

УДК 532.526

## УПРАВЛЕНИЕ ВОЗМУЩЕНИЯМИ ГИПЕРЗВУКОВОГО ВЯЗКОГО УДАРНОГО СЛОЯ НА ПЛАСТИНЕ

С. В. Кириловский, Т. В. Поплавская, И. С. Цырюльников

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН,  
630090 Новосибирск

Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск

E-mails: kirilov@itam.nsc.ru, popla@itam.nsc.ru, tsivan@ngs.ru

Проведено исследование восприимчивости вязкого ударного слоя на пластине, расположенной под углом атаки, к внешним многоволновым акустическим возмущениям. Показано, что при углах атаки пластины менее  $20^\circ$  внешние акустические волны и периодические контролируемые возмущения, вводимые с поверхности пластины, обуславливают возникновение внутри вязкого ударного слоя энтропийно-вихревых возмущений с подобным пространственным распределением. Этот результат позволил численно реализовать интерференционный метод управления возмущениями, генерируемыми в вязком ударном слое на пластине внешними акустическими волнами на одной частоте и в спектре частот путем ввода возмущений типа вдува-отсоса с поверхности пластины с соответствующими амплитудами и фазами.

**Ключевые слова:** гиперзвуковое обтекание, восприимчивость ударного слоя, прямое численное моделирование, уравнения Навье — Стокса, управление возмущениями.

**Введение.** В последнее время с целью разработки методов управления ламинарно-турбулентным переходом проводятся исследования дозвуковых, сверхзвуковых и гиперзвуковых течений.

Методы управления неустойчивостью течений делятся на две группы: методы пассивного воздействия и методы активного воздействия. Согласно работе [1], в которой используется энергетический подход к классификации методов управления неустойчивостью течений, различие активных и пассивных методов заключается в наличии или отсутствии затрат какой-либо энергии на создание управляющего воздействия. Примером активного метода является интерференционный метод, в соответствии с которым развивающуюся волну неустойчивости можно усилить или подавить с помощью волны того же типа, подобрав соответствующий фазовый сдвиг. Способы создания активного воздействия (вдув-отсос, микроэлектромеханические системы, локальный периодический нагрев и электрический разряд), используемые в случае дозвуковых течений [1], применяются также для сверхзвуковых и гиперзвуковых пограничных слоев (ПС) (периодический вдув-отсос [2] и электрический разряд [3, 4]). Кроме того, разработаны специфические методы пассивного воздействия. В частности, для гиперзвуковых течений применяется метод подавления акустических возмущений звукопоглощающим покрытием [5–8].

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 09-08-00557, 09-08-00679), а также в рамках Федеральной целевой программы “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 гг.” (контракт № 16.740.11.0303) и Программы РАН № 11/9.

© Кириловский С. В., Поплавская Т. В., Цырюльников И. С., 2012

При больших гиперзвуковых числах Маха и в случае движения в разреженной атмосфере на большой высоте головная ударная волна (УВ) располагается вблизи ПС, и течение за ней реализуется в виде вязкого ударного слоя. Вследствие наличия в ударных слоях ПС большой толщины условия на поверхности модели оказывают слабое влияние на пульсационные процессы в них, что практически исключает возможность использования методов пассивного воздействия. В отличие от сверхзвуковых ПС, в которых преобладает акустическая мода неустойчивости [8], в гиперзвуковых ударных слоях ( $M_\infty > 12$ ) доминирует энтропийно-вихревая мода [9, 10]. Доминирование энтропийно-вихревой моды наблюдается в вязком ударном слое (ВУС) на пластине, расположенной под малым углом атаки, несмотря на то что при увеличении этого угла в ударном слое увеличивается уровень пульсаций давления, что соответствует увеличению доли акустических возмущений [11].

В условиях, когда в ВУС доминируют энтропийно-вихревые возмущения, перспективными являются методы активного воздействия, апробированные для дозвуковых пограничных слоев, в частности метод подавления пульсаций контролирующими периодическими возмущениями, находящимися в противофазе с подавляемыми пульсациями. В [10, 12, 13] показано подобие полей пульсаций, генерируемых в ударном слое на пластине, расположенной под нулевым углом атаки, возмущениями внешнего потока и возмущениями типа вдува-отсоса, а также совпадение значений продольной фазовой скорости возмущений, создаваемых в ударном слое этими источниками воздействия. Указанные особенности позволяют реализовать интерференционную схему управления интенсивностью пульсаций в ударном слое путем воздействия на них контролирующими возмущениями с определенными амплитудой и фазой.

В данной работе численно реализуется интерференционный метод управления возмущениями ВУС на пластине в случае малых углов атаки ( $\alpha \leq 15^\circ$ ) при воздействии внешних монохроматических акустических волн, а также показана возможность управления возмущениями, генерируемыми в ВУС на пластине, расположенной под нулевым углом атаки, внешними многоволновыми акустическими возмущениями.

**Постановка задачи и численное решение.** Задачи восприимчивости ВУС к возмущениям различного типа и управления развитием этих возмущений решались при числе Маха  $M_\infty = 21$  и числах Рейнольдса, вычисленных по длине пластины,  $Re_L = 6,00 \cdot 10^4$ ;  $1,44 \cdot 10^5$  в случае, когда на всей длине пластины реализуется режим вязкого ударного слоя, характеризующийся сильным вязко-невязким взаимодействием.

