

# МНОГОВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ГИПЕРЗВУКОВОМ ВЯЗКОМ УДАРНОМ СЛОЕ

С.В.Кириловский, Т.В.Поплавская

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,  
Новосибирск

Новосибирский государственный университет, Новосибирск

## MULTIWAVE PROCESSES IN A HYPERSONIC VISCOUS SHOCK LAYER

S.V.Kirilovskiy, T.V.Poplavskaya

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, Novosibirsk

Novosibirsk State University, Novosibirsk

*Results of numerical simulation of the receptivity of a flat plate boundary layer at a very high Mach number and moderate Reynolds numbers to external acoustic waves and blowing-suction disturbances in the frequency spectrum is presented. Direct numerical simulations involved solving two-dimensional Navier-Stokes equations written as a system of conservation laws are solved by high-order accuracy schemes. It was found that the perturbations generated in the viscous shock layer by external acoustic waves in the frequency spectrum can be suppressed by blowing-suction disturbances of the corresponding amplitude, phase and location of the disturbance source.*

### **Введение**

Современные исследования устойчивости гиперзвукового пограничного слоя (ПС) и его восприимчивости к внешним возмущениям включают в себя изучение обтекания тел с сильным вязко-невязким взаимодействием. При больших числах Маха и умеренных числах Рейнольдса (условия, соответствующие гиперзвуковому полету на большой высоте) структура течения между поверхностью тела и головной ударной волной (УВ) представляет собой комбинацию из толстого пограничного слоя и тонкой зоны невязкого течения за УВ, так называемый вязкий ударный слой (ВУС).

Так же как и ПС, ламинарный ударный слой неустойчив. Знание механизмов, управляющих развитием возмущений в ВУС, необходимо для создания эффективных методов прогнозирования и управления ламинарно-турбулентным переходом при гиперзвуковом обтекании тел.

Ранее в работах [1,2] был предложен интерференционный метод управления интенсивностью пульсаций в ударном слое на пластине, когда пульсации, порождаемые внешними акустическими возмущениями, подавляются пульсациями, генерируемыми источником типа вдув-отсос на поверхности пластины, при соответствующем подборе их амплитуды и фазы. Реализуемость метода была продемонстрирована численно для монохроматических возмущений. В данной работе показана возможность применения интерференционного метода управления волновыми процессами в гиперзвуковом ВУС на пластине при многочастотности внешних и внутренних воздействий.

### **Постановка задачи и численная реализация**

Рассматривается гиперзвуковое обтекание плоской бесконечно тонкой пластины длиной  $L=240$  мм, расположенной под нулевым углом атаки, для числа Маха  $M_\infty=21$  и числа Рейнольдса  $Re_L = 1,44 \cdot 10^5$ . В данной работе моделируется развитие двухмерных возмущений, которые при больших числах Маха набегающего потока являются наиболее неустойчивыми. Двумерные уравнения Навье-Стокса, записанные в виде системы уравнений законов сохранения, решаются с помощью схем сквозного счета высокого порядка точности с использованием программы, созданной в ИТПМ СО РАН Кудрявцевым А.Н. [3].

Расчетная область представляет собой прямоугольник, включающий в себя область набегающего потока, УВ и ВУС на пластине. Часть нижней стороны расчетной области совпадает с поверхностью пластины, а высота расчетной области определяется так, чтобы УВ, идущая от носика пластины не взаимодействовала с верхней границей расчетной

области. В работе использовалась равномерная сетка  $1050 \times 240$  ячеек (по  $x$  и  $y$ , соответственно), размер одной ячейки  $\Delta_x = 0.001$ ,  $\Delta_y = 0.001$ .

Сначала выполнялся расчет стационарного течения. При этом на левой и верхней границах задавался равномерный гиперзвуковой поток, направленный вдоль оси  $x$ , на правой границе решение экстраполировалось изнутри расчетной области. На поверхности модели использовались граничные условия со скольжением и скачком температуры, как в [1,2].

