

Т. В. Поплавская^{1,2}, А. Н. Кудрявцев¹,
С. Г. Миронов^{1,2}, И. С. Цырюльников¹

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

² Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия
E-mail.ru: popla@itam.nsc.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ И ЛОКАЛИЗОВАННОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ ГИПЕРЗВУКОВОГО УДАРНОГО СЛОЯ НА ПЛАСТИНЕ *

В работе представляется исследование восприимчивости и развития возмущений, генерируемых в гиперзвуковом ударном слое на пластине под воздействием возмущений внешнего потока и возмущений, вводимых в ударный слой локально с поверхности модели.

Ключевые слова: гиперзвуковое обтекание, восприимчивость ударного слоя, прямое численное моделирование

Введение

При движении летательного аппарата с высокой скоростью в верхних слоях атмосферы режим вязкого ударного слоя реализуется даже на значительном расстоянии от передних кромок. Вязкий ударный слой состоит из толстого пограничного слоя и тонкой зоны невязкого течения за головной ударной волной (на рис. 1 приведена визуализация течения на пластине электронным пучком).

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.

Анализ ламинарно-турбулентного перехода в пограничном слое традиционно начинают с задачи восприимчивости, т. е. возбуждения волн неустойчивости внешними возмущениями. Выяснение путей и причин возникновения возмущений в ударном слое, т. е. процесс генерации возмущений в ударном слое, составляет содержание проблемы

его восприимчивости. В исследованиях дозвуковых пограничных слоев [1] используется удобная классификация механизмов восприимчивости к внешним возмущениям с подразделением на локализованные и распределенные. Эту же классификацию можно использовать и для гиперзвуковых течений и выделить два предельных случая возбуждения возмущений вязкого ударного слоя: непрерывную (распределенную) генерацию в протяженной области течения и локализованную – при сосредоточенном в пространстве воздействии.

В данной работе представляется расчетно-экспериментальное исследование распределенной и локализованной восприимчивости ударного слоя на пластине при больших числах Маха и умеренных числах Рейнольдса.

Эксперименты проведены в гиперзвуковой азотной аэродинамической трубе Т-327А ИТПМ СО РАН для $M_\infty = 21$, $Re_{\infty L} = 1,44 \cdot 10^5$, температуры торможения потока $T_0 = 1\ 200$ К, температуры поверхности пластины $T_w = 300$ К. Характеристики пульсаций плотности измерялись методом электронно-пучковой флуоресценции [2].

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 05-08-33436).

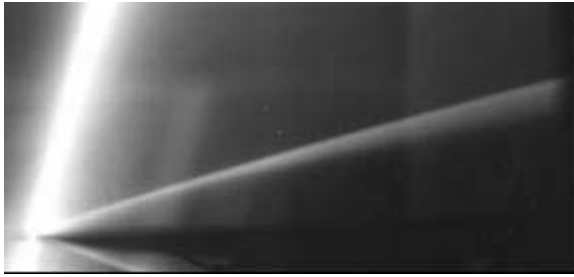


Рис. 1. Визуализация течения на пластине электронным пучком

Расчетное исследование выполнено методом прямого численного моделирования на основе полных двумерных нестационарных уравнений Навье-Стокса с использованием схем сквозного счета высокого порядка точности [3; 4].

Расчетная область

Представляет собой прямоугольник, часть нижней стороны которого совпадает с поверхностью пластины. Левая (входная) граница расположена на расстоянии нескольких расчетных ячеек вверх по потоку от передней кромки пластины, высота расчетной области выбирается из условия, чтобы идущая с передней кромки головная УВ не взаимодействовала с верхней границей. Правая (выходная) граница отодвинута от задней кромки пластины до сечения $x = 1,042$, чтобы течение в выходном сечении было полностью сверхзвуковым. Для расчета среднего течения на левой и верхней границах задавался равномерный гиперзвуковой поток, направленный вдоль оси x . На правой границе решение экстраполировалось изнутри расчетной области. Поскольку влияние разреженности в рассматриваемой задаче довольно значительно, в граничных условиях на пластине учитывались скольжение и скачок температуры [5].