Численное моделирование развития возмущений выполнялось с помощью программы, созданной в Институте теоретической и прикладной механики (ИТПМ) СО РАН [14], на основе решений двумерных уравнений Навье — Стокса с использованием схем сквозного счета высокого порядка точности. Более детальное описание метода приведено в [9, 10].

Расчетная область представляла собой прямоугольник, часть нижней стороны которого совпадала с поверхностью пластины. Расчеты обтекания пластины длиной  $L = 100$  мм под углом атаки выполнялись на сетке размером  $1050 \times 350$  ячеек. Исследование многоволновых процессов проводилось для пластины длиной 240 мм, размер сетки —  $1050 \times 240$  ячеек. При выполнении расчетов использовалось до 20 процессоров Сибирского суперкомпьютерного центра (Новосибирск).

Сначала проводился расчет стационарного течения с использованием условия скольжения и скачка температуры на поверхности пластины [15].

При численном моделировании внешних акустических возмущений переменные на левой границе расчетной области задавались в виде суперпозиции стационарного основного течения и одной или нескольких плоских монохроматических звуковых волн с различными

амплитудами и частотами:

$$U = \langle U \rangle + U' = \langle U \rangle + \sum_i A_i \cos(k_x x + k_y y - \omega_i t - \varphi_i).$$

Локализованные возмущения типа периодического вдува-отсоса, вводимые вблизи передней кромки пластины, моделировались граничным условием для поперечного массового расхода на некотором участке поверхности пластины:

$$\frac{\rho v'|_{y=0}}{\rho_\infty c_\infty} = \sum_i B_i \sin\left(\pi \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}\right) \sin(\omega_i t - \psi_i).$$

Здесь  $A_i$ ,  $B_i$  — амплитуды 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;  $\varphi_i$ ,  $\psi_i$  — фазы начальных возмущений;  $\theta$  — угол, под которым распространяется внешняя акустическая волна;  $c_\infty$  — скорость звука в набегающем потоке;  $x_1$ ,  $x_2$  — координаты границ области локализованного возмущения. На поверхности пластины использовались те же граничные условия, что и при получении стационарного решения, но возмущения температуры полагались равными нулю в силу значительной тепловой инерции пластины. После введения возмущений уравнения Навье — Стокса интегрировались до тех пор, пока нестационарное решение не выходило на установившийся периодический режим. (В работах [9–11], в которых проводилось исследование течения в гиперзвуковом ударном слое на пластине, расположенной под нулевым и ненулевыми углами атаки, показано, что данный алгоритм и метод расчета можно использовать при решении задач восприимчивости и устойчивости ударного слоя.)

**Управление многоволновыми процессами в ударном слое при нулевом угле атаки.** Исследование структуры возмущений, генерируемых в ВУС двумя внешними акустическими волнами, показало, что картина течения в ударном слое аналогична картине течения в случае воздействия монохроматической акустической волны: волновые процессы происходят в области между УВ и верхней границей ПС. Пульсационные характеристики течения имеют два максимума, больший из которых расположен на УВ, а второй — на внешней границе ПС [16]. Аналогичные результаты получены в случае взаимодействия ВУС с локальными периодическими возмущениями типа вдува-отсоса на двух частотах  $f_1 = 30$  кГц и  $f_2 = 50$  кГц при одинаковых начальных амплитудах  $B_1 = B_2 = 1$ .

Приведенные на рис. 1 результаты спектрального анализа пульсаций давления на границе ПС в случае воздействия двух локализованных возмущений показывают, что структура возмущений отличается 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 суммарные и разностные частоты, которые также могут взаимодействовать между собой.

Заметим, что поля возмущений при воздействии на ВУС внешних акустических волн и возмущений типа вдува-отсоса одновременно на двух частотах качественно подобны (рис. 2, а, в). Следовательно, пульсации, генерируемые внешними возмущениями, могут быть подавлены вводимыми контролируруемыми возмущениями путем подбора фазы и амплитуды возмущений типа вдува-отсоса для каждой монохроматической акустической волны, т. е. с использованием интерференционного метода. На рис. 2, д показаны изолинии мгновенных пульсаций плотности в ударном слое пластины при совместном воздействии двух внешних акустических волн и двух внутренних возмущений типа вдува-отсоса, в случае когда каждое из этих возмущений находится в противофазе с соответствующими по частоте внешними возмущениями. Видно, что по всей длине пластины пульсации

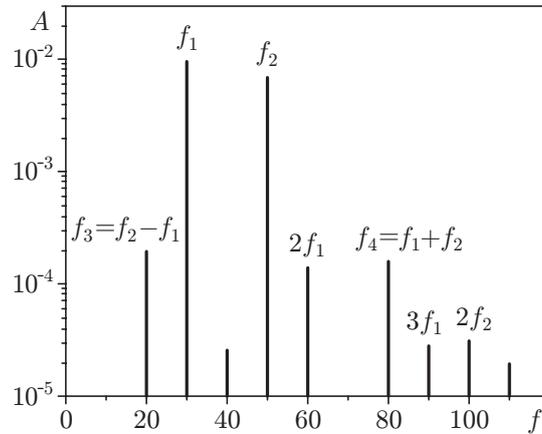


Рис. 1. Спектры частот возмущений давления при  $x = 0,9$  на границе ПС ( $y = 0,11$ ) при одновременном воздействии двух возмущений типа вдува-отсоса ( $f_1 = 30$  кГц,  $f_2 = 50$  кГц,  $B_1 = B_2 = 1$ )