После расчёта стационарного течения решалась задача о взаимодействии вязкого ударного слоя с внешними акустическими волнами и/или локально-периодическими возмущениями типа вдув-отсос. При численном моделировании внешних акустических возмущений переменные на левой границе расчетной области задавались в виде суперпозиции стационарного основного течения и двух или более плоских монохроматических звуковых волн с разными амплитудами и частотами:

$$U = \langle U \rangle + U' = \langle U \rangle + A_1 \exp[i(k_x x + k_y y - \omega_1 t)] + A_2 \exp[i(k_x x + k_y y - \omega_2 t)] + \dots \quad (1)$$

Локализованные возмущения типа периодического вдува-отсоса, вводимые вблизи передней кромки пластины, моделировались заданием граничного условия для поперечного массового расхода на некотором участке поверхности пластины с учетом многочастотности начального сигнала:

$$\rho v' \Big|_{y=0} / \rho_\infty c_\infty = B_1 \sin\left(\pi \frac{x-x_1}{x_2-x_1}\right) \sin \omega_1 t + B_2 \sin\left(\pi \frac{x-x_1}{x_2-x_1}\right) \sin \omega_2 t + \dots \quad (2)$$

Здесь  $A_i$  и  $B_i$  – амплитуды соответствующих начальных возмущений,  $k_x, k_y$  – компоненты волнового вектора, связанного с безразмерной частотой  $\omega_i = 2\pi f_i L / c_\infty$  дисперсионным соотношением  $k = \omega / (M_\infty \cos \theta \pm 1)$ ,  $f_i$  – размерная частота (кГц),  $c_\infty$  – скорость звука в набегающем потоке,  $\theta$  – угол распространения внешней акустической волны,  $x_1$  и  $x_2$  – границы области локализованного возмущения.

### **Воздействие возмущений одновременно на нескольких частотах**

Исследование структуры возмущений, генерируемых в ВУС двумя внешними акустическими волнами, показало, что картина течения в ударном слое аналогична случаю воздействия монохроматической акустической волны: волновые процессы происходят в области между УВ и верхней границей ПС. Пульсационные характеристики течения имеют характерный вид с двумя максимумами, больший из которых расположен на УВ, а положение второго совпадает с внешней границей пограничного слоя. В случае воздействия на ВУС двух внешних акустических волн с разными частотами картина пульсаций плотности соответствует суперпозиции двух монохроматических волн.

Однако результаты спектрального анализа пульсаций давления на границе ПС, приведенные на рис.1, показывают отличия в структуре возмущений от простой суперпозиции двух волн разной частоты. Видно, что наряду с основными частотами  $f_1 = 30$  кГц и  $f_2 = 50$  кГц и их гармониками в течении появляются комбинационные частоты – суммарные и разностные, которые также взаимодействуют друг с другом.

Аналогичные результаты получены и в случае взаимодействия ВУС с локальными периодическими возмущениями типа вдув-отсос на двух частотах  $f_1 = 30$  кГц и  $f_2 = 50$  кГц при одинаковых начальных амплитудах  $B_{1,2} = 1.0$

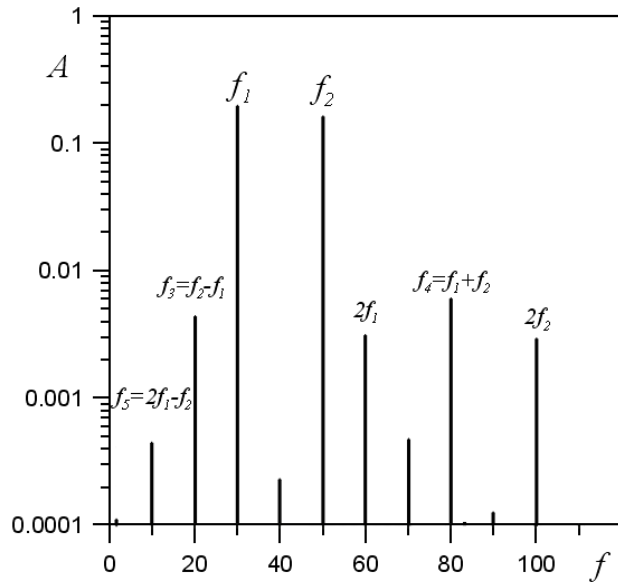


Рис.1. Спектры возмущений давления при  $x=0.5$  на границе пограничного слоя ( $y=0.08$ ) при одновременном воздействии двух акустических волн с  $f_1=30$ кГц и  $f_2=50$ кГц;  $A_{1,2}=0.02$ .

