

УДК 532.526:533.6.011

Некоторые особенности развития возмущений на сверхзвуке при изменении средних параметров*

Н.М. Терехова

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

E-mail: terekh@itam.nsc.ru

Рассмотрено влияние на линейную устойчивость изменений динамических и тепловых пограничных слоев сжимаемого газа при осуществлении различных способов управления режимами течения (использование градиента внешнего потока, распределенного массообмена (вдува или отсоса) и теплообмена в виде нагрева или охлаждения обтекаемой поверхности) на сверхзвуковых скоростях.

При невысоких числах Маха ($M = 2$) в пограничных слоях развиваются вихревые возмущения, а при высоких ($M = 5,35$) к ним добавляются акустические. Факторы, способствующие демпфированию вихревых мод: отрицательный внешний градиент, отсос и охлаждение обтекаемой поверхности. Они сопровождаются формированием более тонких и более наполненных (с большими положительными градиентами средних скоростей в пристенной области) динамических пограничных слоев. Напротив, положительный внешний градиент, вдув и нагрев утолщают эти слои и дестабилизируют вихревые возмущения. Акустические волны реагируют на изменения средних параметров по-разному: при внешнем градиенте и массообмене — однонаправлено с вихревыми, а при теплообмене — разнонаправлено. Это связано с противоположным откликом на формирующиеся тепловые пограничные слои. В работе подробно разобраны случаи, когда реализуются аномальные зависимости, связанные с конкурентным влиянием динамических и тепловых средних параметров. Приведены кривые нейтральной устойчивости и частотные разрезы, дающие представление об инкрементах возмущений. Информационные картины позволяют понять возможные механизмы воздействия на режимы обтекания.

Ключевые слова: сверхзвуковой пограничный слой, гидродинамическая устойчивость, ламинарно-турбулентный переход.

Введение

Вопросы устойчивости пограничных слоев имеют непосредственное отношение к управлению ламинарно-турбулентным переходом. С практической точки зрения важно как предотвращение турбулизации течения, так и инициирование более раннего перехода его из ламинарного состояния в турбулентное [1, 2].

Первый класс задач связан с возможностью снижения сопротивления трения и тепловых потоков за счет ламинаризации пограничного слоя. В настоящее время хорошо известны многочисленные методы повышения устойчивости дозвуковых и сверхзвуковых пограничных слоев. К ним относятся: отсос, охлаждение поверхности, ускорение внешнего потока.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (код проекта № 12-01-00158а) и Интеграционного проекта СО РАН (грант № 4-2012).

Второй класс задач следует из необходимости интенсификации процессов перемешивания и увеличения надежности управления полетом за счет обеспечения устойчивой работы отдельных элементов аппаратов и предотвращения нежелательного отрыва потока.

В последние годы проводится углубленное изучение ряда методов управления эволюцией возмущений в сверхзвуковых пограничных слоях сжимаемого газа. Работы по математическому моделированию проблемы делятся на две группы. В первой группе расчеты проводятся в рамках традиционного метода возмущений, сводящегося к решению систем обыкновенных дифференциальных уравнений для осредненных характеристик потока и малых возмущений [2–13]. Во второй группе развиваются и применяются методы прямого численного интегрирования систем уравнений в частных производных [14–19]. Несмотря на современный тренд и определенную модность этого подхода, сохраняется актуальность использования метода возмущений, в рамках которого можно относительно быстро охватить широкое поле параметров течения и сформировать информационное поле, которое можно анализировать.

Проводится моделирование как активных, так и пассивных способов воздействия на волны неустойчивости. С инженерной точки зрения в первых из них требуется подвод энергии для требуемого изменения характеристик возмущений, во вторых — управление осуществляется без внешнего вмешательства либо через реализацию средних параметров потока, которые отвечают поставленным целям, либо через воздействие на процесс формирования и динамику самих возмущений через их граничные, краевые или начальные условия.

При экспериментальных исследованиях на сверхзвуковых скоростях основной измеряемой потоковой характеристикой является средняя массовая скорость ρU , где ρ и U — средние плотность и продольная скорость потока. Это затрудняет анализ ситуаций, когда изменяется одна из составляющих или они обе, особенно в случаях конкурентного их воздействия на динамику возмущений. Математическое моделирование при изучении методов управления позволяет выявить раздельное влияние этих средних характеристик.

