

УДК 532.526

## УПРАВЛЕНИЕ ВОЗМУЩЕНИЯМИ ГИПЕРЗВУКОВОГО ВЯЗКОГО УДАРНОГО СЛОЯ

© 2011 г.

*Т.В. Поплавская*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича, Новосибирск  
Новосибирский госуниверситет

popla@itam.nsc.ru

*Поступила в редакцию 16.05.2011*

Представлены расчетно-экспериментальные исследования развития возмущений, генерируемых в гиперзвуковом ударном слое на пластине при воздействии акустических возмущений внешнего потока и возмущений, вводимых в ударный слой локально с поверхности модели. При малых углах атаки ( $\alpha < 15^\circ$ ) внутри ударного слоя доминируют энтропийно-вихревые возмущения, для управления которыми реализован интерференционный метод управления. При увеличении угла атаки наблюдается интенсивный рост возмущений давления на поверхности пластины. В этом случае для подавления возмущений в ударном слое используется комбинация интерференционного метода управления и метода звукопоглощающих покрытий поверхности.

*Ключевые слова:* гиперзвуковые течения, ударный слой, восприимчивость, прямое численное моделирование, эксперимент.

### Введение

При движении летательного аппарата с высокой скоростью в верхних слоях атмосферы течение потока в области его передних кромок реализуется в виде вязкого ударного слоя (ВУС). Исследование развития возмущений и понимание механизмов неустойчивости вязкого ударного слоя является необходимым условием разработки эффективных методов управления ламинарно-турбулентным переходом при гиперзвуковом обтекании летательных аппаратов. Представлен обзор работ расчетно-экспериментальных исследований характеристик возмущений, генерируемых в ВУС на пластине под углом атаки при воздействии акустических возмущений внешнего потока и возмущений типа вдув–отсос, вводимых в ударный слой с поверхности модели.

### Методы работы

Численное моделирование проведено с помощью программы расчета полных двумерных нестационарных уравнений Навье–Стокса с использованием схемы сквозного счета высокого порядка точности, разработанной в ИТПМ СО РАН А.Н. Кудрявцевым. Численное моделирование выполнено в широком диапазоне параметров потока и параметров взаимодействия возмущений с

ВУС: числа Маха 12, 16 и 21, числа Рейнольдса  $Re_L = 1.44 \cdot 10^5$ ,  $2.88 \cdot 10^5$  и  $4.32 \cdot 10^5$ , значения угла атаки  $0 \div 30^\circ$ , температурного фактора поверхности  $0.08 \div 0.5$ , угла взаимодействия акустических волн с головной ударной волной от  $0$  до  $45^\circ$ , вариации амплитуды и частоты возмущений. Данные численного моделирования сопоставлены с результатами измерений в ударном слое на пластине под нулевым и ненулевым углом атаки, выполненных в гиперзвуковой азотной аэродинамической трубе Т-327А ИТПМ СО РАН при числе Маха 21 и числе Рейнольдса  $Re_L = 1.44 \cdot 10^5$ .

### Результаты исследований

Исследования показали, что при малых углах атаки ( $\alpha < 15^\circ$ ) основной особенностью механизма формирования поля пульсаций плотности при взаимодействии ударного слоя как с внешними акустическими возмущениями, так и возмущениями типа вдув–отсос, вводимыми с поверхности пластины, является генерация и доминирование внутри ВУС энтропийно-вихревых возмущений: в невязком слое, между ударной волной и границей пограничного слоя, в потоке распространяются вихри с одинаковым для обоих типов возмущений пространственным распределением и фазовой скоростью движения. В этом случае реализована методика активного (интерференционного) управ-

ления интенсивностью пульсаций плотности в ударном слое [1]: при подборе амплитуды источника вдув–отсос его противофазные возмущения компенсируют в ударном слое возмущения, генерируемые акустическими волнами внешнего потока. Возможность активного управления интенсивностью пульсаций связана с тем, что внешние акустические волны и периодические контролируемые возмущения типа вдув–отсос, вводимые с поверхности пластины, порождают энтропийно-вихревые возмущения с одинаковым пространственным распределением и фазовой скоростью движения в ударном слое.

