

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

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

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

## **ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ГИПЕРЗВУКОВОМ УДАРНОМ СЛОЕ**

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

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

### **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.

Одним из действенных методов управления восприимчивостью ПС и его устойчиво-

стью является введение в ПС контролируемых периодических возмущений с определенными амплитудно-фазовыми характеристиками. Данный активный метод управления может быть также распространен на высокоскоростные течения ( $M_\infty > 12$ ).

В рамках этой задачи представляет интерес исследование взаимодействия с ударным слоем контролируемых периодических возмущений, создаваемых внутри ударного слоя. Генератором таких возмущений может быть точечный источник типа вдув-отсос, расположенный на поверхности. Для реализации задачи управления необходимы данные о пространственной структуре возникающих возмущений, влияния на их характеристики частоты, амплитуды контролируемых пульсаций и положения источника.

Теоретические исследования локализованной генерации волн неустойчивости сверхзвуковых ПС в рамках линейной теории устойчивости проведены в работах [1–4]. При экспериментальном изучении локализованной восприимчивости гипер-

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке АВЦП «РНПВШ» (№ 2.1.1/3963) и РФФИ (гранты № 09-08-00557 и 09-08-00679).

звуковых ВУС был применен метод искусственных возмущений [5–9], в качестве источника контролируемых периодических возмущений – кососрезный газодинамический свисток [5; 9; 10], создающий в потоке акустические волны. Методом электронно-пучковой флюоресценции азота были измерены пульсации плотности как в свободном потоке, так и за УВ. К недостаткам экспериментальных работ можно отнести введение в ударный слой искусственных пульсаций относительно низких частот и трудность регулировки амплитуды вводимых возмущений. Кроме того, широкие параметрические исследования в трубных экспериментах весьма трудоемки и дороги.

Только совместный анализ экспериментальных данных и данных численного моделирования позволяет получить целостную картину течения и выявить процессы восприимчивости и развития возмущений в гиперзвуковом пограничном и ударном слоях. В последнее время появились работы по прямому численному моделированию локализованной восприимчивости в сверхзвуковых пограничных слоях [11–13]. Процессы возникновения и развития возмущений в ударных слоях [14; 15] существенно отличаются от тех, что присущи сверхзвуковым пристенным течениям при умеренных числах Маха ( $M_\infty < 10$ ).

В данной работе рассматривается взаимодействие ВУС с возмущениями типа вдув-отсос, т. е. исследуется локализованная восприимчивость, приводятся результаты параметрических расчетов, включающие вариации частоты, амплитуды и положения источника локализованных возмущений. Изучен механизм воздействия этих возмущений на ВУС.

### Постановка задачи и численная реализация

Рассматривается гиперзвуковое обтекание плоской бесконечно тонкой пластины длиной  $L = 240$  мм, расположенной под нулевым углом атаки к набегающему потоку с умеренным значением числа Рейнольдса  $Re_L = 1,44 \cdot 10^5$  и числах Маха  $M_\infty > 10$ . В данной работе моделируется развитие двухмерных возмущений, которые при больших числах Маха набегающего потока являются наиболее неустойчивыми. Двумерные уравнения Навье – Стокса, записан-

ные в виде системы законов сохранения, решаются с помощью схем сквозного счета высокого порядка точности с использованием программы, созданной в ИТПМ СО РАН [16].

Детали численного метода описаны подробно в [17]. Относительно свойств среды предполагается, что газ совершенный, с постоянными теплоемкостями. Вязкость газа вычисляется по формуле Сазерленда с параметрами, соответствующими азоту. Температура поверхности самой пластины  $T_w$  предполагается постоянной и равна 300 К.

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. В работе использовалась равномерная сетка  $1\,050 \times 240$  ячеек (по  $x$  и  $y$  соответственно), размер шагов  $\Delta x = 0,001$ ,  $\Delta y = 0,001$ . Обезразмеривание переменных осуществлялось по формулам:  $x = x^*/L$ ,  $y = y^*/L$ , где индекс \* соответствует размерным величинам.

В теории гиперзвуковых течений [18] введен параметр взаимодействия

$$\chi = \frac{M_\infty^3}{\sqrt{Re_x}},$$

который характеризует степень вязко-невязкого взаимодействия и подразделяет течения на две группы: при  $\chi > 1$  – режим сильного вязко-невязкого взаимодействия, при  $\chi < 1$  – режим слабого вязко-невязкого взаимодействия. В табл. 1 приведены значения параметра взаимодействия для различных  $M_\infty$  в зависимости от продольной координаты  $x$  при обтекании пластины с  $Re_1 = 6 \cdot 10^5 \text{ м}^{-1}$ .