В настоящей работе проведен анализ некоторых особенностей, возникающих при использовании методов управления, связанных со средними во времени деформациями пограничных слоев. Основное внимание уделяется анализу параметров динамических и тепловых слоев, с которыми связаны некоторые аномальные зависимости, условно названные здесь реверсами. Из всего многообразия способов управления выделено три. Это, во-первых, использование внешнего градиента давления [11, 12]. Известно, что положительный или отрицательный внешний градиент являются неблагоприятными или благоприятными факторами при эволюции возмущений. Во-вторых, это использование теплообмена обтекаемой поверхности с внешней средой [6, 7, 12]. Течение с охлажденной поверхностью имеет место при кратковременном полете на большой скорости. При этом обшивка летательного аппарата не успевает сильно нагреться и ее температура существенно ниже температуры теплоизолированной поверхности. И, наконец, использование распределенного массообмена с обтекаемой поверхности в виде ддува или отсоса массы газа для создания или поддержания определенного режима [8, 9, 12].

Во всех способах общим является сильная деформация средних характеристик как динамического, так и теплового слоев. Рассмотрим физические аспекты методов управления. В целом они сводятся к обоснованию поведения возмущений при разных направлениях деформаций этих осредненных величин.

Известно, что процессы, приводящие к увеличению наполненности динамических пограничных слоев, приводят к стабилизации неустойчивых волн. Как правило, увеличение наполненности средних продольных профилей скорости сопровождается уменьшением толщины пограничных слоев, а более тонкие пограничные слои обладают более высоким пределом устойчивости и менее склонны к переходу. Проследить последствия стабилизации возмущений при уменьшении толщины пограничного слоя можно через

анализ членов в уравнении баланса энергии турбулентности [20]. В этом уравнении наряду с работой сил сжатия и потоком энергии через границу, присутствует главный член, ответственный за передачу энергии от среднего потока к возмущениям, а именно — $\rho \langle u'v' \rangle dU/dY$, где ρ и dU/dY — средние параметры, $\langle u'v' \rangle$ — момент второго порядка. Для более наполненных и более тонких пограничных слоев интегрально сокращается диапазон отрицательных значений этого члена, что указывает на уменьшение генерационных возможностей среднего потока.

Противоположный процесс уменьшения заполненности осредненного профиля продольной скорости, приводящий к утолщению пограничных слоев с тенденцией к появлению его локальных перегибов, уменьшает запас устойчивости, ускоряет линейные и нелинейные процессы развития возмущений и приводит к более раннему переходу.

В теории устойчивости сверхзвуковых течений важную роль играет обобщенная точка перегиба $d \left[\rho \frac{dU}{dY} \right] / dY = 0$, причем средняя температура $T = 1/\rho$. Как известно,

наличие обобщенной точки перегиба связывают с реализацией невязкой (рэлеевской) неустойчивости. При этом фазовая скорость волны равна скорости основного течения в точке перегиба. В пограничных слоях при высоком числе Маха есть две обобщенные точки перегиба: одна в пристенной части, вторая ближе к границе пограничного слоя. В пристенной части влияние вязкости велико, она купирует проявление невязких инерционных волн. При появлении добавочных локальных перегибов появляется тенденция к росту неустойчивых возмущений в этой области пограничного слоя. Но в первую очередь невязкая неустойчивость всегда будет проявляться через вторую точку перегиба при высоких числах Маха.

Влияние теплообмена на устойчивость пограничных слоев многообразно. Наряду с тем, что при охлаждении профили скорости становятся более наполненными и более тонкими, что работает на повышение их устойчивости, уменьшение температуры на стенке значительно деформирует средний профиль температур, изменяя знаки температурных градиентов поперек слоя. В противоположность сказанному, при нагреве, наряду с уменьшением заполненности динамических пограничных слоев, растут значения средних равновесных температур (температур стенки).

Известно, что вязкость ответственна как за генерацию вихревых возмущений, так и за диссипацию пульсационной энергии. Это ее противоречивое действие полностью проявляется при охлаждении обтекаемой поверхности. Вязкость пропорциональна температуре, и при понижении последней уменьшаются ее генерационные возможности, что приводит к понижению линейных инкрементов порождаемых вихревых волн. В то же время уменьшение вязкости активизирует акустические возмущения, приводя к их дестабилизации.

Итак, можно констатировать, что существуют общие универсальные закономерности влияния искажения динамических и тепловых параметров пограничных слоев при сверхзвуковых скоростях потока, а именно:

- увеличение наполненности профиля средней продольной скорости способствует стабилизации и вихревых и акустических возмущений, равно как уменьшение наполненности дестабилизирует названные возмущения;

- понижение средних температур пограничного слоя (в частности, температуры стенки) приводит к уменьшению коэффициентов продольного усиления вихревых и к росту инкрементов акустических возмущений, и наоборот.