Сначала выполнялся расчет стационарного течения. Результаты моделирования показали хорошее совпадение с данными экспериментальных измерений средней плотности в ударном слое, полученных методом электронно-пучковой флюоресценции [4].

Взаимодействие вязкого ударного слоя с возмущениями разного типа

В эксперименте внешние акустические возмущения – это медленные акустические волны, излучаемые турбулентным погра-

ничным слоем, образующимся на стенках сопла.

Локализованные в области передней кромки внутренние возмущения генерировались цилиндрическим кососрезным аэродинамическим свистком, расположенным под пластиной [6].

При численном моделировании задачи взаимодействия ударного слоя с внешними акустическими возмущениями переменные на левой границе расчетной области задавались в виде суперпозиции стационарного основного течения и плоской монохроматической звуковой волны, имеющей следующий вид:

$$\begin{pmatrix} u' \\ v' \\ p' \\ \rho' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Amp(u') \\ Amp(v') \\ Amp(p') \\ Amp(\rho') \end{pmatrix} \exp \left[i \left(k_x x + k_y y - \omega t \right) \right],$$

где $Amp(u')$, $Amp(v')$, $Amp(p')$, $Amp(\rho')$ – безразмерные амплитуды внешних возмущений, связанные следующим образом:

$$\begin{aligned} Amp(p') &= A, & Amp(u') &= \pm A \cos \theta, \\ Amp(v') &= \mp A \sin \theta, & Amp(\rho') &= A. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь u' , v' , p' , ρ' – пульсации продольной и поперечной скорости, давления и плотности, соответственно, θ – угол между волновым вектором и осью x , A – параметр, характеризующий амплитуду внешней акустической волны, t – время, $k_x = k \cos \theta$, $k_y = -k \sin \theta$ – компоненты волнового вектора, связанного с частотой $\omega = 2\pi f L / c_\infty$ дисперсионным соотношением $k = \omega / (M_\infty \cos \theta \pm 1)$. В (1) верхний (нижний) знак соответствует быстрой (медленной) акустической волне. При записи соотношений в безразмерном виде возмущения плотности и температуры отнесены к значениям средней плотности и температуры в набегающем потоке, возмущения скорости – к скорости звука в набегающем потоке c_∞ , возмущение давления – к величине $\rho_\infty c_\infty^2$.

Возмущения типа периодического вдува-отсоса моделировались заданием граничного условия для поперечного массового расхода на некотором участке поверхности пластины:

$$\rho v' \Big|_{y=0} / \rho_{\infty} c_{\infty} = A \sin \left(\pi \frac{x-x_1}{x_2-x_1} \right) \sin 2\pi f t .$$

Здесь вновь A – параметр, характеризующий амплитуду вводимого возмущения, $x_1 = 0,065$ и $x_2 = 0,08$ – границы области возмущения.

После введения возмущений уравнения Навье – Стокса интегрировались до момента выхода нестационарного решения на установившийся периодический режим.

На рис. 2 приведены поля пульсаций плотности в ударном слое для внешней медленной (а) и быстрой (б) акустической волны при $M_{\infty} = 21$, $Re_L = 1,44 \cdot 10^5$ и $T_w = 300$ К. Видно, что наиболее интенсивные возмущения плотности наблюдаются на ударной волне и на верхней границе вязкого пограничного слоя. При этом величина максимума пульсаций на границе пограничного слоя в несколько раз меньше амплитуды пульсаций плотности на ударной волне.

На рис. 2 в, где приведено векторное поле пульсаций скорости, видно, что в ударном слое существуют противовращающиеся вихри, занимающие всю область между УВ и верхней границей пограничного слоя. Другими словами, основной особенностью механизма формирования поля пульсаций плотности при взаимодействии ударного слоя с внешними акустическими возмущениями являются генерация и распространение внутри ударного слоя энтропийно-вихревых возмущений. Это подтверждает и линейная теория взаимодействия плоских волн с УВ [7].