Таблица 1

Параметр взаимодействия  $\chi$

$M_\infty/x$	0,2	0,4	0,6	0,8	1
12	10,2	7,2	5,9	5,1	4,6
16	24,1	17,1	13,9	12,1	10,8
21	54,6	38,6	31,5	27,3	24,4

Из табл. 1 видно, что в данной работе во всей области обтекания пластины при всех числах Маха параметр взаимодействия  $\chi$

существенно больше единицы, что соответствует течениям с сильным вязко-невязким взаимодействием.

Анализ экспериментальных данных [19] и расчетов [20] для таких течений показывает, что для значений параметра разрежения

$$V = \chi / M_\infty^2 = \sqrt{C} M_\infty / \sqrt{\text{Re}_x} > 0,1$$

( $C$  – постоянная Чепмена – Рубезина) на поверхности модели необходимо использовать граничные условия со скольжением и скачком температуры. В табл. 2 приведены значения параметра разрежения вдоль по потоку при условиях расчетной задачи.

Таблица 2  
Параметр разрежения  $V$

$M_\infty/x$	0,05	0,1	0,2	0,8	1
12	0,14	0,10	0,07	0,035	0,032
16	0,19	0,13	0,09	0,047	0,042
21	0,25	0,18	0,12	0,062	0,055

Из табл. 2 видно, что на части пластины вблизи передней кромки при указанных числах Маха  $V > 0,1$ . Поэтому в граничных условиях на пластине учитывалось скольжение и скачок температуры [21].

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. Результаты моделирования стационарного течения показали хорошее совпадение с данными измерений числа Маха и средней плотности в ударном слое [17].

После расчета стационарного течения решалась задача о взаимодействии ВУС с возмущениями типа вдув-отсос. При численном решении задачи взаимодействия локализованных возмущений типа вдув-отсос с ВУС они моделировались заданием граничного условия для поперечного массового расхода на некотором участке поверхности пластины вблизи передней кромки, как в работе [11]:

$$\rho^* v^* \Big|_{y=0} / \rho_\infty^* c_\infty^* = A \sin \left( \pi \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \right) \sin \omega t .$$

Здесь  $A$  – амплитуда;  $x, t, \omega$  – безразмерные продольная координата, время и частота соответственно;  $x_1$  и  $x_2$  – границы возмущенной области.

Обезразмеривание переменных, входящих в уравнения, осуществлялось по следующим формулам:

$$t = t^* c_\infty^* / L ,$$

$$\omega = 2\pi f L / c_\infty^* .$$

Здесь  $c_\infty^*$  – размерная скорость звука в набегающем потоке;  $f$  – размерная частота вводимых возмущений. Следует заметить, что в [11] на участке возмущения использовалась полная волна, а в данной работе используется граничное условие с половинным синусом вдоль координаты  $x$ . Это связано с необходимостью имитации работы кососрезного свистка [5; 9; 10; 15], в котором происходит либо только истечение, либо втекание.

Температура поверхности равнялась температуре пластины, полученной ранее при решении стационарной задачи, т. е. возмущения температуры на поверхности пластины равны нулю. Уравнения Навье – Стокса с новыми граничными условиями интегрировались до момента выхода нестационарного решения на установившийся периодический режим.

### Влияние числа Маха

В [14; 15] показано, что основной особенностью механизма формирования поля пульсаций плотности при взаимодействии ударного слоя с возмущениями типа вдув-отсос газа на поверхности пластины является генерация внутри ударного слоя энтропийно-вихревых возмущений, распространяющихся в области между УВ и верхней границей ПС. На рис. 1 приведены изолинии пульсаций плотности для различных  $M_\infty = 12, 16$  и  $21$ . Видно, что при гиперзвуковых числах Маха ( $> 12$ ) с уменьшением числа Маха наклон УВ изменяется слабо, а толщина ПС уменьшается, и его граница (пунктирная линия на рис. 1) отодвигается от УВ. Как видно из рисунков, при  $M_\infty = 21$  и  $16$  возмущения имеют характерный вид с двумя максимумами: на УВ и на границе ПС. А при  $M_\infty = 12$  возмущения имеют три максимума: на УВ, на границе ПС и между ними. Это связано с шириной области взаи-

модействия начальных возмущений с УВ: чем меньше  $M_\infty$ , тем шире эта область по  $x$ .

Из рис. 2, где приведены амплитуды пульсаций плотности, видно, что с уменьшением числа Маха амплитуды на УВ изменяются слабо, а на границе ПС падают.