Возможность подавления (усиления) возмущений, генерируемых в гиперзвуковом ударном слое пластины внешними акустическими волнами быстрой моды, возмущениями, вводимыми в ударный слой с поверхности модели, продемонстрирована экспериментально [2]. Для введения в ударный слой контролируемых периодических возмущений использован цилиндрический кососрезный свисток. Акустические возмущения в свободном гиперзвуковом потоке аэродинамической трубы создавались мощным электрическим разрядом, момент начала которого определялся импульсом, синхронизованным с пульсациями давления в резонаторе свистка. Измерения были выполнены невозмущающим поток методом электронно-пучковой флюоресценции азота. На рис. 1 приведены экспериментальные зависимости амплитуды пульсаций плотности на верхней границе пограничного слоя пластины в сечении  $x = 0,63$  от временного сдвига  $\Delta t$  между пульсациями внешнего потока и возмущениями, генерируемыми кососрезным свистком.

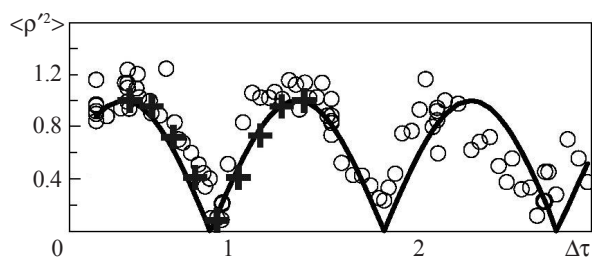


Рис. 1

Сплошная кривая на рис. 1 аппроксимирует экспериментальные значения в соответствии с законом интерференции синусоидальных волн. Для сравнения приведены соответствующие данные прямого численного моделирования (крестики).

В работе показана возможность применения интерференционного метода управления волновыми процессами в гиперзвуковом ВУС на пластине при многочастотности внешних и внутренних воз-

действий: пульсации, генерируемые внешними возмущениями, могут быть подавлены вводимыми искусственными возмущениями при условии подбора соответствующей фазы и амплитуды вдува–отсоса для каждой монохроматической акустической волны.

При увеличении угла атаки доля энтропийно-вихревых возмущений внутри ВУС падает, а возмущения давления растут, причем наиболее интенсивный рост возмущений давления наблюдается на поверхности пластины. В этом случае эффективности локального источника вдув–отсос уже недостаточно для подавления возмущений. Выходом из положения является совместное использование интерференционного метода управления и метода звукопоглощающих покрытий на поверхности [3], которые адсорбируют энергию акустических волн в ударном слое и снижают уровень пульсаций давления. В трубных экспериментах продемонстрирована высокая эффективность поглощения пульсаций давления пакетами полужамкнутых труб и ячеисто-пористых материалов (вспененный никель). Результаты расчетов (рис. 2) подтверждают, что интенсивность возмущений давления на поверхности сразу за пористым покрытием (кривая 2) при  $x > 0,5$  приблизительно в два раза меньше, чем на сплошной пластине (кривая 1), что говорит о крайне высокой эффективности подавления возмущений даже небольшим участком пористого покрытия.

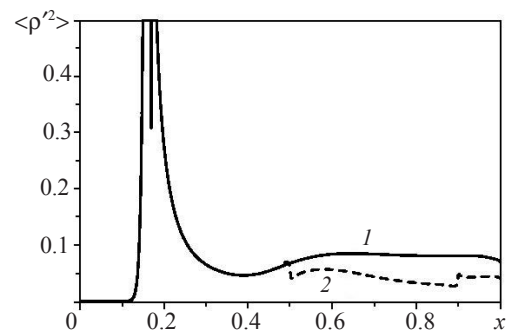


Рис. 2

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 09-08-00557 и 09-08-00679), АВЦП РНПВШ 2.1.1/3963 и Программы РАН 11/9.*

#### Список литературы

1. Фомин В.М. и др. // Докл. РАН. 2007. Т. 414, №2. С. 190–193.
2. Маслов А.А. и др. // МЖГ. 2008. №3. С. 152–161.
3. Фомин В.М. и др. // Докл. РАН. 2002. Т. 384, №2. С. 1–5.

**CONTROL OF HYPERSONIC SHOCK LAYER DISTURBANCES***T.V. Poplavskaya*

The paper reviews numerical and experimental 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 the model. The entropy-vortex disturbances dominate inside the shock layer at small angles of attack ( $\alpha < 15^\circ$ ). The interference method was realized to control these disturbances. As the angle of attack is increased, intensive growth of pressure disturbances on the plate surface is observed. The method of sound-absorbing coating is used for the suppression of disturbances in this case.

*Keywords:* hypersonic flows, shock layer, receptivity, direct numerical simulations, experiment.