В рассматриваемых в настоящей работе методах управления реализуются различные комбинации этих факторов, которые в некоторых случаях действуют однонаправлено, а в других — вступают друг с другом в конкуренцию. Информации о деформациях средних характеристик при реализации разных способов управления поведением возмущений вполне достаточно. Остается связать их с характеристиками устойчивости,

которые реализуются в сверхзвуковом пограничном слое сжимаемого газа. Ниже обсуждаемые методы управления будут рассмотрены более подробно.

Основные уравнения и методы решения

В основе метода нахождения характеристик возмущений в сверхзвуковых пограничных слоях сжимаемого газа лежат идеи классического метода возмущений. Поле течения представляется в виде суммы осредненных и пульсационных величин [2–13]:

$$\bar{u} = |U(Y) + \varepsilon u', \varepsilon v', \varepsilon w'|, \quad \rho(Y) + \varepsilon \zeta', \quad P(Y) + \varepsilon p', \quad T(Y) + \varepsilon \Theta, \quad p'/P = \zeta'/\rho + \Theta/T,$$

где ε — масштаб пульсационного поля ($\varepsilon \ll 1$). Рассматривается возмущенное поле скоростей, плотности, давления и температуры сжимаемого газа в безразмерной декартовой системе координат $X, Y, Z = (x, y, z)/\delta$, где $\delta = \left(v_e \frac{x}{U_e} \right)^{1/2}$ — характерный масштаб, e —

индекс параметров на внешней границе пограничного слоя. Величины со штрихами и без штрихов — пульсационные и средние компоненты соответствующих величин соответственно.

Волновые решения ищутся в виде $u' = u(Y)\exp(i\theta)$, $\theta = \alpha X + \beta Z - \omega t$, $\alpha = \alpha^r + i\alpha^i$, α^i — коэффициент продольного усиления (при $\alpha^i < 0$ — инкремент); волновые числа α, β и вещественная частота $\omega = 2\pi f$ связаны дисперсионным соотношением $\alpha = \alpha(\omega, \beta)$ по линейной теории, также вводятся безразмерный частотный параметр F , связанный с частотой зависимостью $\omega = \text{Re}F$, и приведенное безразмерное волновое число $b = \beta \cdot 10^3 / \text{Re}$. Фазовая скорость волны $c = \omega/\alpha^r$. Спектральные и структурные параметры возмущений находятся из системы Лиза–Линя, приведенной во всех цитированных выше работах.

В случае течения сжимаемого газа при сверхзвуковых скоростях необходимо рассматривать возмущения разной природы. При высоких числах Маха ($M > 4$) помимо вихревых возмущений, которые доминируют в дозвуковых и в умеренно сверхзвуковых потоках, нужно рассматривать инерционные возмущения, связанные с возбуждением акустических волн. Последние начинают преобладать с ростом числа Маха.

Приведем методику [2], которая поможет понять возникающую иерархию возмущений при высоких числах Маха. Из уравнения для возмущений давления в асимптотическом виде (при больших α и αRe)

$$p'' = \alpha^2(1 - K)p, \quad K = M^2(U - c)^2/T$$

видно, что при $K > 1$ решение p колеблется. Это и есть показатель появления акустических колебаний. Средняя температура T находится в знаменателе и ее уменьшение на стенке эквивалентно увеличению числа Маха. Дестабилизация акустических возмущений при охлаждении связана с тем, что увеличивается пристенный участок, в пределах которого комплекс $K > 1$.

Акустические возмущения локализуются на более высоких частотах по сравнению с вихревыми. Волны разной природы отличаются значениями фазовых скоростей (у вихревых они ниже), скоростями затухания во внешнем поле (у вихревых они выше), а также местоположением максимальных пульсации массовой скорости $\varepsilon(\rho u) = \rho(Y)u' + \zeta'U(Y)$, которое отслеживают при экспериментальных измерениях. У вихревых волн этот максимум расположен ближе к стенке.