В работах [1,2] численно и экспериментально была продемонстрирована реализуемость интерференционного метода управления интенсивностью пульсаций в ударном слое на пластине для монохроматических возмущений. В данном параграфе показана возможность применения интерференционного метода управления волновыми процессами в гиперзвуковом ВУС на пластине под нулевым углом атаки в случае воздействия на ВУС двух внешних акустических волн с разными частотами. На рис. 2а и б видно качественное

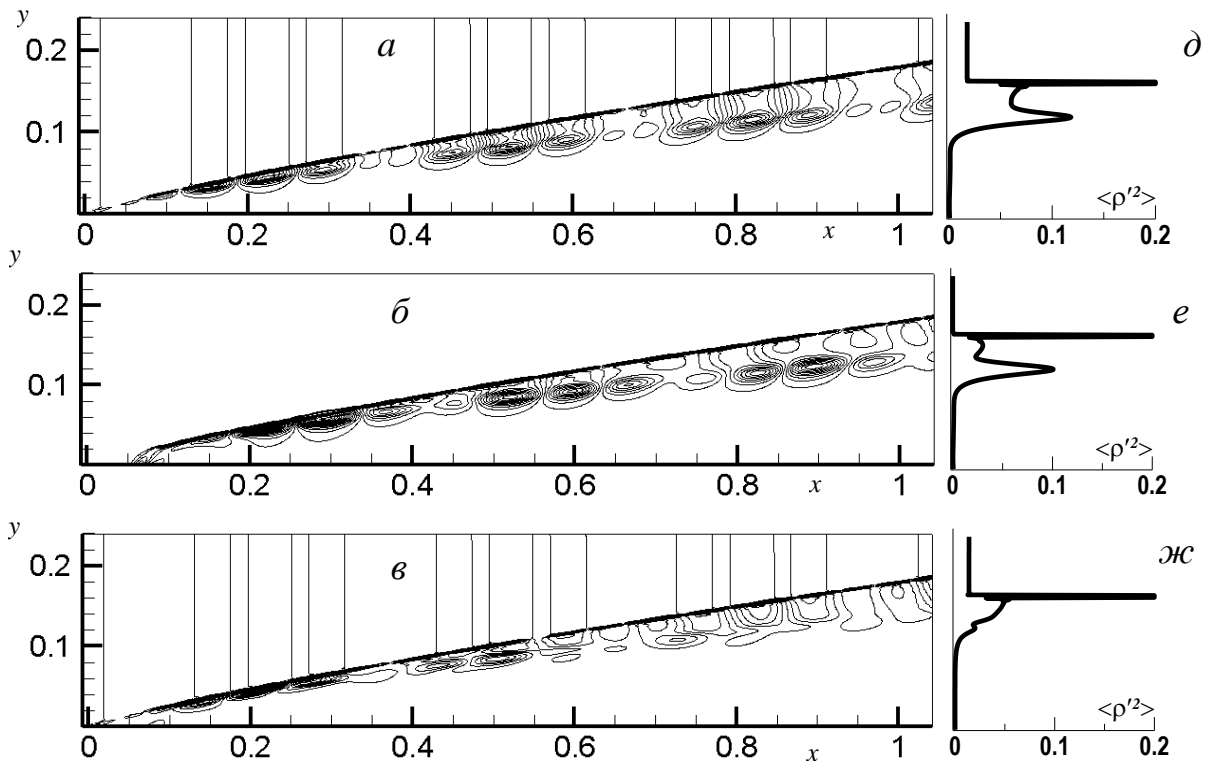


Рис.2. Поле изолиний мгновенных пульсаций плотности в ударном слое (а,б,в,з) и среднеквадратичные пульсации плотности в сечении  $x=0.9$  (д,е,ж,з) при

$$M_\infty = 21, \quad \text{Re}_L = 1.44 \times 10^5, \quad f_1 = 30 \text{кГц}, \quad f_2 = 50 \text{кГц}, \quad \theta = 0^\circ :$$

а) – суперпозиция 2-х медленных акустических волн с  $A_1 = A_2 = 0.014$ ; б) – суперпозиция 2-х локальных возмущений вдув-отсос газа с поверхности пластины с  $B_1 = B_2 = 1.0$ ; в) – противофазное воздействие.