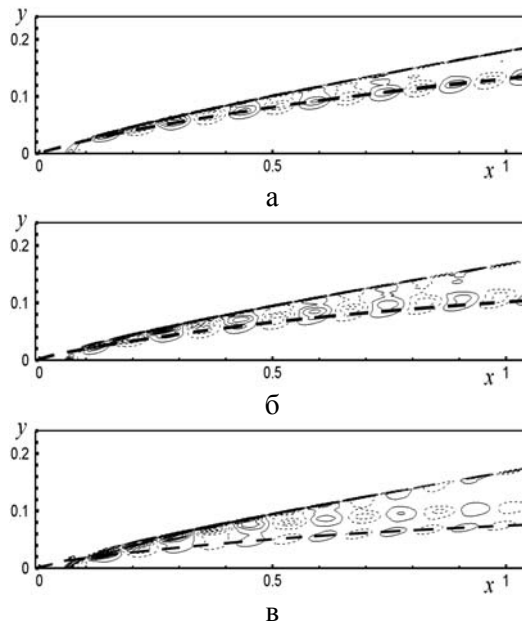


Рис. 1. Изолинии пульсаций плотности для возмущений вдува-отсоса при  $M_\infty = 21$  (а), 16 (б), 12 (в),  $Re_L = 1,44 \cdot 10^5$ ,  $T_w = 300$  К,  $A = 0,03$ ,  $f = 38,4$  кГц,  $x_1 \div x_2 = (65 \div 80)\Delta x$  (пунктирная линия – граница ПС)

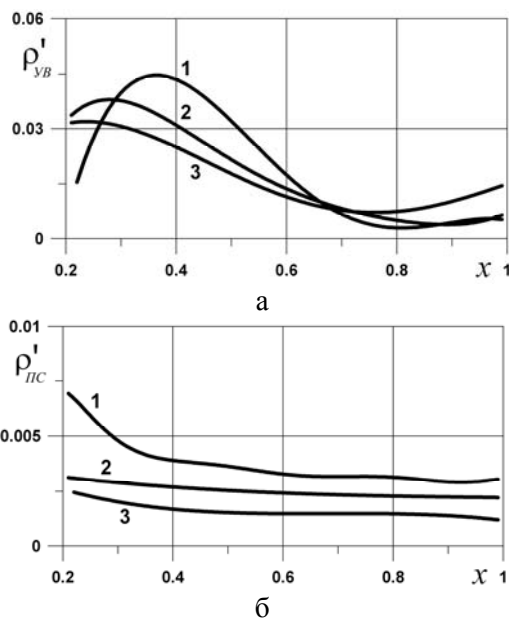


Рис. 2. Амплитуды пульсаций плотности для различных чисел Маха на УВ (а) и на границе ПС (б),  $Re_L = 1,44 \cdot 10^5$ ,  $T_w = 300$  К,  $A = 0,03$ ,  $f = 38,4$  кГц,  $x_1 \div x_2 = (65 \div 80)\Delta x$ : 1 –  $M_\infty = 21$ ; 2 –  $M_\infty = 16$ ; 3 –  $M_\infty = 12$

### Влияние частоты локализованных возмущений

В [14] показано, что в случае локализованной восприимчивости ВУС на пластине при  $M_\infty = 21$  амплитуда пульсаций плотности на УВ обратно пропорциональна частоте начальных возмущений типа вдув-отсос и имеет немонотонную зависимость от продольной координаты.

На рис. 3 изображены амплитуды пульсаций плотности для различных частот возмущений типа вдув-отсос при  $M_\infty = 12$ . Видно, что и в этом случае с увеличением частоты начального возмущения вдува-отсоса амплитуды пульсаций плотности на границе ПС уменьшаются по всей длине пластины, а на УВ этот эффект наиболее заметен у носика пластины. Вдали от носика пластины амплитуды пульсаций плотности на УВ почти одинаковы и убывают вдоль по потоку. Аналогичный эффект уменьшения амплитуды пульсаций с увеличением частоты наблюдался в работе [22], в которой рассматривалось взаимодействие ВУС с внешними акустическими возмущениями.

### Влияние местоположения источника возмущений

На рис. 4 изображены изолинии мгновенных пульсаций плотности ( $M_\infty = 12$ ) при различных местоположениях источника типа вдув-отсос. Видно, что при отдалении источника от носика пластины наблюдаются два максимума пульсаций плотности вблизи границы ПС (рис. 4, б), а также уменьшение амплитуд пульсаций по всей длине пластины как на УВ, так и на границе ПС (рис. 5).

Такое падение амплитуды пульсаций плотности с увеличением расстояния источника от передней кромки объясняется падением эффективности возмущения среднего течения с увеличением расстояния от источника вдува-отсоса до области высокой плотности под УВ по координате  $y$ .

### Механизм формирования пульсаций в ударном слое от возмущений источника вдува-отсоса

Согласно экспериментальным данным [23], газодинамический свисток в области течения до УВ создает акустические возмущения медленной моды, а вихревые воз-

мушения распространяются вблизи следа за свистком. В численном моделировании пульсации массового расхода с поверхности пластины, имитирующие источник возмущений типа вдув-отсос, также генерируют интенсивные акустические волны.