Осредненные характеристики находятся при совместном решении системы для динамического (U, V) и теплового (T) пограничных слоев в криволинейной системе координат (s, y) [21]

$$\rho(U \frac{\partial U}{\partial s} + V \frac{\partial U}{\partial y}) = -\frac{\partial P}{\partial s} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial U}{\partial y} \right),$$

$$\rho \left(U \frac{\partial T}{\partial s} + V \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{U}{c_p} \frac{\partial P}{\partial s} + \frac{\mu}{c_p} \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)^2 + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial T}{\partial y} \right)$$

и уравнения состояния идеального газа

$$\rho_e c_p \frac{\partial T_e}{\partial s} = \frac{\partial P}{\partial s}.$$

На плоской пластине координата s переходит в x , а член $\partial P / \partial s \equiv 0$.

При градиентном обтекании он выступает как параметр градиентности $dav \equiv \frac{dP}{ds} = \frac{\bar{s}}{U_e} \frac{dU_e}{d\bar{s}}$. Краевые условия для каждого рассмотренного случая запишутся в одном из двух видов.

1. На поверхности тела ($Y=0$) всегда $U=0$.

При обтекании с теплообменом задается температура стенки T_w , а на теплоизолированной стенке ее градиент $(dT/dY)_w=0$. При массообмене на обтекаемой поверхности задается параметр интенсивности вдува или отсоса с поверхности $C_q = -V_w T_w \text{Re}$, где V_w — скорость отсасывания. Чтобы оставаться в классе подобных (автомодельных) решений, могут быть рассмотрены два варианта. Первый — V_w вдоль пластины меняется обратно пропорционально \sqrt{x} , при этом $C_q = \text{const}$, второй — $V_w = \text{const}$, а C_q меняется вниз по течению. В настоящей работе рассмотрен первый вариант. В отсутствии массообмена $V_w=0$.

2. На внешней границе $U=1$, $T=1$ ($Y=\infty$).

Граничные условия для возмущений стандартные — требуется затухание амплитуд на стенке и во внешнем поле.

После этих необходимых разъяснений проанализируем результаты.

Результаты и обсуждения

Влияние внешнего градиента. Аналитические исследования устойчивости течений с градиентом давления выполняются так же, как для безградиентного обтекания пластины. Для среднего течения используется класс подобных решений для случаев, когда скорость потенциального течения пропорциональна степени расстояния, измеряемого от передней кромки пластины. Влияние градиента давления проявляется в распределении динамических пограничных слоев (средних продольных скоростей), при этом могут значительно меняться и тепловые пограничные слои, в частности, температуры торможения на стенке.

В работе [11] показано, что при умеренных числах Маха ($M=2$) влияние внешнего градиента давления совпадает с его влиянием в несжимаемой жидкости при дозвуковых скоростях: отрицательный внешний градиент (ускорение внешнего потока) стабилизирует вихревые возмущения, а положительный градиент (замедление внешнего потока) — дестабилизирует их. Таким образом, отрицательный внешний градиент является благоприятным фактором, при котором происходит уменьшение инкрементов вихревых волн.

Такое же действие оказывает отрицательный внешний градиент на акустические возмущения при высоком сверхзвуковом числе Маха ($M=5,35$). В то же время вихревые возмущения обнаруживают аномальный характер реакции на деформацию средних полей, имеющий место при таком градиенте, что хорошо видно на рис. 1, где показаны кривые нейтральной устойчивости вихревых и акустических двумерных волн при разных знаках параметра градиентности.

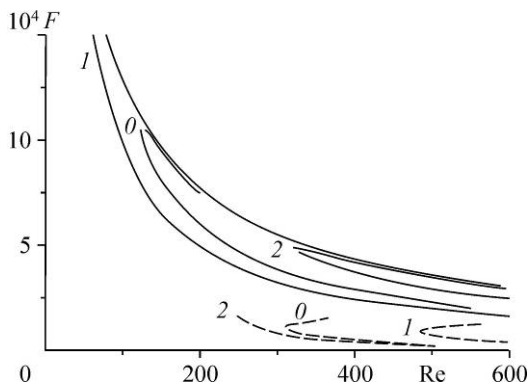


Рис. 1. Кривые нейтральной устойчивости акустических и вихревых двумерных возмущений (сплошные и штриховые линии) при $M = 5,35$, безградиентном обтекании, положительном и отрицательном внешнем градиентах $dav = 0$ (0), $-0,01$ (1), $0,01$ (2).