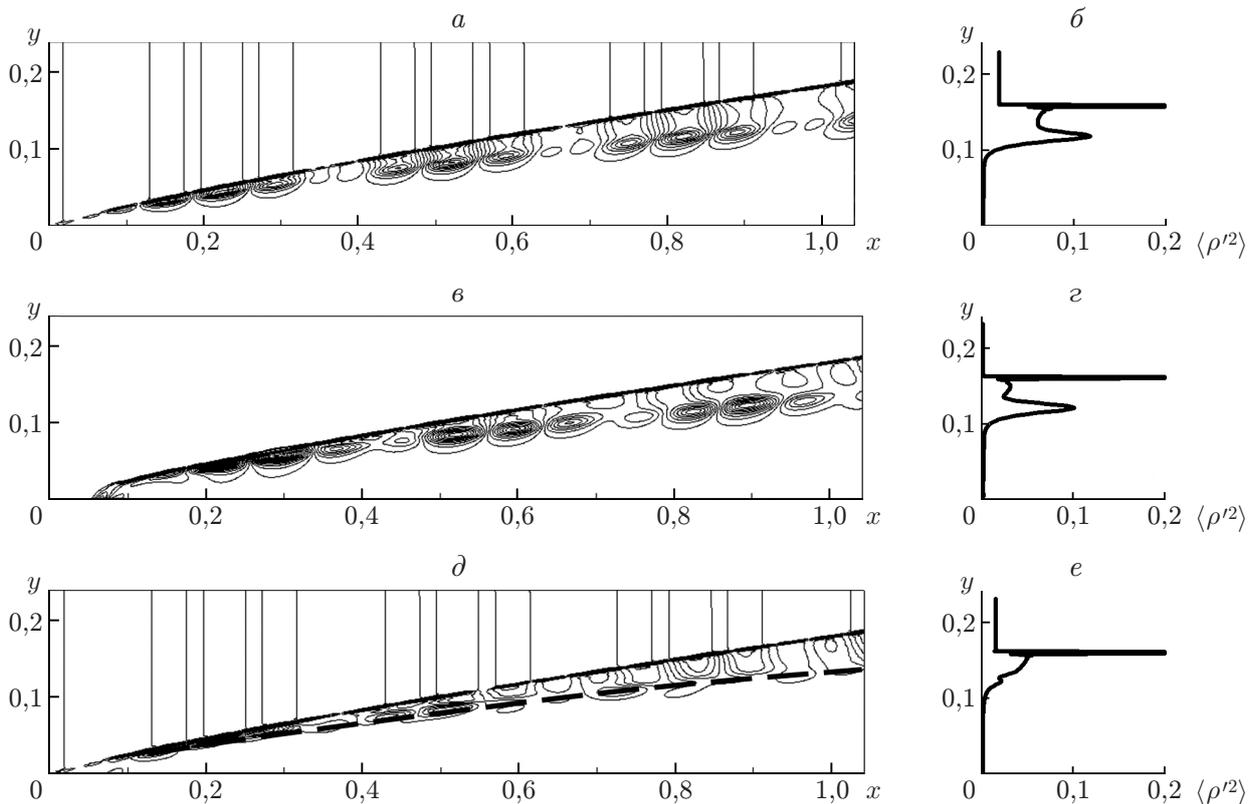


Рис. 2. Изолинии мгновенных пульсаций плотности в ударном слое ( $a, в, д$ ) и распределения среднеквадратичных пульсаций плотности в сечении  $x = 0,9$  ( $б, г, е$ ) при  $M_\infty = 21$ ,  $Re_L = 1,44 \cdot 10^5$ ,  $f_1 = 30$  кГц,  $f_2 = 50$  кГц,  $\theta = 0^\circ$ :  
 $a, б$  — суперпозиция двух медленных акустических волн ( $A_1 = A_2 = 0,014$ );  $в, г$  — суперпозиция двух локальных возмущений типа вдува-отсоса газа с поверхности пластины ( $B_1 = B_2 = 1$ );  $д, е$  — суперпозиция возмущений в противофазе; штриховая линия — верхняя граница ПС

плотности на границе ПС (штриховая линия) существенно уменьшаются. Этот результат подтверждают распределения среднеквадратичных пульсаций плотности по нормали к поверхности в сечении  $x = 0,9$  (рис. 2, *e*).

Для моделирования воздействия многочастотных возмущений использовался спектр естественных пульсаций плотности в свободном потоке аэродинамической трубы Т-327А ИТПМ СО РАН, измеренный методом электронно-пучковой флюоресценции и представляющий собой экспоненциально убывающую зависимость от частоты [10]. По экспериментальному распределению был составлен спектр возмущений (с частотой в диапазоне от 5 до 50 кГц и с шагом, равным 5 кГц), в котором проводилось численное моделирование. Значения расчетных амплитуд нормировались таким образом, чтобы суммарная амплитуда была равна  $A = \sum_{i=1}^{10} A_i = 0,04$ , т. е. соответствовала максимальной суммарной интенсивности пульсаций плотности в свободном потоке аэродинамической трубы Т-327А ИТПМ СО РАН.