В случае, когда источник расположен на достаточно большом удалении от передней кромки пластины (рис. 4, в), фронт звуковых волн не достигает УВ, и имеется граница области распространения возмущений, которая лежит ниже УВ. Для расчетных возмущений давления ниже этой границы представляется возможным определить волновой вектор и соответственно моду возмущений. Для каждой точки волнового фронта в сечении  $x = 0,7$  от  $y = 0$  до  $y = 0,08$  были определены проекции волнового вектора  $k_x$  и  $k_y$ . Результаты представлены на рис. 6 кривой 1. Значения  $k_y < 0,01$  соответствуют волнам в пограничном слое,  $k_y > 0,01$  – волнам выше границы пограничного слоя. Далее из дисперсионного соотношения

$$\omega - \vec{u}\vec{k} = \pm ck$$

для каждого направления распространения волнового фронта были вычислены аналитические значения  $k_x$  и  $k_y$  быстрой и медленной акустической моды (кривые 2 и 3 на рис. 6). Эти вычисления производились с учетом местного числа Маха и значения вектора скорости в соответствующих точках по координате  $y$ , взятых из данных расчетов. Из рис. 6 видно, что кривая 1 практически совпадает с кривой 2. Это означает, что возмущения, полученные в численном моделировании, являются быстрыми акустическими волнами. Это согласуется с данными численного моделирования возмущений, возбуждаемых локальным периодическим вдувом-отсосом в предотрывном ПС в угле сжатия при  $M_\infty = 5,4$  [24], где показано, что локальный источник также генерирует в основном быстрые акустические волны с фазовой скоростью  $1 + 1/M_\infty$ .

Таким образом, пульсации массового расхода с поверхности пластины возбуждают в ударном слое акустические пульсации. Неакустические пульсации массового расхода будут сноситься потоком вдоль линий тока и, следовательно, не смогут участвовать во взаимодействии с УВ. Наибольший интерес поэтому представляют акустические возмущения источника, которые могут взаимодействовать с УВ.

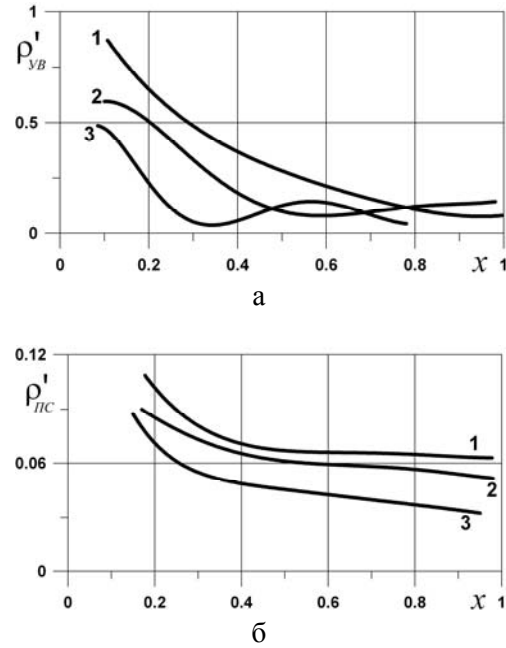


Рис. 3. Амплитуды пульсаций плотности для различных частот возмущений типа вдув-отсос на УВ (а) и на границе ПС (б) при  $M_\infty = 12$ ,  $Re_L = 1,44 \cdot 10^5$ ,  $T_w = 300$  К,  $A = 0,03$ ,  $x_1 \div x_2 = (20 \div 35)\Delta x$ : 1 –  $f = 38,4$  кГц; 2 –  $f = 50$  кГц; 3 –  $f = 80$  кГц

При различных местоположениях источника локализованных возмущений наблюдаются различные картины развития возмущений внутри ударного слоя рис. 7, з–е. В случае (рис. 4, в; б, в, е), когда источник расположен на достаточно большом удалении от передней кромки пластины, его возмущения не воздействуют непосредственно на УВ в пределах расчетной области и имеют границу области распространения, которая лежит ниже УВ. Когда источник расположен близко к передней кромке пластины (рис. 4, а, б; б, а, б, з, д), акустические возмущения, идущие от источника, взаимодействуют с УВ и генерируют энтропийно-вихревые возмущения, как было показано в [15]. Если источник отодвигается от передней кромки, то наблюдаются две области интенсивных неакустических возмущений и два пути их распространения (рис. 7, б, д). Это связано с характеристиками источника вдува-отсоса.