Это заставило более подробно проанализировать эпюры средних характеристик, приведенные на рис. 2. Из расчетов следует, что при высоких M происходит сильная деформация полей средних температур. Это может оказать решающее влияние на характеристики возмущений. При малых значениях параметра $dav > 0$ дестабилизирующее влияние повышения температуры стенки превосходит стабилизирующее влияние увеличения наполненности среднего динамического профиля U . Напротив, понижение среднего профиля T при малых $dav < 0$ подавляет дестабилизирующее влияние уменьшения наполненности U . Как происходит выравнивание воздействий с ростом dav , хорошо понятно из рис. 3, где приведена эволюция кривых нейтральной устойчивости трехмерных вихревых волн. Отчетливо видно, что для $dav > 0$ критическое число Рейнольдса Re_c совершает своеобразный реверс, лишь при $dav = 0,0125$ сравниваясь с Re_c безградиентного пограничного слоя и далее уже повышая предел устойчивости вихревых волн, что и свойственно потокам при невысоких M .

Этот же процесс обнаружен и при положительном внешнем градиенте $dav < 0$. Рассмотренные значения параметра dav приводят к значительному изменению устойчивости акустических волн, поэтому их можно рассматривать как большие. Этот вывод подтверждает рис. 4, где приведены инкременты возмущений при $M = 5,35$ и разных частотных параметрах. Видно, что отрицательный внешний градиент так сильно подавляет акустические моды, что инкременты вихревых волн на низких частотах могут стать выше акустических инкрементов на высоких, меняя тем самым картину доминирования возмущений. Отсюда следует вывод, что в высокоскоростных потоках при высоких M могут существовать области аномальных зависимостей устойчивости вихревых волн от знака внешнего градиента. Определяется это соотношением динамических и тепловых средних параметров пограничных слоев.

Влияние массообмена на обтекаемой поверхности. Рассмотрим процессы, сопутствующие распределенному массообмену в сжимаемой жидкости. При отсосе производится удаление из пристенных областей низкоскоростных объемов газа, в результате чего профили средних скоростей становятся более наполненными. В несжимаемой

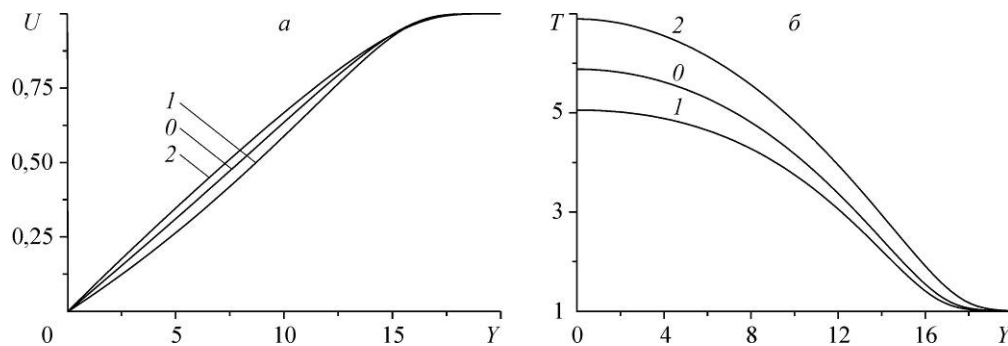
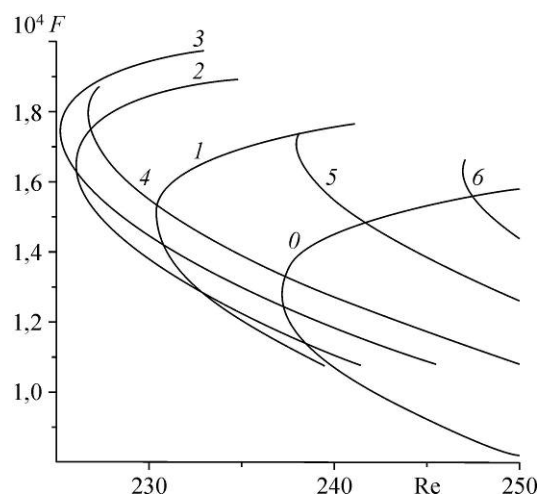


Рис. 2. Продольные средние скорости U (a) и температуры T (b) при значениях, рассматриваемых на рис. 1.

Рис. 3. Эволюция кривых нейтральной устойчивости вихревых трехмерных возмущений (азимутальное волновое число $2b = 0,13$) при $M = 5,35$ и возрастающем отрицательном внешнем градиенте $dav = 0$ (0), 0,0025 (1), 0,005 (2), 0,0075 (3), 0,01 (4), 0,0125 (5), 0,014 (6).