Проведено исследование взаимодействия ВУС с внешними акустическими волнами с начальными фазами  $\varphi_i = 0$  и возмущениями типа вдува-отсоса в рассматриваемом спектре частот. Развитием многоволновых возмущений ВУС можно управлять путем подбора начальных фаз  $\psi_i$  и амплитуд  $B_i$  возмущений типа вдува-отсоса для каждой монохроматической акустической волны из указанного спектра. Полученные таким образом данные о фазах  $\psi_i$  начальных возмущений типа вдува-отсоса, необходимых для подавления возмущений, генерируемых в ВУС внешними акустическими волнами в выбранном спектре частот, могут быть представлены в виде линейной зависимости  $\psi_i$  от периода колебаний возмущений с соответствующей частотой:

$$\psi_i = 2,3\pi/\omega_i + 0,0027. \quad (1)$$

Найденные амплитуды  $B_i$  начальных возмущений типа вдува-отсоса, необходимые для подавления возмущений, генерируемых в ВУС внешними акустическими волнами, также можно представить в виде зависимости от начальной амплитуды акустических волн  $A_i$  с соответствующей частотой:

$$B_i = -922,7A_i^2 + 35,14A_i + 0,0353.$$

На рис. 3 приведены распределения среднеквадратичных пульсаций плотности по нормали к поверхности в сечении  $x = 0,9$  при взаимодействии ВУС с многочастотными внешними акустическими волнами (рис. 3, *a*), с возмущениями типа вдува-отсоса (рис. 3, *б*),

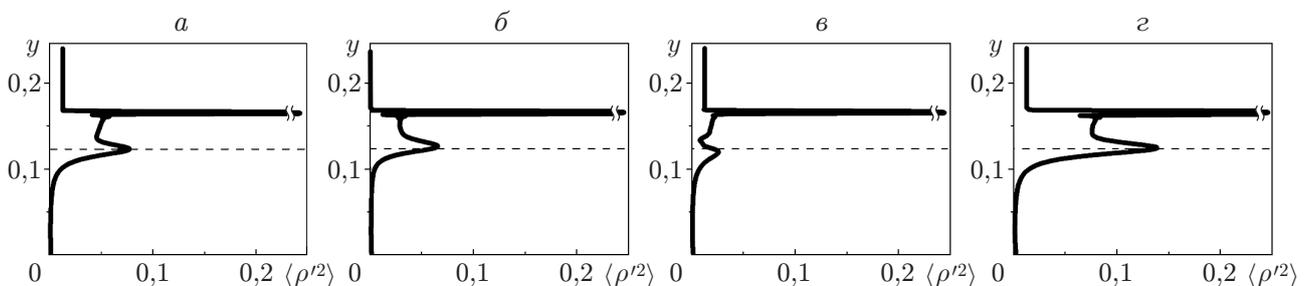


Рис. 3. Распределения среднеквадратичных пульсаций плотности в сечении  $x = 0,9$  при взаимодействии ВУС с внешними акустическими волнами в спектре частот  $f = 5 \div 50$  кГц (*a*), с возмущениями типа вдува-отсоса (*б*), с акустическими волнами и возмущениями типа вдува-отсоса, находящимися в противофазе (*в*) и в синфазе (*г*): штриховая линия — верхняя граница ПС

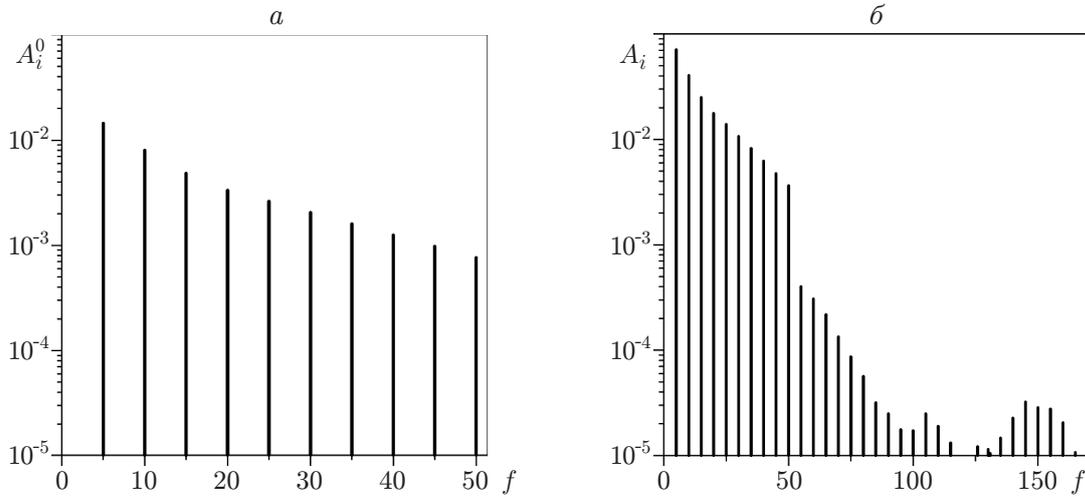


Рис. 4. Спектры пульсаций плотности начальных возмущений вне ударного слоя (а) и пульсаций плотности возмущений внутри ударного слоя (б) при воздействии на ВУС акустических возмущений в спектре частот

с акустическими волнами и возмущениями типа вдува-отсоса, находящимися в противофазе в соответствии с формулой (1) (рис. 3, в) и находящимися в синфазе, т. е. с начальными фазами  $\psi_i + \pi$  (рис. 3, г). Видно, что в случае возмущений, находящихся в противофазе, наблюдается существенное подавление возмущений на верхней границе ПС (штриховые линии), соответственно в случае возмущений, находящихся в синфазе, пульсации на границе ПС увеличиваются в два раза.