На рис. 8 представлены распределения среднеквадратичных пульсаций давления в разных сечениях  $y = \text{const}$ . Видно наличие двух разнесенных в пространстве пиков интенсивности возмущений, расстояние между

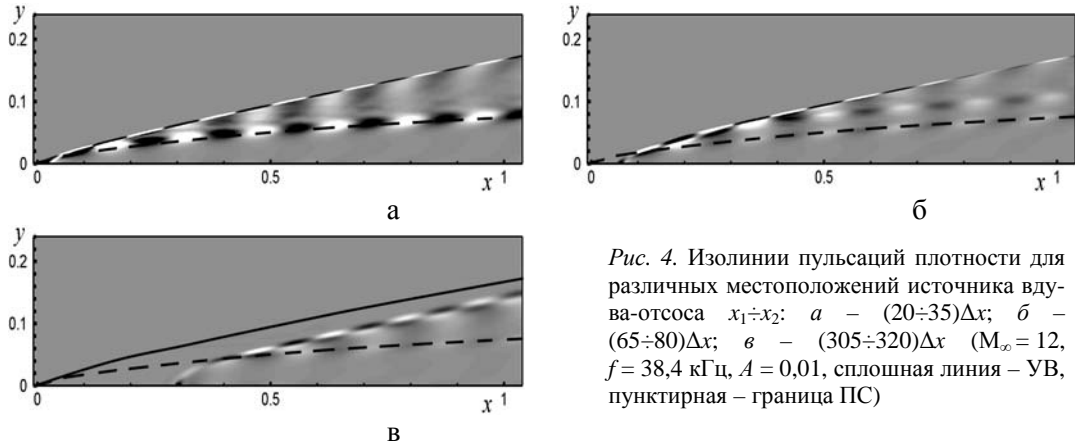


Рис. 4. Изолинии пульсаций плотности для различных местоположений источника вдува-отсоса  $x_1 \div x_2$ : а –  $(20 \div 35)\Delta x$ ; б –  $(65 \div 80)\Delta x$ ; в –  $(305 \div 320)\Delta x$  ( $M_\infty = 12$ ,  $f = 38,4$  кГц,  $A = 0,01$ , сплошная линия – УВ, пунктирная – граница ПС)

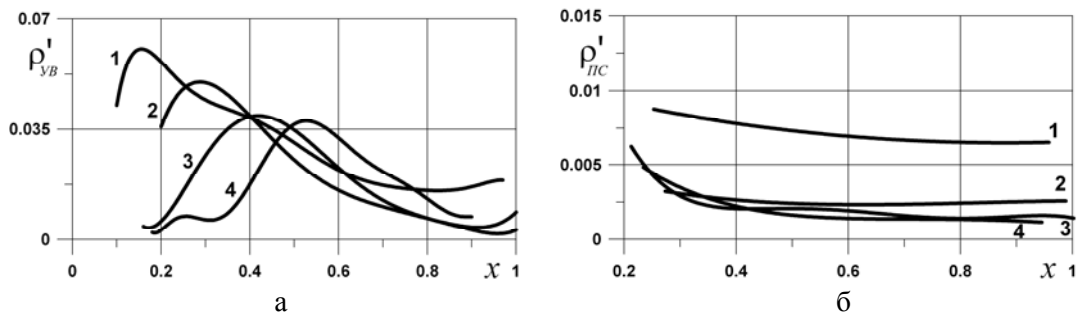


Рис. 5. Амплитуды пульсаций плотности на УВ (а) и на границе ПС (б) ( $M_\infty = 16$ ,  $Re_L = 1,44 \cdot 10^5$ ,  $T_w = 300$  К,  $A = 0,035$ ,  $f = 38,4$  кГц) при различных местоположениях источника вдува-отсоса: 1 –  $x_1 \div x_2 = (35 \div 50)\Delta x$ ; 2 –  $(65 \div 80)\Delta x$ ; 3 –  $(95 \div 110)\Delta x$ ; 4 –  $(125 \div 140)\Delta x$

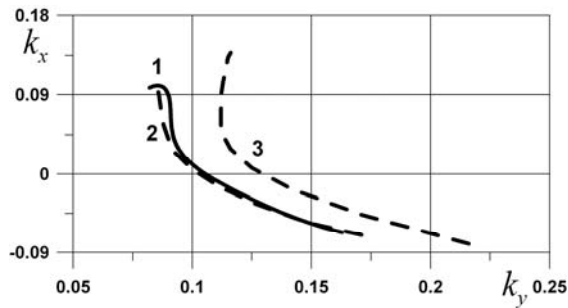


Рис. 6. Компоненты волнового вектора: 1 – расчетные значения; 2, 3 – теоретические значения для быстрой и медленной моды при  $M_\infty = 12$ ,  $Re_L = 1,44 \cdot 10^5$ ,  $T_w = 300$  К,  $A = 0,01$ ,  $f = 38,4$  кГц,  $x_1 \div x_2 = (305 \div 320)\Delta x$

которыми увеличивается с ростом  $y$ . Наличие этих двух пиков интенсивности возмущений позволяет объяснить эффект возникновения одной или двух вихревых дорожек при воздействии источника вдува-отсоса. В случае, когда источник расположен близко к передней кромке пластины, т. е. близко к УВ, расстояние между пиками мало, и они взаимодействуют с УВ практически одновременно (рис. 7, а), что приводит к образованию одной вихревой дорожки. Если

же источник удаляется от передней кромки пластины, увеличивается расстояние от него до УВ, и поэтому происходит разделение пиков пульсаций давления в пространстве. Таким образом, увеличивается ширина области взаимодействия возмущений от источника с УВ. При этом воздействие этих пиков на УВ происходит в разных положениях по продольной координате, что приводит к появлению двух вихревых дорожек.