жидкости это приводит к увеличению их устойчивости, повышению критических чисел Рейнольдса и затягиванию перехода. Об этом убедительно свидетельствуют эксперименты и многочисленные результаты расчетов. Математическое моделирование сверхзвуковых режимов показало, что такой эффект можно получить и в сжимаемой жидкости при выполнении условия, что радиус пор поверхности, через которую производится отсос, много меньше толщины пограничного слоя ($r \ll \delta$) [8, 9]. Тогда можно пренебречь влиянием колебания давления в поре, которое вызывает отличную от нуля нормальную компоненту скорости возмущения. При формировании тепловых пограничных слоев при отсосе наблюдается незначительное повышение температуры стенки. Таким образом, при отсосе происходят конкурентные противоположные воздействия на вихревые возмущения со стороны динамического и теплового пограничных слоев. Для акустических возмущений такого противостояния нет, так как увеличение заполненности, уменьшение поперечной протяженности динамического слоя и повышение температуры стенки способствуют стабилизации таких волн.

При вдуве, напротив, пограничные слои становятся более толстыми, наполненность их уменьшается, что в несжимаемых течениях приводит к понижению предела устойчивости вихревых волн. Но на сверхзвуковых режимах вдув приводит к уменьшению температуры восстановления на стенке. При этом также может возникать конкуренция между воздействиями со стороны динамических и тепловых слоев.

В качестве примера приведем распределения средних параметров U и T при массовом обмене для $M = 2$ (рис. 5). Ясно видно сокращение поперечной протяженности пограничных слоев в режиме отсоса и ее увеличение при вдуве по сравнению с непроницаемой поверхностью (кривая 0). Также видно, что средняя температура в пограничном слое в основном следует закономерностям обтекания непроницаемой стенки, но температуры на стенке незначительно изменяются.

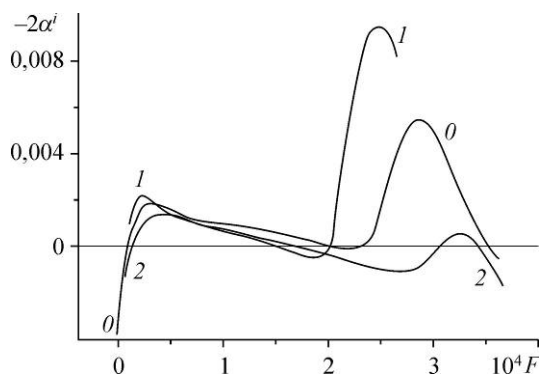


Рисунок 6 демонстрирует коэффициенты продольного усиления в режимах вдува или отсоса. В качестве тестируемых выбраны возмущения двух частот в разных положениях относительно нейтральной кривой для

Рис. 4. Инкременты трехмерных ($2b = 0,1$) возмущений на разных частотах ($10^4 \cdot F < 2$ — вихревые, $10^4 \cdot F > 2$ — акустические волны) при $M = 5,35$, $Re = 500$ и $dav = 0$ (0), $-0,01$ (1), $0,01$ (2).

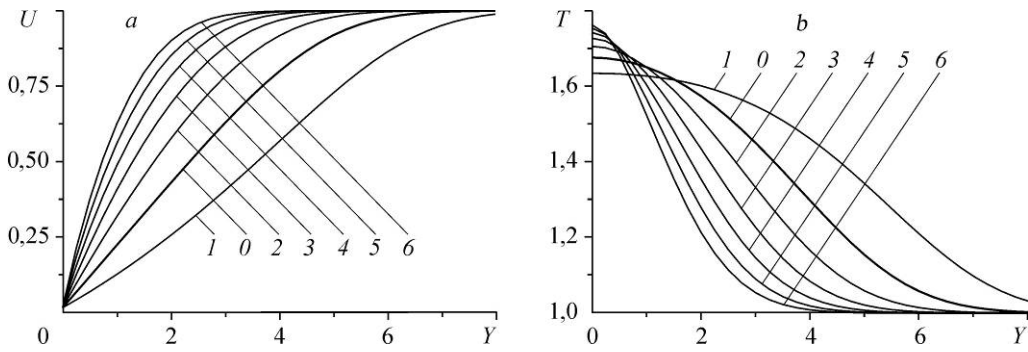


Рис. 5. Продольные средние скорости U (а) и температуры T (б) при $M = 2$ и параметрах вдува и отсоса $C_q = 0$ (0), $-0,25$ (1), $0,25$ (2), $0,5$ (3), $0,75$ (4), 1 (5), $1,25$ (6).