Проведен спектральный анализ возмущений плотности на границе ПС при взаимодействии ВУС с многочастотными акустическими возмущениями ( $f = 5 \div 50$  кГц) с начальными фазами  $\varphi_i = 0$  (рис. 4). На рис. 4, б представлены амплитуды генерируемых пульсаций плотности на верхней границе ПС. Отличие этих амплитуд от начальных амплитуд пульсаций плотности (рис. 4, а) обусловлено нелинейными процессами в ВУС — нарастанием гармоник и появлением наряду с основными частотами и их гармониками комбинационных частот.

По спектральным амплитудам возмущений плотности на границе ПС вычислены коэффициенты преобразования, равные отношению амплитуды возмущений плотности, генерируемых на верхней границе ПС, к амплитуде начальных возмущений  $k_i = A_i/A_i^0$ . На рис. 5, а представлена зависимость коэффициента преобразования пульсаций плотности от частоты для трех случаев: при воздействии на ВУС монохроматических акустических волн с заданной частотой из рассматриваемого спектра, при воздействии многоволновых

акустических возмущений с суммарной амплитудой  $A = \sum_{i=1}^{10} A_i = 0,04$  и при воздействии

многоволновых акустических возмущений с суммарной амплитудой  $A = 0,004$ . Видно, что в случае многочастотного воздействия с суммарной амплитудой  $A = 0,04$  значения коэффициента преобразования меньше, чем при воздействии монохроматических возмущений. Вероятно, это вызвано генерацией высокочастотных гармоник и комбинационных частот ( $f > 50$  кГц), а следовательно, перекачкой энергии в высокочастотную область (см. рис. 4, б). При уменьшении суммарной амплитуды многочастотного источника акустических возмущений в 10 раз коэффициенты преобразования приближенно равны коэффициентам преобразования, вычисленным при воздействии на ВУС монохроматических

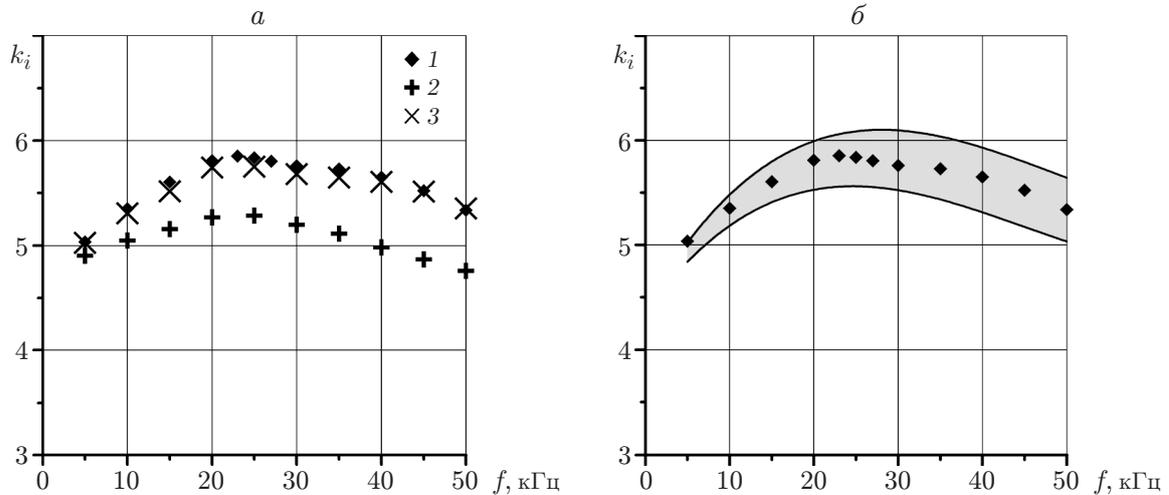


Рис. 5. Зависимости коэффициента преобразования пульсаций плотности от частоты: *a* — воздействие на ВУС акустических волн с синфазными частотами, *б* — воздействие на ВУС акустических волн со случайными частотами (заштрихованная область); 1 — воздействие монохроматических акустических волн, 2 — воздействие акустических волн в спектре частот с суммарной амплитудой, равной 0,04; 3 — воздействие акустических волн в спектре частот с суммарной амплитудой, равной 0,004

акустических волн, что подтверждает сделанный выше вывод о влиянии нелинейных эффектов.

Проведены расчеты для 10 волновых пакетов со случайными фазами ( $\varphi_i$  — случайные числа в диапазоне  $0 \div 2\pi$ ). Значения коэффициентов преобразования для всех этих вариантов находятся в заштрихованной области (рис. 5, б). При осреднении коэффициентов преобразования по ансамблю данных пакетов получаются значения, близкие к значениям, найденным в случае воздействия на ВУС монохроматических акустических волн заданной частоты. Это свидетельствует о том, что внутри каждого пакета имеют место нелинейные эффекты, такие как генерация гармоник и комбинационных частот, но осреднение коэффициентов преобразования по ансамблю ослабляет их.