С целью обоснования наличия распределенной восприимчивости к внешним акустическим возмущениям проведены расчеты с разными условиями на левой границе расчетной области. Медленная акустическая волна вводилась не на всей входной границе, а только на ее части (рис. 3). Видно, что внешняя акустическая волна всегда генерирует возмущения в ударном слое по всей длине взаимодействия с головной ударной волной. Интенсивность этих возмущений зависит от протяженности области взаимодействия. Возмущения в каждой точке ударного слоя представляют собой сумму возмущений, пришедших из области вверх по потоку, и возмущений, возникших в этой точке.

Это означает, что восприимчивость к внешним акустическим возмущениям является распределенной.

В [8] показано, что результаты прямого численного моделирования развития возмущений в вязком ударном слое пластины согласуются с расчетами по линейной теории взаимодействия плоских волн с УВ (по коэффициентам преобразования) и с расчетами по линейной локально-параллельной теории устойчивости с учетом влияния ударной волны [9] (по скоростям роста возмущений α_i).

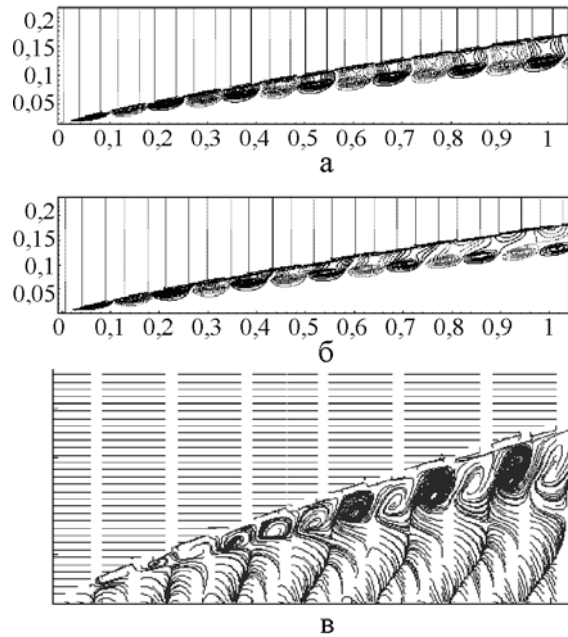


Рис. 2. Изолинии пульсаций плотности ($M_{\infty} = 21$, $Re_L = 1,44 \cdot 10^5$, $T_w = 300$ К, $A = 0,03$, $\theta = 0^{\circ}$, $f = 38,4$ кГц) для внешней медленной (а) и быстрой (б) акустической волны; векторное поле пульсаций скорости (в)

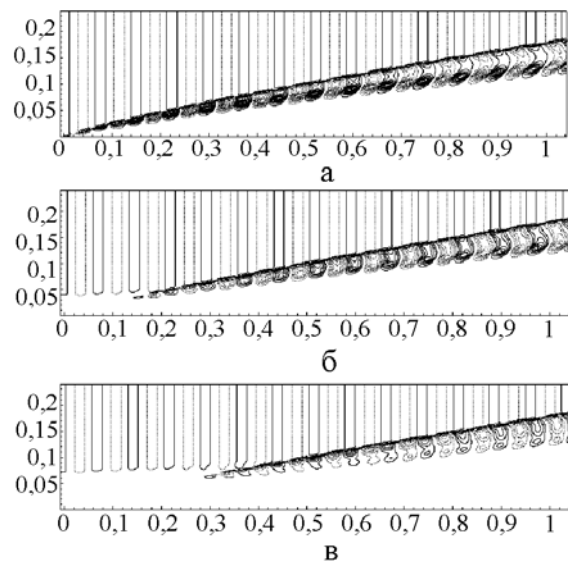


Рис. 3. Изолинии пульсаций плотности при $M_{\infty} = 21$, $Re_L = 1,44 \cdot 10^5$, $T_w = 300$ К, $A = 0,03$, $\theta = 0^{\circ}$, $f = 80$ кГц: а – внешняя медленная акустическая волна задана на всей левой границе от $y = 0$ до $y = 0,24$; б – от $y = 0,04$ до $y = 0,24$; в – от $y = 0,072$ до $y = 0,24$

