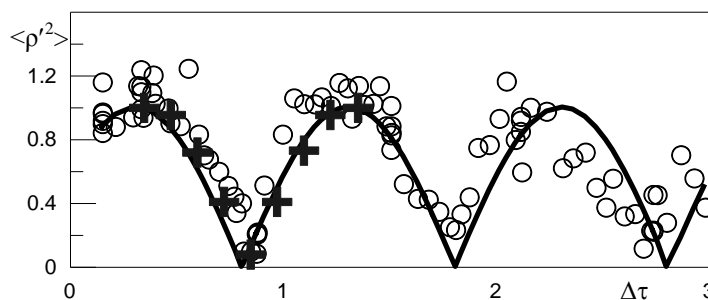


Рис.3. Нормированные амплитуды пульсаций плотности на верхней границе пограничного слоя в зависимости от времени задержки между сигналом свистка и запуском разряда для  $f = 37.5$  кГц. Точки – данные измерений, сплошная кривая – аппроксимация зависимостью для интерференции двух синусоидальных волн равной частоты и амплитуды, крестики – данные прямого численного моделирования.

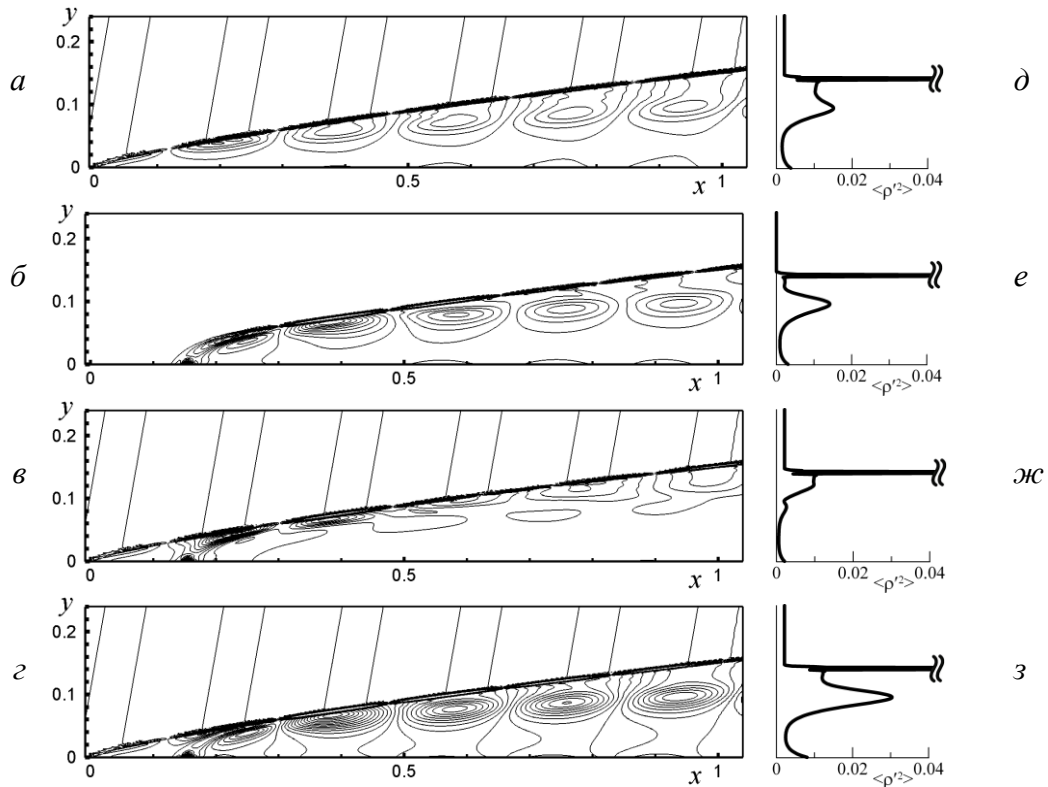


Рис.4. Изолинии мгновенных пульсаций плотности и распределения среднеквадратичных пульсаций плотности в сечении  $x=0.9$ :  $M_\infty=21$ ,  $\alpha=10^\circ$ ,  $f=38$  кГц,  $A=0.003$ ,  $B=0.06$ ,  $x_1 \div x_2 = 0.155 \div 0.17$ , (а,д)-внешняя акустическая волна  $\theta = 10^\circ$ , (б,е)-возмущения типа вдув-отсос, (в,ж)- противофазное воздействие, (г,з)-синфазное воздействие.

На рис 5. показаны среднеквадратичные амплитуды пульсаций плотности и давления на границе пограничного слоя и на поверхности пластины. В случае противофазного запуска начальных возмущений видно практически полное подавление пульсаций плотности и существенное уменьшение пульсаций давления на границе пограничного слоя.