подобие полей возмущений при воздействии на ВУС внешних акустических волн и возмущений типа вдув-отсос одновременно на двух частотах. Отсюда, очевидно, следует, что пульсации, генерируемые внешними возмущениями, могут быть подавлены вводимыми искусственными возмущениями при условии подбора соответствующей фазы и амплитуды вдува-отсоса для каждой монохроматической волны. На рис.2с показано поле изолиний мгновенных пульсаций плотности в ударном слое пластины при совместном воздействии двух внешних акустических волн и двух внутренних возмущений типа вдув-отсос, когда каждое из этих возмущений находится точно в противофазе к соответствующим по частоте внешним возмущениям. Хорошо видно существенное уменьшение пульсаций плотности на границе ПС.

### Воздействие возмущений в спектре частот

Для моделирования воздействия многочастотных возмущений использовался спектр естественных пульсаций плотности в свободном потоке аэродинамической трубы Т-327а ИТПМ СО РАН [4], измеренный методом электронно-пучковой флюоресценции и представляющий собой экспоненциально падающую зависимость от частоты (см. рис.3).

По экспериментальному распределению был составлен спектр возмущений для численного моделирования (см. рис.4), начиная с частоты 5 и до 50 кГц с шагом в 5 кГц ( $f_1=5\text{кГц}$ ,  $f_2=10\text{кГц}$ ,  $f_3=15\text{кГц}$ , ...,  $f_{10}=50\text{кГц}$ ). Значения расчетных амплитуд нормировались так, чтобы суммарная амплитуда равнялась  $A = \sum_{i=1}^{10} A_i = 0.04$ , что соответствует максимальной суммарной интенсивности пульсаций плотности в свободном потоке аэродинамической трубы.

Далее проводилось исследование взаимодействия ВУС с внешними акустическими волнами и возмущениями типа вдув-отсос в этом спектре частот. На рис. 5 изображены изолинии пульсаций плотности при взаимодействии ВУС с внешними акустическими волнами в спектре частот (рис.5а), с возмущениями типа вдув-отсос (рис.5б) с акустическими волнами и возмущениями типа вдув-отсос, запущенными в противофазе (рис.5в), и запущенными в синфазе (рис.5г). Видно, что как и в случае воздействия монохроматического возмущения, основные волновые процессы происходят в области между УВ и верхней границей ПС.

На рис. 6 приведены среднеквадратичные распределения пульсаций плотности в сечении  $x=0.9$  при взаимодействии ВУС с многочастотными внешними акустическими волнами (рис.6а), с возмущениями типа вдув-отсос (рис.6б) с акустическими волнами и возмущениями типа вдув-отсос запущенными в противофазе (рис.6в), запущенными в синфазе (рис.6г). Видно, что при противофазном запуске наблюдается существенное

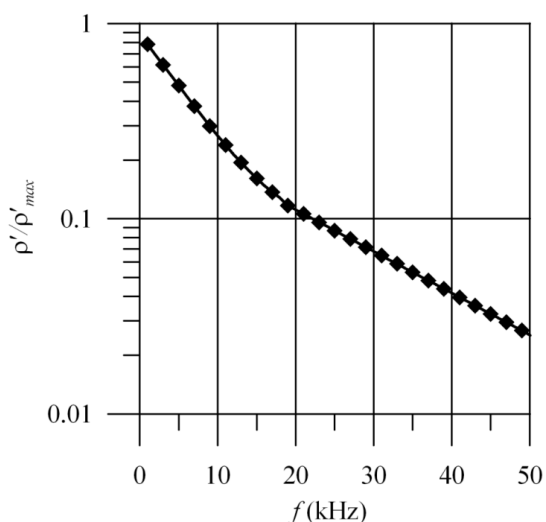


Рис.3. Спектр пульсаций плотности в свободном потоке аэродинамической трубы.

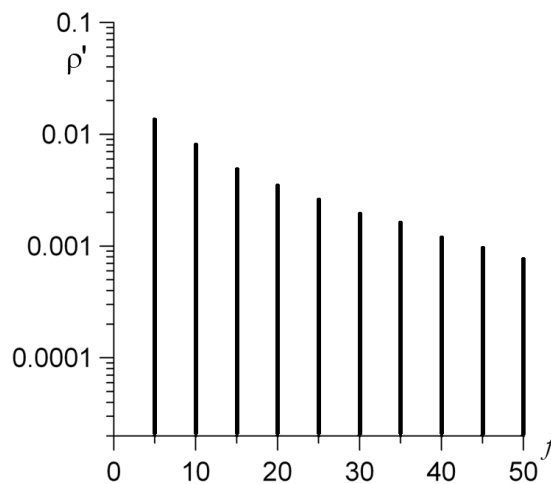


Рис.4. Начальный спектр пульсаций плотности для численного моделирования.