непроницаемой поверхности — на нижней ветви и в области растущих колебаний. Установлено, что возмущения одинаковым образом откликаются на воздействия. При вдуве они дестабилизируются, с ростом параметра $-C_q$ их инкременты увеличиваются, а при отсосе — стабилизируются, довольно быстро становясь затухающими.

В этой затухающей области и обнаружен реверс зависимостей, который является предметом обсуждения, а именно, при увеличении отсоса обнаружено понижение степеней продольного затухания, приводящего к уменьшению декрементов α^i . Установлено, что чем меньше частота, тем при меньшем отсосе происходит реверс. Можно высказать несколько гипотез, объясняющих явление. Во-первых, при больших C_q затухающие вихревые колебания ниже нижней ветви нейтральной кривой могут перейти в затухающие инерционные низкочастотные акустические волны. Это вполне возможно, но опровергается анализом значений фазовых скоростей возмущений во всей области C_q . Фазовые скорости устойчиво сохраняют привязку к диапазону вихревых волн (рис. 6б). Во-вторых, реверс также может быть связан с конкуренцией параметров динамических и тепловых слоев, хотя проявляется она не так явно, как в случае градиентного обтекания. Дело в том, что при большой наполненности динамические пограничные слои становятся достаточно тонкими, а как известно, тонкие пограничные слои очень чувствительны к разного рода воздействиям. Ими могут быть шероховатости на поверхности и прочие неоднородности в самом потоке. В нашем случае такого рода затравкой является дестабилизирующее повышение температуры стенки при отсосе. Существует диапазон C_q ,

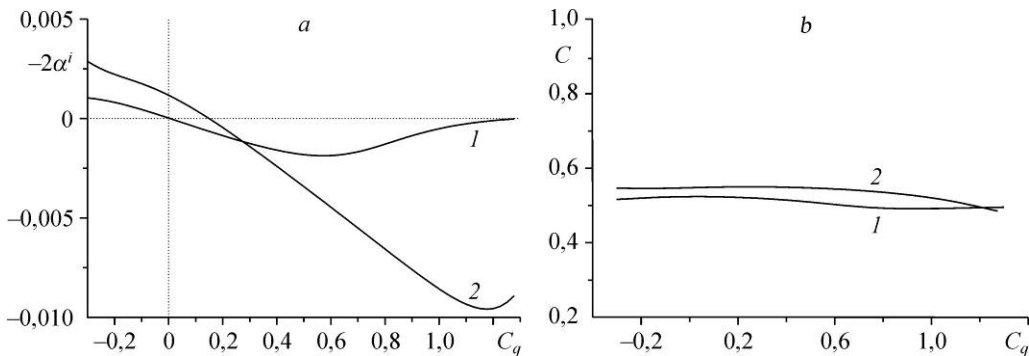


Рис. 6. Коэффициенты продольного усиления в режимах вдува или отсоса. а — зависимость коэффициентов продольного усиления двумерных вихревых возмущений от интенсивностей массообмена C_q при $M = 2$, $Re = 600$ на частотах $\omega = 0,19 \cdot 10^{-4}$ (1), $0,38 \cdot 10^{-4}$ (2); б — фазовые скорости вихревых волн при значениях F с рис. 6а.

Рис. 7. Кривые нейтральной устойчивости двумерных акустических ($b = 0$) и трехмерных вихревых ($2b = 0,13$) возмущений (сплошные и штриховые линии соответственно) на $M = 5,35$ для $C_q = 0$ (0), $-0,1$ (1), $0,1$ (2) и критические числа Рейнольдса акустических возмущений.

$Re_c = 125,7$ (0), 98 (1), 163 (2).

в пределах которого стабилизирующее воздействие большей заполненности динамического слоя является доминирующим. Выше этого диапазона на тонком профиле может проявиться дестабилизирующее влияние температурных характеристик, приводящее к описанному реверсу. Надо заметить, что это никогда не приводит к появлению новых нейтральных кривых и областей растущих колебаний.

Подобных реверсов не замечено на высоких числах Маха ($M = 5,35$). На рис. 7 приводятся несколько нейтральных кривых акустических и вихревых возмущений, показывающих изменение пределов устойчивости волн разной природы при вдуве и отсосе на высоких сверхзвуковых скоростях.