**Управление возмущениями в ударном слое на пластине, расположенной под углом атаки.** Исследования, выполненные в работе [11], показали, что при малых углах атаки ( $\alpha \leq 15^\circ$ ) в ВУС доминирует энтропийно-вихревая мода возмущений. В этом случае, как и в случае  $\alpha = 0^\circ$  [10, 12], для управления энтропийно-вихревыми возмущениями в ВУС на пластине можно использовать интерференционный метод.

На рис. 6 показаны изолинии пульсаций плотности и профили среднеквадратичных пульсаций плотности при  $\alpha = 10^\circ$ . Пространственные структуры возмущений при воздействии возмущений извне и изнутри ударного слоя практически подобны (рис. 6, а, в). Помимо качественного подобия полей возмущений наблюдается количественное соответствие амплитуд пульсаций плотности на верхней границе ПС (рис. 6, б, г, з). Поэтому путем подбора фазы и амплитуды возмущений типа вдува-отсоса можно подавить пульсации, генерируемые внешней акустической волной.

На рис. 6 видно, что в случае начальных возмущений, находящихся в противофазе, пульсации на границе ПС почти полностью подавляются (рис. 6, д, е), а в случае возмущений, находящихся в синфазе, — усиливаются (рис. 6, ж, з).

На рис. 7 показаны изолинии мгновенных пульсаций энтропии при  $\alpha = 15^\circ$ . Видно, что в случае начальных возмущений, находящихся в противофазе (рис. 7, в), на границе ПС наблюдается почти полное подавление возмущений энтропии.

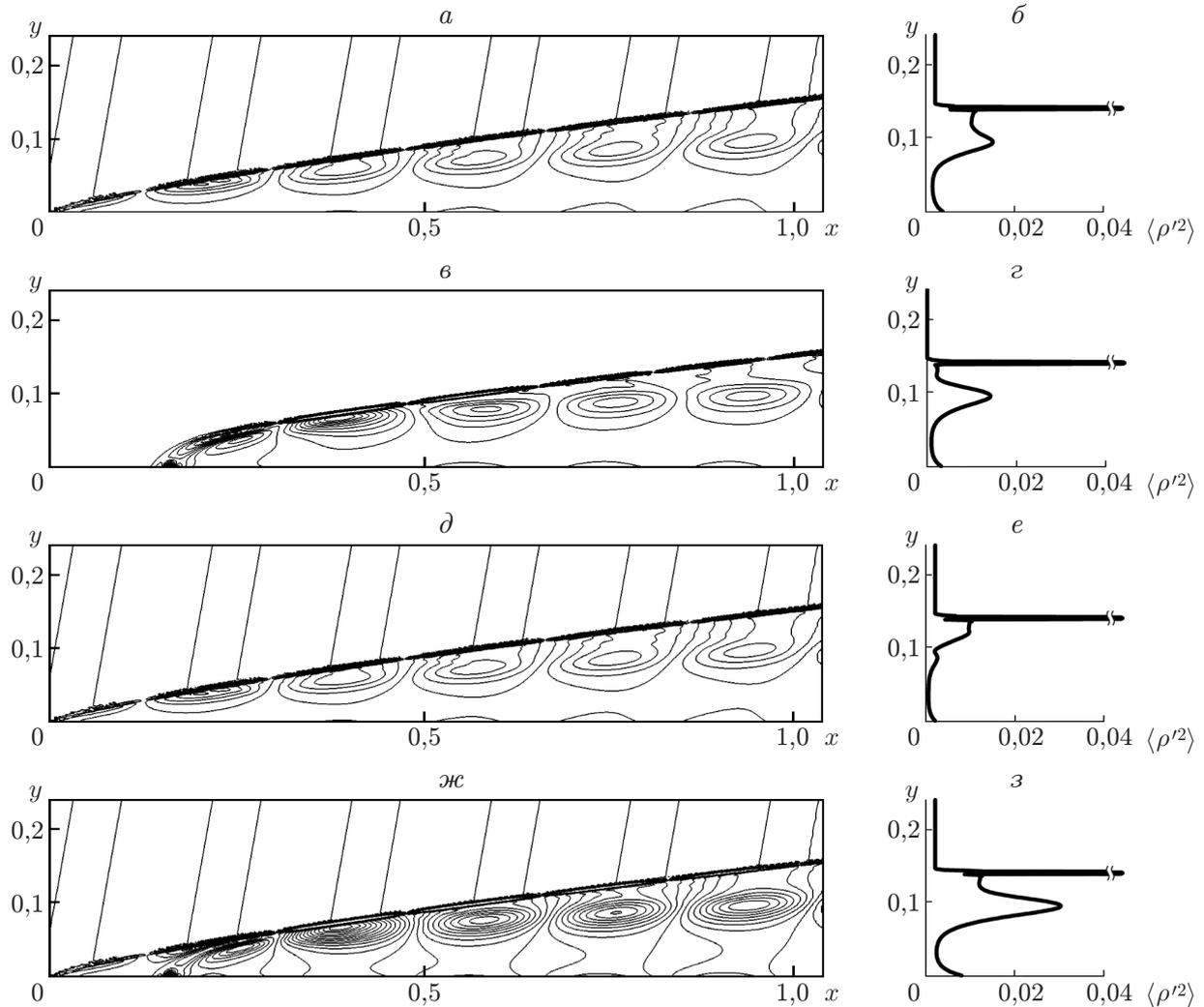


Рис. 6. Изолинии мгновенных пульсаций плотности (*а, в, д, ж*) и распределения среднеквадратичных пульсаций плотности в сечении  $x = 0,9$  (*б, г, е, з*) при  $M_\infty = 21$ ,  $\alpha = 10^\circ$ ,  $f = 38$  кГц,  $A = 0,003$ ,  $B = 0,06$ ,  $x_1 = 0,155$ ,  $x_2 = 0,17$ :