### Влияние амплитуды локализованных возмущений

Амплитуды возмущений, генерируемые в УС, зависят от амплитуды возмущений, вводимых вблизи передней кромки пластины. Информация о такой зависимости важна для задачи управления интенсивностью пульсаций в ударном слое с помощью вдува-отсоса.

На основе Фурье-анализа расчетных данных были получены спектральные амплитуды возмущения плотности на границе пограничного слоя (рис. 9). Результаты расчетов показывают линейность влияния искусственных периодических возмущений в широком диапазоне начальных амплитуд и отсутствие заметного искажения поля среднего течения.

Следует заметить, что нелинейные эффекты в ударном слое для внешних акустических волн возникают уже при амплитудах начального возмущения  $A > 0,12$ , в частности имеют место насыщение амплитуды пульсаций на основной частоте и быстрый рост гармоник [25]. В случае возмущений от локального источника вдува-отсоса нелинейность на основной частоте не проявляет себя до  $A = 1,6$  (см. рис. 9).

### Влияние ширины области воздействия начальных возмущений вдува-отсоса

В расчетах невозможно реализовать режимы с большими амплитудами начальных возмущений вдува-отсоса. Это связано с ограничением максимальной скорости вдува местной скоростью звука. Для  $M_\infty = 21$  предельная величина этих возмущений не превышала величины 1,6. Однако увеличивать амплитуду вводимых, а значит, и генерируемых возмущений возможно, увеличивая ширину области введения их на поверхности пластины. На рис. 10 приведены амплитуды пульсаций плотности на границе ПС при  $M_\infty = 21$  для трех случаев, различающихся шириной участка ввода начальных возмущений на поверхности пластины. Видно, что увеличение ширины участка  $x_1 \div x_2$  в 2 раза приводит к увеличению амплитуды возмущений плотности на границе ПС в 1,7 раза, а увеличение в 4 раза – в 2,6.

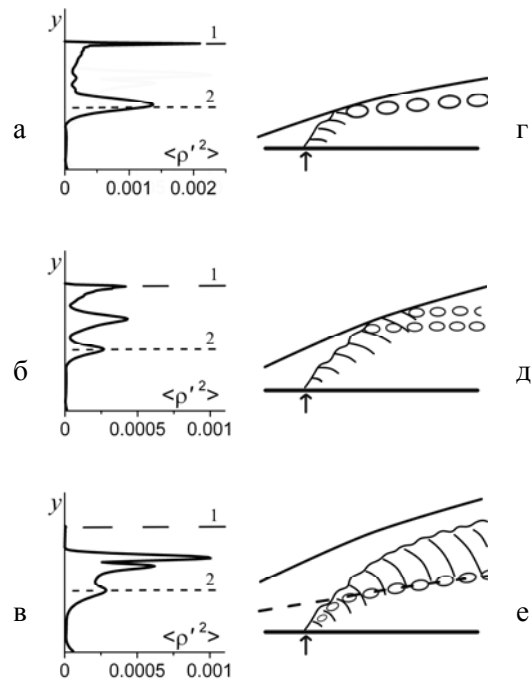


Рис. 7. Среднеквадратичные пульсации плотности в сечении  $x = 0,7$  (а–в) и схемы взаимодействия с УВ возмущений, генерируемых вдувом-отсосом (г–е) для различных местоположений источника вдува-отсоса (см. рис. 4) ( $M_\infty = 12$ ,  $f = 38,4$  кГц,  $A = 0,01$ ): 1 – УВ; 2 – граница ПС