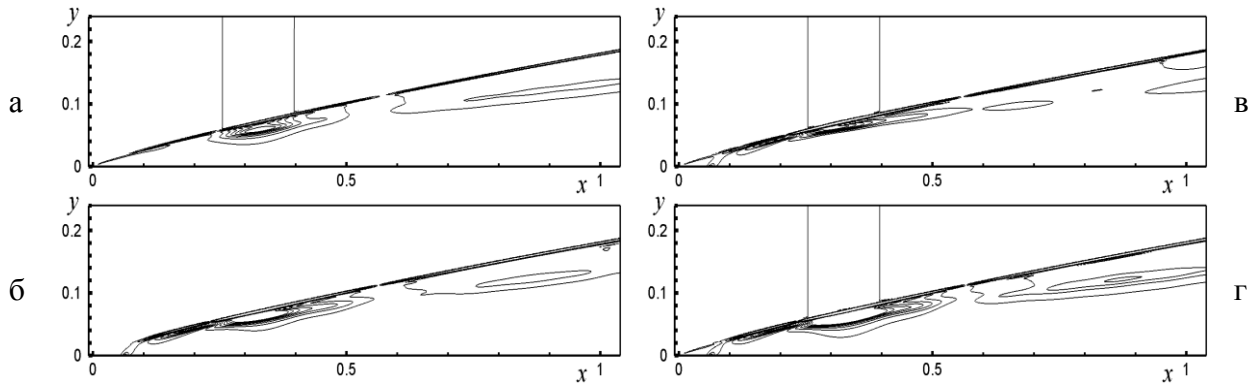


Рис.5. Изолинии пульсаций плотности при взаимодействии ВУС с внешними акустическими волнами на спектре частот  $f_1=5\text{кГц}$ ,  $f_2=10\text{кГц}$ ,  $f_3=15\text{кГц}$ , ...,  $f_{10}=50\text{кГц}$  (а); с возмущениями типа вдув-отсос (б); с акустическими волнами и возмущениями типа вдув-отсос, запущенными в противофазе (в); и запущенными в синфазе (г).

подавление возмущений на верхней границе ПС (пунктирная линия). Соответственно при синфазном запуске получено увеличение пульсаций на границе ПС в два раза.

Полученные данные по фазам  $\varphi_i$  начальных возмущений типа вдув-отсос, необходимых для подавления возмущений, генерируемых в ВУС внешними акустическими волнами в спектре частот, могут быть представлены в виде линейной зависимости от периода колебаний возмущений с соответствующей частотой:

$$\varphi_i = 1.15 \times T_{\text{пер}}^i + 0.0027 \quad T_{\text{пер}}^i = \frac{2\pi}{W_i} \quad W_i = \frac{2\pi \cdot f_i \cdot 10^3 \cdot L}{c_\infty} \quad (3)$$

где  $T_{\text{пер}}^i$  – период колебания возмущений,  $W$  – безразмерная частота,  $L$  – размерная длина пластины. Отличие пульсаций плотности ВУС, полученных в расчетах с использованием данных, взятых по формуле (3), не превышает 6%.

Полученные амплитуды  $B_i$  начальных возмущений типа вдув-отсос, необходимые для подавления возмущений, генерируемых в ВУС внешними акустическими волнами в спектре частот, также были представлены в виде зависимости от начальной амплитуды акустических волн  $A_i$  с соответствующей частотой:

$$B_i = -922.7 \cdot (A_i)^2 + 35.14 \cdot A_i + 0.0353 \quad (4)$$

Погрешность полученной формулы (4) не превышает 13%.

Далее был проведён спектральный анализ возмущений плотности на границе ПС при взаимодействии ВУС с многочастотными акустическими возмущениями ( $f_1=5\text{кГц}$ ,  $f_2=10\text{кГц}$ ,  $f_3=15\text{кГц}$ , ...,  $f_{10}=50\text{кГц}$ ). На рис.7а изображены амплитуды генерируемых пульсаций плотности на верхней границе ПС. Их отличие от амплитуд начального спектра (см. рис.4), вероятно, связано с нелинейными процессами в ВУС – нарастанием гармоник и появлением наряду с основными частотами и их гармониками комбинационных частот.