*а, б* — воздействие внешней акустической волны, *в, г* — воздействие возмущений типа вдува-отсоса, *д, е* — противофазное воздействие возмущений, *ж, з* — синфазное воздействие возмущений

На рис. 8 показаны распределения амплитуды среднеквадратичных пульсаций давления на границе ПС  $\langle p_{ПС}^{\prime 2} \rangle$  (рис. 8, *а*) и на поверхности пластины  $\langle p_w^{\prime 2} \rangle$  (рис. 8, *б*). В случае начальных возмущений, находящихся в противофазе, наблюдается не только существенное уменьшение пульсаций давления на границе ПС, но и некоторое снижение пульсаций плотности и давления на поверхности пластины.

**Заключение.** Выполнено прямое численное моделирование развития возмущений при взаимодействии гиперзвукового вязкого ударного слоя на пластине с многоволновыми акустическими возмущениями внешнего потока и локализованными возмущениями типа вдува-отсоса с поверхности пластины, установлено возникновение суммарных и разностных комбинационных частот.

В диапазоне углов атаки  $0^\circ \leq \alpha \leq 15^\circ$ , в котором в ВУС развиваются преимущественно энтропийно-вихревые возмущения, численно реализован интерференционный метод управления возмущениями: пульсации, генерируемые внешними акустическими возму-

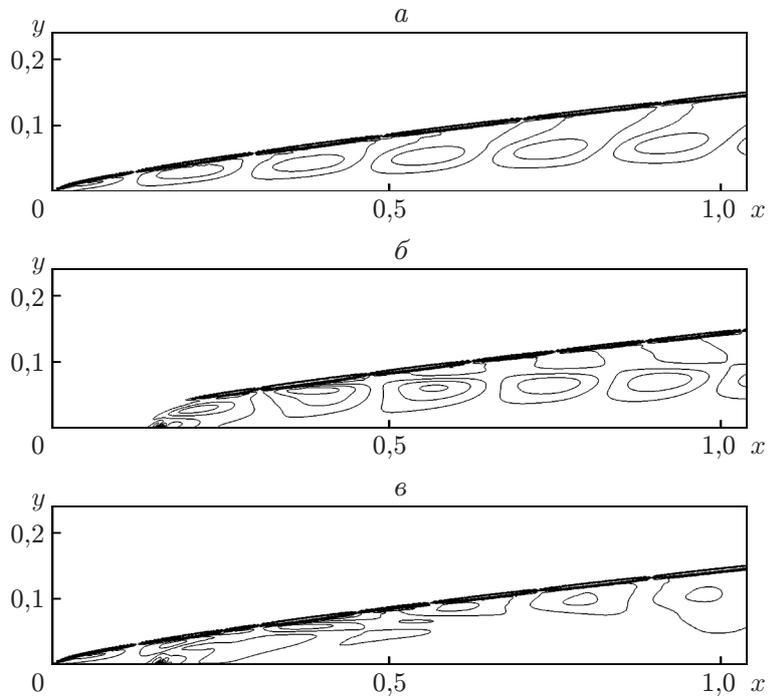


Рис. 7. Изолинии мгновенных пульсаций энтропии при  $M_\infty = 21$ ,  $\alpha = 15^\circ$ ,  $f = 38$  кГц,  $A = 0,003$ ,  $B = 0,073$ ,  $x_1 = 0,155$ ,  $x_2 = 0,17$ :  
*a* — воздействие внешней акустической волны, *б* — воздействие возмущений типа вдува-отсоса, *в* — противофазное воздействие возмущений