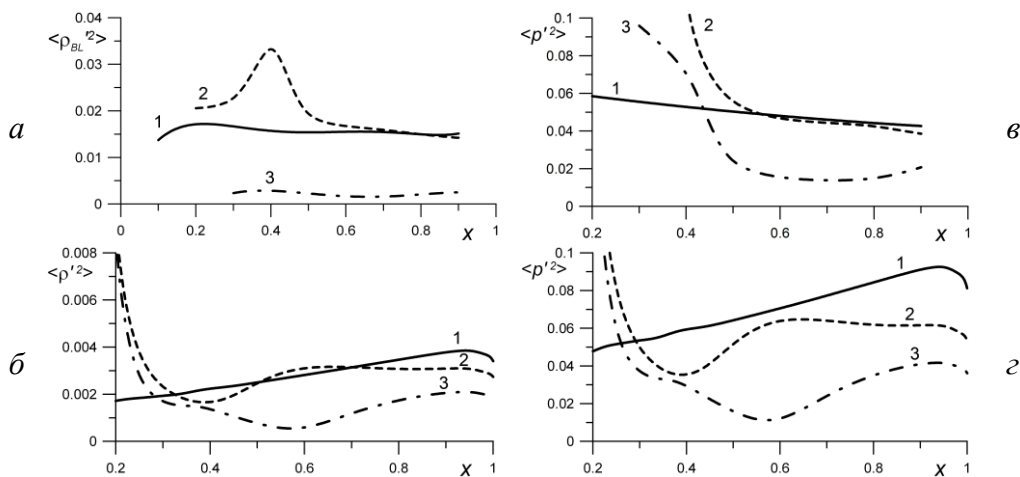


Рис.5. Амплитуды среднеквадратичных пульсаций плотности (а,б) и давления (в,г) на границе ПС (а,в) и на поверхности пластины (б,г):  $M_\infty=21$ ,  $\alpha=10^\circ$ ,  $f=38$  кГц,  $A=0.003$ ,  $B=0.06$ ,  $x_1 \div x_2 = 0.155 \div 0.17$ : 1 - акустические волны, 2 - возмущения вдув-отсос, 3 - противофазный запуск акустических волн и возмущений типа вдув-отсос.

На поверхности пластины также наблюдается снижение пульсаций плотности и пульсаций давления, но при этом амплитуды пульсаций давления все-таки нарастают вниз по потоку. Это связано с тем, что при увеличении угла атаки пластины увеличивается доля акустических возмущений внутри ВУС [6]. Видно, что в этом случае управление

интенсивностью пульсаций давления интерференционным методом оказывается менее эффективным и необходимы другие методы воздействия на возмущения, например, метод звукопоглощающих покрытий на поверхности, которые адсорбируют энергию акустических волн, или комбинированное использование обоих методов управления.

### **Заключение**

Выполнено экспериментальное и расчетное исследование развития возмущений в гиперзвуковом ударном слое на пластине под нулевыми и ненулевыми углами атаки при воздействии внешних акустических волн, а также пульсаций типа вдув-отсос от локального источника на поверхности пластины.

Показано, что при малых углах атаки ( $< 15^\circ$ ) пластины эти возмущения порождают в ударном слое пульсации преимущественно энтропийно-вихревой моды. Вдоль линии соответствующей верхней границе пограничного слоя в потоке распространяются вихри.

Показана возможность применения интерференционного метода управления: пульсации, генерируемые внешними возмущениями, могут быть подавлены вводимыми противофазными возмущениями типа вдув-отсос соответствующей амплитуды. На границе пограничного слоя достигнуто практически полное подавление возмущений и существенное ослабление пульсаций в ударном слое в целом.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (код проекта 09-08-00557), АВЦП РНПВШ 2.1.1/3963 и Программы РАН 11/9.

### **Список литературы**

1. Gad-el-Hak M. Modern development in flow control. Applied Mechanics Reviews. Vol. 49. 1996. P. 365-379.
2. Mironov S.G., Maslov A.A. An experimental study of density waves in hypersonic shock layer on a flat plate. Physics of Fluids A. Vol.12. No. 6. 2000. P. 1544-1553.
3. Гапонов С.А., Маслов А.А. Развитие возмущений в сжимаемых потоках. Новосибирск: Наука, 1980. 144с.
4. Кудрявцев А. Н., Поплавская Т. В., Хотяновский Д.В. Применение схем высокого порядка точности при моделировании нестационарных сверхзвуковых течений. Мат. Моделирование. Т. 19. № 7. 2007. С.39-55.
5. Maslov A.A., Mironov S.G., Kudryavtsev A.N., Poplavskaya T.V., Tsyryulnikov I.S. Wave processes in a viscous shock layer and control of fluctuations. J. Fluids Mech. V.650. 2010. P.81-118.
6. Маслов А. А., Миронов С. Г., Поплавская Т. В., Цырюльников И. С. Волновые процессы в ударном слое на пластине под углом атаки. ПМТФ. Т.51. N 4. 2010. С. 39-47.
7. Фомин В.М., Кудрявцев А. Н., Маслов А. А., Миронов С. Г., Поплавская Т. В., Цырюльников И. С. Активное управление возмущениями в гиперзвуковом ударном слое. ДАН. Т. 414. № 2. 2007. С.4-16.
8. Маслов А. А., Миронов С. Г., Кудрявцев А. Н., Поплавская Т. В., Цырюльников И. С. Управление возмущениями в гиперзвуковом ударном слое на пластине нестационарным воздействием с поверхности. Изв. РАН. МЖГ. № 3. 2008. С.152-161.