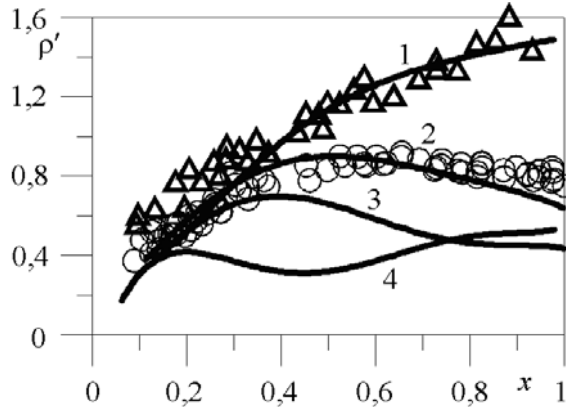


Рис. 4. Амплитуды пульсаций плотности на УВ для медленной акустической волны при разных частотах: 1 – 19,2 кГц; 2 – 38,4 кГц; 3 – 50 кГц; 4 – 80 кГц

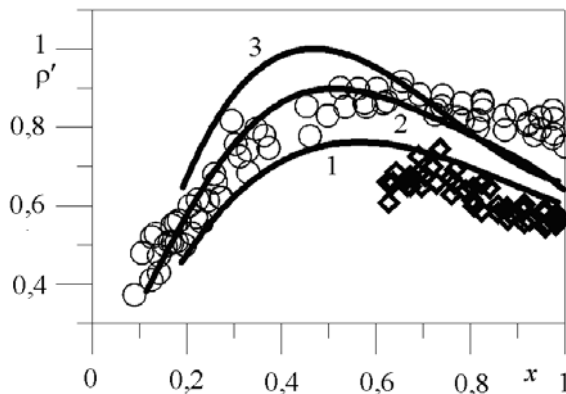


Рис. 5. Амплитуды пульсаций плотности на УВ для внешней медленной (акустической) волны при разных температурах поверхности: 1 – 85 К; 2 – 300 К; 3 – 600 К

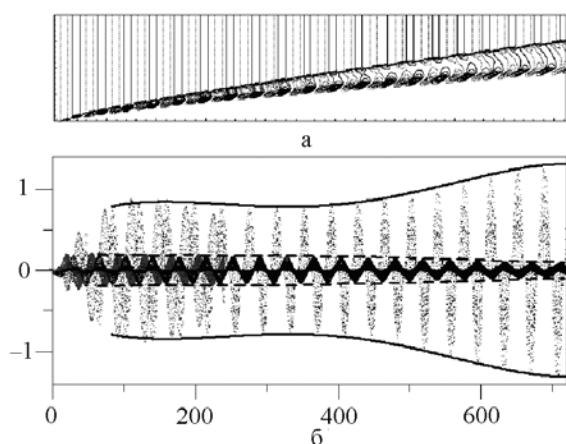


Рис. 6. Поле изолиний мгновенных пульсаций плотности (а) и зависимости амплитуды пульсаций плотности от продольной координаты (б) для пластины $L = 720$ мм. Кривая 1 – огибающая амплитуды пульсаций на ударной волне, кривая 2 – огибающая амплитуды пульсаций на границе пограничного слоя, 3 – амплитуда пульсаций плотности для пластины $L = 240$ мм

С целью верификации расчетов методом электронно-пучковой флуоресценции азота измерялись амплитуды пульсаций плотности на ударной волне. Наблюдается согласие расчетных и экспериментальных зависимостей амплитуд пульсаций плотности как для различных частот (рис. 4), так и для разных температур поверхности (рис. 5). Максимальная амплитуда пульсаций плотности обратно пропорциональна частоте внешних возмущений и имеет немонотонную зависимость от продольной координаты (см. рис. 4). Характерный период вариаций амплитуды пульсаций плотности обратно пропорционален частоте внешних возмущений. Из рис. 5 видно, что с ростом температуры поверхности интенсивность пульсаций плотности увеличивается.