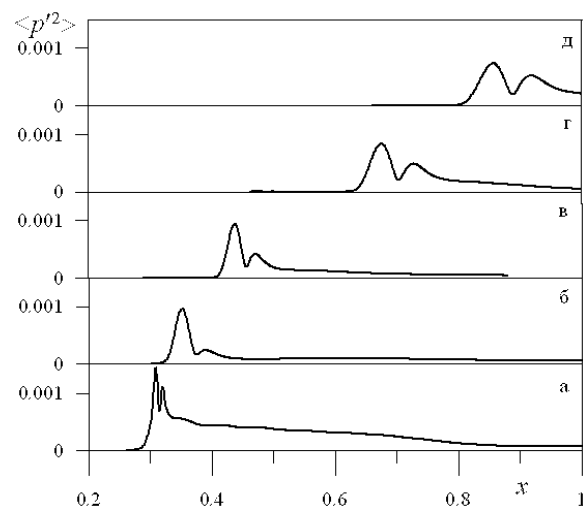


Рис. 8. Распределения среднеквадратичных пульсаций давления в разных сечениях  $y$ : а –  $y = 0$ ; б –  $y = 30\Delta y$ ; в –  $y = 60\Delta y$ ; г –  $y = 90\Delta y$ ; д –  $y = 120\Delta y$  ( $M_\infty = 12$ ,  $Re_L = 1,44 \cdot 10^5$ ,  $T_w = 300$  К,  $A = 0,01$ ,  $f = 38,4$  кГц,  $x_1 \div x_2 = (305 \div 320)\Delta x$ )

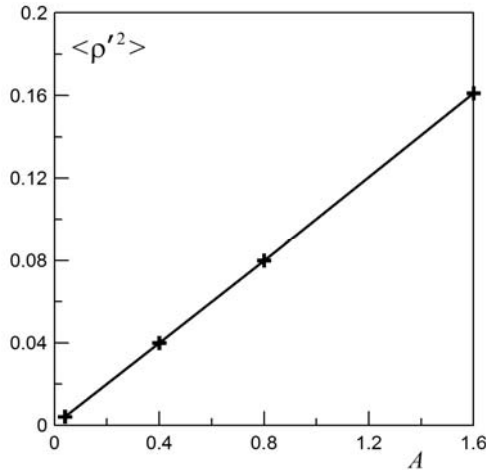


Рис. 9. Амплитуды пульсаций плотности в точке  $y = 0,08$  в зависимости от амплитуды начального возмущения типа вдув-отсос  $A$  при  $x = 0,5$  ( $M_\infty = 21$ ,  $f = 38,4$  кГц,  $A = 0,03$ ,  $x_1 \div x_2 = (65-80)\Delta x$ )

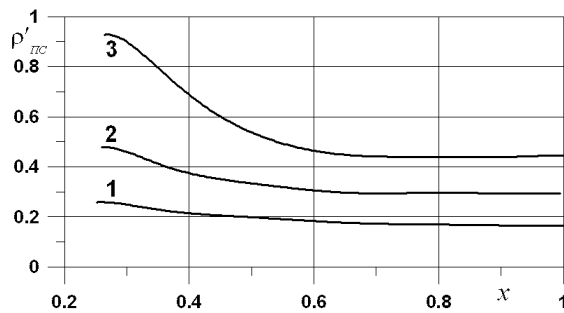


Рис. 10. Амплитуды пульсаций плотности на границе ПС при  $M_\infty = 21$ ,  $f = 38,4$  кГц,  $A = 1,6$ : 1 –  $x_1 \div x_2 = (65-80)\Delta x$ ; 2 –  $(65-95)\Delta x$ ; 3 –  $(65-125)\Delta x$

### Заключение

В работе выполнено прямое численное моделирование развития возмущений в гиперзвуковом ВУС на пластине под воздействием периодических возмущений типа вдув-отсос, генерируемых на поверхности модели. На основе решения уравнений Навье – Стокса проведены параметрические исследования при высоких числах Маха ( $M_\infty = 12-21$ ), включающие вариации интенсивности, частоты и местоположения источника возмущений.

Изучен механизм формирования поля пульсаций при взаимодействии ударного слоя с возмущениями типа вду-отсос. Показано, что локализованные возмущения массового расхода являются источником акустических волн, имеющих два разнесенных

в пространстве пика интенсивности, расстояние между которыми увеличивается с ростом  $u$ . Этим расстоянием определяется ширина области взаимодействия возмущений с УВ и генерирование одной или двух вихревых дорожек в ударном слое.

Показано, что с ростом числа Маха набегающего потока, частоты начальных возмущений вдува-отсоса и расстояния источника от передней кромки пластины амплитуды пульсаций плотности уменьшаются. А увеличение амплитуды начального возмущения и ширины участка вдува-отсоса приводит к возрастанию амплитуд пульсаций в ударном слое.