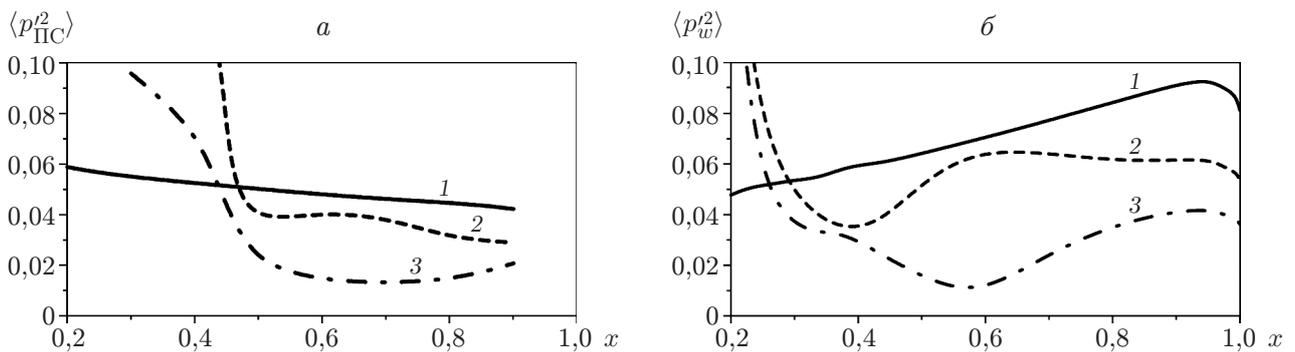


Рис. 8. Распределения амплитуды среднеквадратичных пульсаций давления на границе ПС (*a*) и на поверхности пластины (*б*) при  $M_\infty = 21$ ,  $\alpha = 10^\circ$ ,  $f = 38$  кГц,  $A = 0,003$ ,  $B = 0,06$ ,  $x_1 = 0,155$ ,  $x_2 = 0,17$ :  
*1* — воздействие внешней монохроматической акустической волны, *2* — воздействие возмущений типа вдува-отсоса, *3* — противофазное воздействие возмущений

шениями, подавлены возмущениями типа вдува-отсоса, вводимыми с поверхности модели, путем подбора фазы и амплитуды возмущений типа вдува-отсоса. Тот же метод реализован для управления многоволновыми возмущениями. Начальные амплитуды и фазы возмущений типа вдува-отсоса, необходимые для подавления рассмотренных многоволновых возмущений в ВУС, представлены в виде обобщающих зависимостей.

Авторы выражают благодарность А. А. Маслову, С. Г. Миронову, А. Н. Кудрявцеву за помощь в работе и полезные обсуждения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Качанов Ю. С.** Возникновение турбулентности в пограничном слое / Ю. С. Качанов, В. В. Козлов, В. Я. Левченко. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1982.
2. **Gmelin C., Rist U.** Active control of laminar-turbulent transition using instantaneous vorticity signals at the wall // *Phys. Fluids*. 2001. V. 13, N 2. P. 513–519.
3. **Maslov A. A., Kosinov A. D., Shevelkov S. G.** Experiments on the stability of supersonic laminar boundary layers // *J. Fluid Mech.* 1990. V. 219. P. 621–633.
4. **Maslov A. A., Sidorenko A. A., Arnal D., Shipliyuk A. N.** Leading edge receptivity of hypersonic boundary layer on a flat plate // *J. Fluid Mech.* 2001. V. 426. P. 73–94.
5. **Фомин В. М., Федоров А. В., Маслов А. А. и др.** Стабилизация гиперзвукового пограничного слоя покрытиями, поглощающими ультразвук // *Докл. АН*. 2002. Т. 384, № 2. С. 1–5.
6. **Fedorov A. V., Shipliyuk A. N., Maslov A. A., et al.** Stabilization of a hypersonic boundary layer using an ultrasonically absorptive coating // *J. Fluid Mech.* 2003. V. 479. P. 99–124.
7. **Егоров И. В., Судаков В. Г., Федоров А. В.** Численное моделирование стабилизации сверхзвукового пограничного слоя на плоской пластине пористым покрытием // *Изв. РАН. Механика жидкости и газа*. 2006. № 3. С. 39–49.
8. **Egorov I. V., Fedorov A. V., Soudakov V. G.** Receptivity of a hypersonic boundary layer over a flat plate with a porous coating // *J. Fluid Mech.* 2008. V. 601. P. 165–187.
9. **Кудрявцев А. Н., Миронов С. Г., Поплавская Т. В., Цырюльников И. С.** Экспериментальное исследование и прямое численное моделирование развития возмущений в вязком ударном слое на плоской пластине // *ПМТФ*. 2006. Т. 47, № 5. С. 3–15.
10. **Maslov A. A., Kudryavtsev A. N., Mironov S. G., et al.** Wave processes in a viscous shock layer and control of fluctuations // *J. Fluid Mech.* 2010. V. 650. P. 81–118.
11. **Маслов А. А., Миронов С. Г., Поплавская Т. В., Цырюльников И. С.** Волновые процессы в ударном слое на пластине под углом атаки // *ПМТФ*. 2010. Т. 51, № 4. С. 39–47.
12. **Фомин В. М., Кудрявцев А. Н., Маслов А. А. и др.** Активное управление возмущениями в гиперзвуковом ударном слое // *Докл. АН*. 2007. Т. 414, № 2. С. 1–4.
13. **Маслов А. А., Кудрявцев А. Н., Миронов С. Г. и др.** Управление возмущениями в гиперзвуковом ударном слое на пластине нестационарным воздействием с поверхности // *Изв. РАН. Механика жидкости и газа*. 2008. № 3. С. 152–161.
14. **Кудрявцев А. Н., Поплавская Т. В., Хотяновский Д. В.** Применение схем высокого порядка точности при моделировании нестационарных сверхзвуковых течений // *Мат. моделирование*. 2007. Т. 19, № 7. С. 39–55.
15. **Коган М. Н.** Динамика разреженного газа. М.: Наука, 1974.
16. **Маслов А. А., Поплавская Т. В., Цырюльников И. С.** Нелинейные волновые процессы в гиперзвуковом ударном слое // *Изв. РАН. Механика жидкости и газа*. 2010. № 4. С. 43–50.

*Поступила в редакцию 25/VIII 2011 г.,  
в окончательном варианте — 19/IX 2011 г.*