Каков же механизм генерации таких пульсаций? В работе [4] показано, что пульсации плотности обусловлены нормальными к поверхности пластины колебаниями поля среднего течения в ударном слое, вызываемыми вихрями.

Интересно, рассмотреть возможность моделирования дальнейших стадий развития возмущений в ударном слое. Для исследования влияния числа Рейнольдса на характеристики волнового поля в ударном слое были проведены расчеты на пластинах удвоенной (480 мм) и утроенной (720 мм) длины. Как и ожидалось, с ростом числа Рейнольдса увеличивается размер невязкой области между УВ и границей ПС (рис. 6, а), однако качественная картина поля пульсаций плотности не меняется. Тем не менее видно, что интенсивность пульсаций на ударной волне растет, а на границе гиперзвукового ПС затухает (рис. 6, б), сдвигая основную долю пульсаций плотности в область УВ как это было получено по линейной теории устойчивости с учетом близости ударной волны [9].

На рис. 7 приведены расчетные поля мгновенных пульсаций плотности для различных чисел Маха 21,16 и 12. Видно, что при практически одинаковых наклонах головной ударной волны с уменьшением числа Маха пограничный слой уменьшается, и его граница отодвигается от ударной волны. При этом при указанных параметрах обтекания качественная картина поля пульсаций плотности не меняется. В ударном слое по-прежнему доминируют возмущения энтропийно-вихревой моды, о чем свидетельст-

вуют данные по полям пульсаций завихренности (рис. 8) и анализ с помощью линейной теории взаимодействия [7].

Для всестороннего понимания механизма восприимчивости ударного слоя необходимо также изучение взаимодействия ударного слоя с возмущениями, генерируемыми локально на поверхности тела.

Приведенные на рис. 9 картины изолиний пульсаций плотности, полученные в расчете (а) и экспериментально (б) показывают, что, как и в случае распределенной восприимчивости, наиболее интенсивные возмущения плотности наблюдаются на ударной волне и на верхней границе вязкого пограничного слоя, т. е. поле пульсаций, генерируемое локальным источником вдув-отсос, подобно полю пульсаций, генерируемому внешними акустическими возмущениями (см. рис. 2, а).

На рис. 10 приведены зависимости от продольной координаты амплитуды пульсаций плотности на ударной волне для трех частот возмущений типа вдув-отсос. На графиках точками приведены экспериментальные данные, полученные для основной частоты $f = 20,5$ кГц и ее гармоники. Видно хорошее совпадение расчетных данных и результатов измерений. Эти исследования показали также наличие периодических вариаций амплитуды пульсаций плотности на ударной волне вдоль пластины, продольный масштаб которых уменьшается обратно пропорционально частоте возмущений.

Аналогичные закономерности наблюдаются и при взаимодействии внешних акустических возмущений с ударным слоем, что говорит об общности процессов, вызывающих эти эффекты.

На рис. 11 приведены зависимости амплитуды пульсаций плотности от продольной координаты x на частоте $f = 38,4$ кГц для трех положений источника вдув-отсоса. Расстояние от центра источника до передней кромки пластины составляло $x/L = 0,0725, 0,15$ и $0,22$ (кривые 1, 2, 3) при амплитуде вводимых возмущений $A = 0,04$. Видно, что с увеличением расстояния от передней кромки максимальная амплитуда пульсаций плотности в ударном слое уменьшается, что объясняется падением эффективности воздействия источника вдув-отсос на среднее течение.