### Список литературы

1. *Tumin A.* Receptivity of Compressible Boundary Layers to Three-Dimensional Wall Perturbations // Paper AIAA. 2006. N 2006-1110.
2. *Fedorov A. V., Tumin A.* Evolution of Disturbances in Entropy Layer on Blunted Plate in Supersonic Flow // AIAA J. 2004. Vol. 42. No. 1. P. 89–94.
3. *Gmelin C., Rist U.* Active Control of Laminar-Turbulent Transition Using Instantaneous Vorticity Signals at the Wall // Phys. Fluids. 2000. Vol. 13. P. 513–519.
4. *Rist U., Gmelin C.* Active Control of Laminar-Turbulent Transition Using Instantaneous Wall Vorticity // Abstract of 5<sup>th</sup> ERCOFTAC SIG 33 «Laminar-Turbulent Transition Mechanisms, Prediction and Control». Nasslingen; Stockholm, 2006.
5. *Mironov S. G., Maslov A. A.* Experimental study of Secondary Instability in a Hypersonic Shock Layer on a Flat Plate // J. Fluid Mech. 2000. Vol. 412. P. 259–277.
6. *Mironov S. G., Aniskin V. M.* Experimental Study of Hypersonic Shock Layer Stability on a Circular Surface of Compression // Comptes Rendus – Mecanique. 2004. Vol. 332. No. 9. P. 701–708.
7. *Миронов С. Г.* Экспериментальное исследование вихревых возмущений в гиперзвуковом ударном слое на пластине // ПМТФ. 1999. Т. 40, № 6. С. 41–47.
8. *Анискин В. М., Миронов С. Г.* Развитие контролируемых возмущений в ударном слое на поверхности сжатия // ПМТФ. 2003. Т. 44, № 5. С. 30–38.
9. *Миронов С. Г., Цырюльников И. С.* Экспериментальное исследование развития



периодических возмущений в гиперзвуковом ударном слое на пластине // Теплофизика и аэромеханика. 2006. Т. 13, № 3. С. 353–360.

10. Маслов А. А., Миронов С. Г. Экспериментальное исследование обтекания полузамкнутой цилиндрической полости гиперзвуковым потоком низкой плотности // Изв. РАН. Серия МЖГ. 1996. № 6. С. 155–160.

11. Егоров И. В., Судаков В. Г., Федоров А. В. Численное моделирование распространения возмущений в сверхзвуковом пограничном слое // Изв. РАН. Серия МЖГ. 2004. № 6. С. 33–44.

12. Wang X., Zhong X. Receptivity of a Mach 8.0 Flow over a Sharp Wedge with Half-Angle  $5.3^\circ$  to Wall Blowing-Suction // AIAA Paper. 2005-5025.

13. Wang X., Zhong X. Numerical Simulation of Hypersonic Boundary-Layer Receptivity to Two and Three-Dimensional Wall Perturbations // AIAA Paper. 2007-946.

14. Поплавская Т. В., Кудрявцев А. Н., Миронов С. Г., Цырюльников И. С. Исследование распределенной и локализованной восприимчивости гиперзвукового ударного слоя на пластине // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2008. Т. 3, вып. 2, С. 21–27.

15. 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. Fluid Mech. 2010. (в печати)

16. Кудрявцев А. Н., Поплавская Т. В., Хотяновский Д. В. Применение схем высокого порядка точности при моделировании нестационарных сверхзвуковых течений // Математическое моделирование. 2007. Т. 19, № 7. С. 39–55.

17. 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.

18. Хейз У. Д., Пробстин Р. Ф. Теория гиперзвуковых течений. М.: Иностран. лит., 1962.

19. Rudman S., Rubin S. G. Hypersonic Viscous Flow over Slender Bodies with Sharp Leading Edges // AIAA J. 1968. Vol. 6. No. 10. P. 1883–1890.

20. McCroskey W. J., Bogdonoff S. M., McDougall J. G. An Experimental Model for the Sharp Flat Plate in Rarefied Hypersonic Flow // AIAA J. 1966.

21. Коган М. Н. Динамика разреженного газа. М.: Наука, 1967.

22. Кудрявцев А. Н., Маслов А. А., Миронов С. Г., Поплавская Т. В., Цырюльников И. С. Прямое численное моделирование восприимчивости гиперзвукового ударного слоя к естественным и искусственным возмущениям // Вычисл. технологии. 2006. Т. 11, ч. 1. С. 108–115.

23. Цырюльников И. С., Миронов С. Г. Исследование волнового поля контролируемых возмущений двух источников // Теплофизика и аэромеханика. 2005. Т. 12, № 3. С. 318–324.

24. Егоров И. В., Новиков А. В., Федоров А. В. Численное моделирование возмущений отрывного течения в закругленном угле сжатия // Изв. РАН. Серия МЖГ. 2006. № 4. С. 39–49.

25. Маслов А. А., Поплавская Т. В., Цырюльников И. С. Нелинейные волновые процессы в гиперзвуковом ударном слое // Изв. РАН. Серия МЖГ. 2010 (в печати).

Материал поступил в редколлегию 05.06.2010

S. V. Kirilovskij, T. V. Poplavskaya, I. S. Tsyryulnikov

#### STUDY OF DEVELOPMENT OF LOCALIZED DISTURBANCES IN A HYPERSONIC SHOCK LAYER

A study of receptivity and development of the disturbances, generated in the hypersonic shock layer on the plate under the action of the disturbances introduced into the shock layer locally from the surface of model is described in the work.

*Keywords:* hypersonic flow, receptivity of shock layer, direct numerical simulation