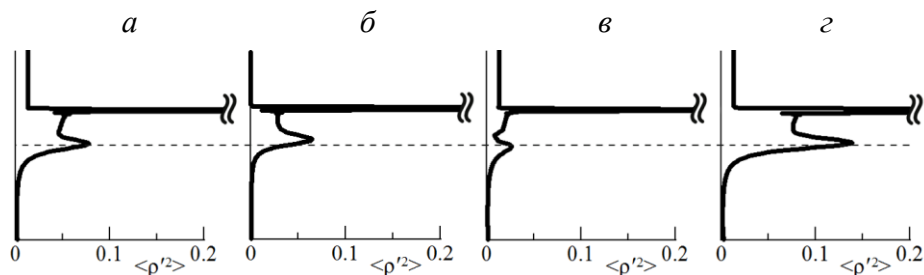


Рис.6. Среднеквадратичные пульсации плотности в сечении  $x=0.9$  при взаимодействии ВУС с внешними акустическими волнами на спектре частот  $f_1=5\text{кГц}$ ,  $f_2=10\text{кГц}$ ,  $f_3=15\text{кГц}$ , ...,  $f_{10}=50\text{кГц}$  (а); с возмущениями типа вдув-отсос (б); с акустическими волнами и возмущениями типа вдув-отсос, запущенными в противофазе (в) и в синфазе (г).

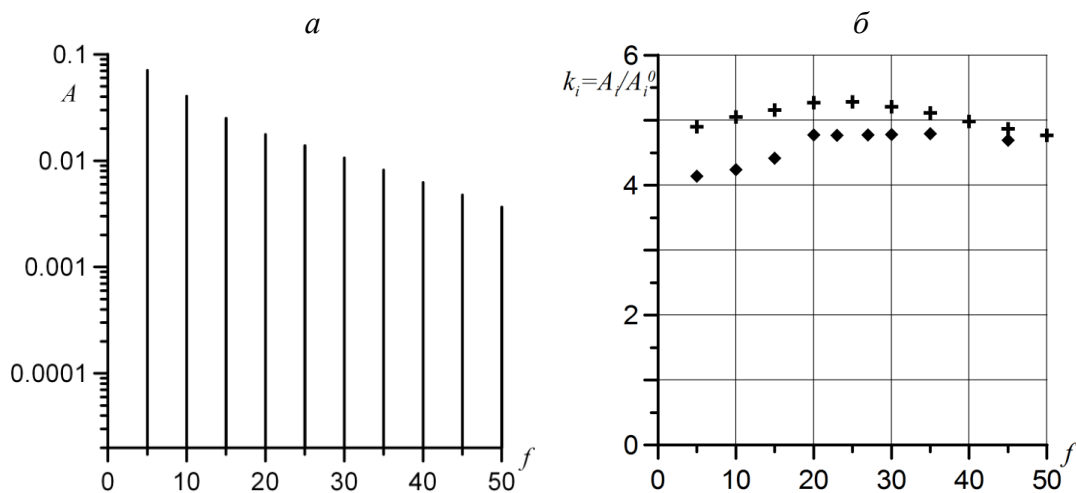


Рис.7. (а) Спектр возмущений плотности и (б) коэффициенты преобразования пульсаций плотности в сечении  $x=0.9$  на границе ПС ( $y=0.11$ ): (+) – при взаимодействии ВУС с акустическими возмущениями на спектре частот и (◆) – с монохроматической акустической волной указанной частоты.

По спектральным амплитудам возмущений плотности на границе ПС подсчитаны коэффициенты преобразования или нормированные амплитуды (отношения амплитуды генерируемых возмущений плотности на верхней границе ПС к амплитуде начальных возмущений). На рис.7б представлены коэффициенты преобразования для двух случаев: (◆) – воздействие на ВУС монохроматических возмущений указанной частоты из спектра, (+) – воздействие многочастотного возмущения (на спектре частот). Видно, что коэффициенты преобразования для этих двух случаев отличаются, что, вероятно, связано с нелинейными эффектами, т.е. с нарастанием вторых гармоник и появлением комбинационных частот.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 09-08-00679), АВЦП РНПВШ 2.1.1/3963 и Программы РАН 11/9.

### Список литературы

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.