Сопоставление рис. 3 и 11 показывает, что основным отличием результатов лока-

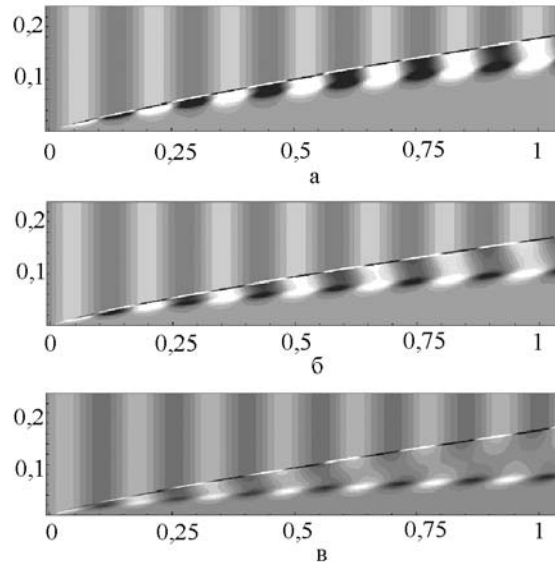


Рис. 7. Изолинии пульсаций плотности для внешней медленной акустической волны при $M_\infty = 21$ (а), 16 (б), 12 (в), $Re_L = 1,44 \cdot 10^5$, $T_w = 300$ К, $A = 0,03$, $\theta = 0^\circ$, $f = 38,4$ кГц

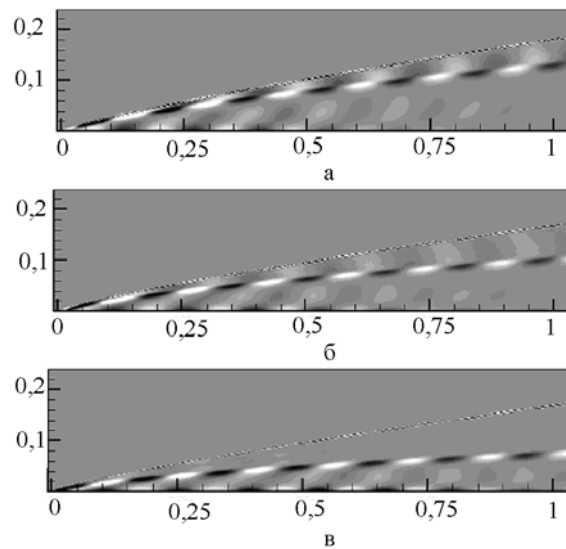


Рис. 8. Изолинии пульсаций завихренности для внешней медленной акустической волны при $M_\infty = 21$ (а), 16 (б), 12 (в), $Re_L = 1,44 \cdot 10^5$, $T_w = 300$ К, $A = 0,03$, $\theta = 0^\circ$, $f = 38,4$ кГц

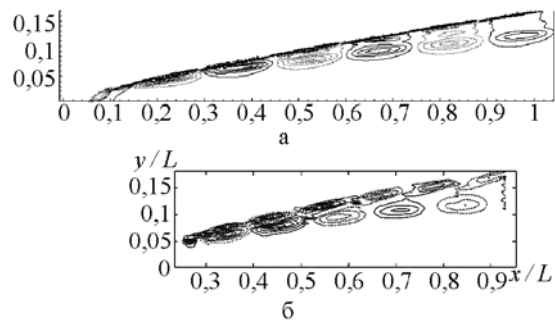


Рис. 9. Изолинии пульсаций плотности для $M_\infty = 21$, $Re_L = 1,44 \cdot 10^5$, $T_w = 300$ К, $f = 20$ кГц: а – расчет $A = 0,03$; б – эксперимент

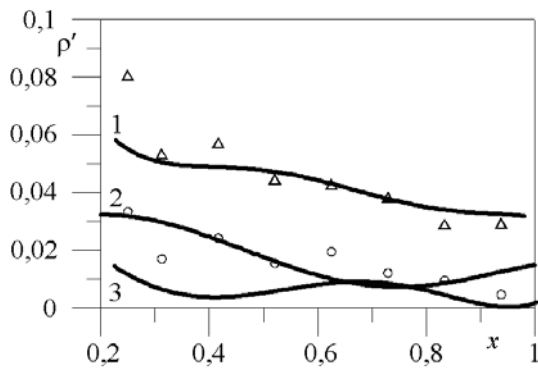


Рис. 10. Зависимости от продольной координаты амплитуды пульсаций плотности на ударной волне: 1 – $f = 20$ кГц (точки – измерения); 2 – $f = 40$ кГц (точки – измерения); 3 – $f = 80$ кГц

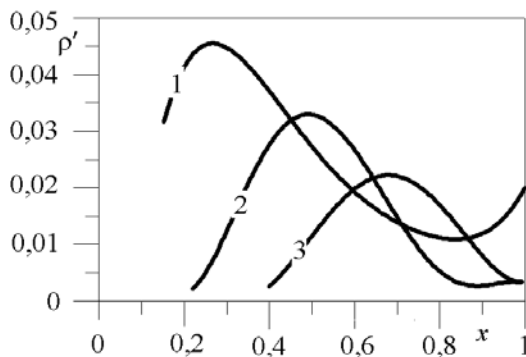


Рис. 11. Зависимости от продольной координаты амплитуды пульсаций плотности на ударной волне для разных положений источника типа вдув-отсос

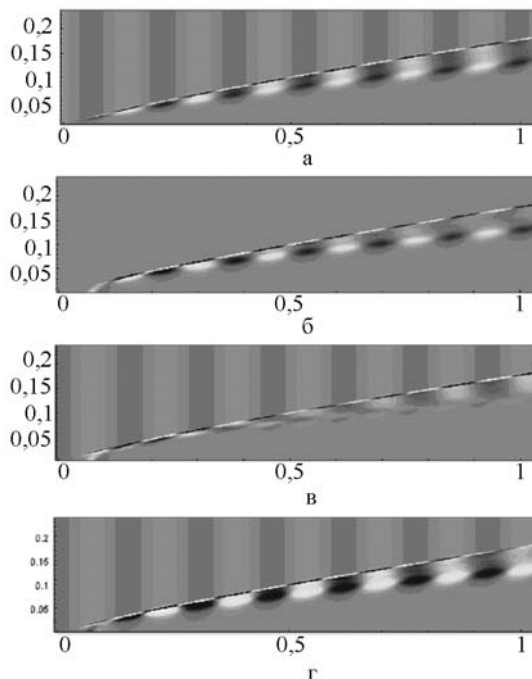


Рис. 12. Поле изолиний мгновенных пульсаций плотности в ударном слое (а–г) при $M_\infty = 21$, $Re_L = 1,44 \cdot 10^5$, $T_w = 300$ К, $f = 38,4$ кГц: а – медленная акустическая волна $\theta = 0^\circ$, $A = 0,001$; б – вдув-отсос газа $A = 0,06$; в – противофазное воздействие; г – синфазное воздействие

лизованной восприимчивости от распределенной является быстрое затухание пульсаций плотности вдоль пластины. Это можно объяснить постепенным уменьшением воздействия источника возмущений на ударный слой с увеличением расстояния до него, тогда как внешние возмущения воздействуют на ударный слой по всей его длине.

Однако поле пульсаций при воздействии на ударный слой внешних акустических волн качественно подобно полю пульсаций, генерируемых вдувом-отсосом с той же частотой. Отсюда, очевидно, следует, что пульсации, генерируемые внешними возмущениями, могут быть подавлены вводимыми внутренними возмущениями при условии подбора соответствующей фазы и амплитуды вдува-отсоса.

Результаты проведенных расчетов (рис. 12) свидетельствуют, что, запуская периодический вдув и отсос газа вблизи передней кромки в противофазе или в фазе с внешней акустической волной при условии подбора соответствующей амплитуды вдува-отсоса, можно подавить или усилить развитие неустойчивости в ударном слое, возникающей под действием акустических возмущений набегающего потока, т. е. осуществлять активное управление течением в ударном слое [10].

Заключение

Показано, что генерация возмущений ударного слоя под воздействием акустических волн внешнего потока является примером распределенной восприимчивости, а генерация под воздействием возмущений типа «вдув-отсос», вводимых в ударный слой с поверхности модели вблизи передней кромки, принадлежит к локализованному типу восприимчивости.

Изучен механизм формирования поля пульсаций плотности при взаимодействии ударного слоя с возмущениями разного типа.

Приведены экспериментальные результаты и результаты прямого численного моделирования восприимчивости и развития возмущений в вязком ударном слое на пластине при высоких числах Маха и умеренных значениях числа Рейнольдса.

Показано, что поле пульсаций при воздействии на ударный слой внешних акустических волн подобно полю пульсаций, генерируемых вдувом-отсосом с той же частотой.

Продемонстрирована возможность активного управления возмущениями в ударном слое интерференционным методом.

Список литературы

1. Качанов Ю. С., Козлов В. В., Левченко В. Я. Возникновение турбулентности в пограничном слое. Новосибирск: Изд-во «Наука», 1982.

2. Mironov S. G., Maslov A. A. An Experimental Study of Density Waves in Hypersonic Shock Layer on a Flat Plate // *Phys. Fluids*. A. 2000. Vol. 12, No. 6. P. 1544–1553.

3. Кудрявцев А. Н., Маслов А. А., Миронов С. Г. Прямое численное моделирование восприимчивости гиперзвукового ударного слоя к естественным и искусственным возмущениям // *Выч. технологии*. 2006. Т. 11, ч. 1. С. 108–115.

4. Кудрявцев А. Н., Миронов С. Г., Поплавская Т. В. и др. Экспериментальное исследование и прямое численное моделирование развития возмущений в вязком ударном слое на плоской пластине // *ПМТФ*. 2006. Т. 47, № 5. С. 3–15.

5. Коган М. Н. Динамика разреженных газов. М.: Наука, 1974.

6. Миронов С. Г., Цырюльников И. С. Экспериментальное исследование развития периодических контролируемых возмущений в гиперзвуковом вязком ударном слое на пластине // *Теплофизика и аэромеханика*. 2006. Т. 13, № 3. С. 353–360.

7. McKenzie J. F., Westphal K. O. Interaction of Linear waves with Oblique Shock Waves // *Phys. Fluids*. 1968. Vol. 11. P. 2350–2362.

8. Kudryavtsev A. N., Mironov S. G., Poplavskaya T. V. et al. DNS of Unsteady Viscous Flows. Comparison with Different Models // *Proceed. of ICMAR–2007*. Novosibirsk, 2007. Pt 4. P. 79–85.

9. Maslov A. A., Poplavskaya T. V., Smorodsky B. V. et al. Stability of a Hypersonic Shock Layer on a Flat Plate // *Comptes rendus de l'Académie des sciences – Mechanics*. 2004. Vol. 332. Is. 11. P. 875–880.

10. Фомин В. М., Кудрявцев А. Н., Маслов А. А. и др. Активное управление возмущениями в гиперзвуковом ударном слое // *ДАН*. 2007. Т. 414, № 2. С. 1–4.

Материал поступил в редколлегию 10.12.2007

Investigations of a receptivity and disturbances evolution generated in a hypersonic shock layer on a flat plate under the action of disturbances of the external flow and disturbances, entered in a shock layer locally on the surface of the plate model is represented in work.

Keywords: hypersonic flow, receptivity of shock layer, direct numerical simulation (DNS).