Влияние теплообмена на обтекаемой поверхности. Рассмотрим реакцию возмущений на целенаправленное воздействие пристенным теплообменом. Влияние этого фактора изучалось как экспериментальными методами, так и численным моделированием. В то же время явление столь многогранно, что регулярно обнаруживаются новые особенности, которым нужно давать трактовку. Рассмотрим один из вариантов такой аномалии, обнаруженной на умеренных сверхзвуковых режимах $M = 2$. На рис. 8 показаны области близ критических чисел Рейнольдса Re_c для наиболее нестабильных трехмерных возмущений при разных температурах стенки. Видно, что охлаждение поверхности как значительно понижает Re_c , так и сужает частотные области существования растущих возмущений. Температура теплоизолированной пластины $T_w = 1,687$. Близ последнего приведенного значения T_w наступает так называемая полная стабилизация, когда при численном моделировании не обнаруживаются области растущих малых колебаний.

Средние характеристики (рис. 9) показывают, что при охлаждении динамические профили наполняются и утончаются, а тепловые обнаруживают меньшие напряжения (уменьшаются поперечные градиенты dT/dY). То и другое должно работать на стабилизацию вихревых волн, что и происходит до некоторых значений T_w .

При численном расчете обнаружен реверс зависимостей $\alpha^i(T_w)$, когда более глубокое

охлаждение понижало степени продольного затухания и декременты устойчиво стремились к нулю. Это обстоятельство показалось столь интересным, что были проведены обширные расчеты для двумерных и трехмерных волн, отражающие изменение как чисел Рейнольдса, так и частот. На рис. 10 приведены некоторые результаты. Оказалось, что реверс

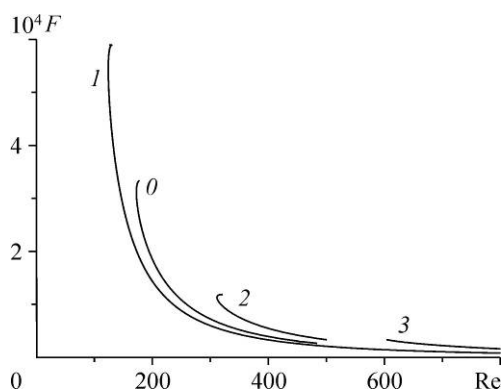


Рис. 8. Кривые нейтральной устойчивости трехмерных $2b = 0,13$ вихревых возмущений на $M = 2$ для разных температур стенки $T_w = 1,78$ (0), $2,06$ (1), $1,5$ (2), $1,355$ (3).

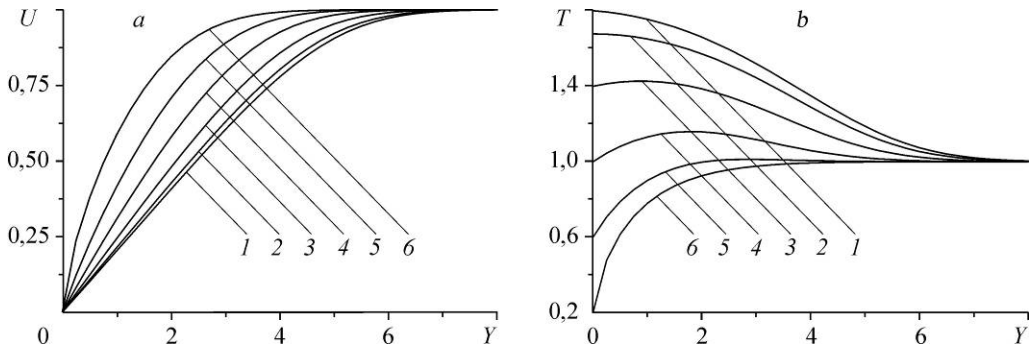


Рис. 9. Продольные средние скорости U (а) и температуры T (б) при $M = 2$ и $T_W = 1,8$ (1), 1,687 (2 — теплоизолированная стенка), 1,4 (3), 1 (4), 0,6 (5), 0,2 (6).

начинает проявляться при достаточно низких T_W , разных для двумерных и трехмерных волн. Для данного азимутального числа он не зависит ни от чисел Рейнольдса, ни от частотных параметров. Для двумерных волн реверс появляется при более низких T_W . Удалось выяснить, что реверс в этом случае связан с возбуждением низкочастотных инерционных волн акустической природы. На это указывают значения фазовых скоростей (рис. 10с). Отчетливо видно, что при уменьшении T_W фазовые скорости вихревых возмущений $C_1 \sim 0,5 - 0,6$, пройдя промежуточную область, возрастают до $C_2 \sim 0,9$, что характерно для акустических волн. Отметим, что на твердой поверхности эти низкочастотные инерционные волны остаются затухающими для всех частот. Однако на пористой стенке они могут образовывать

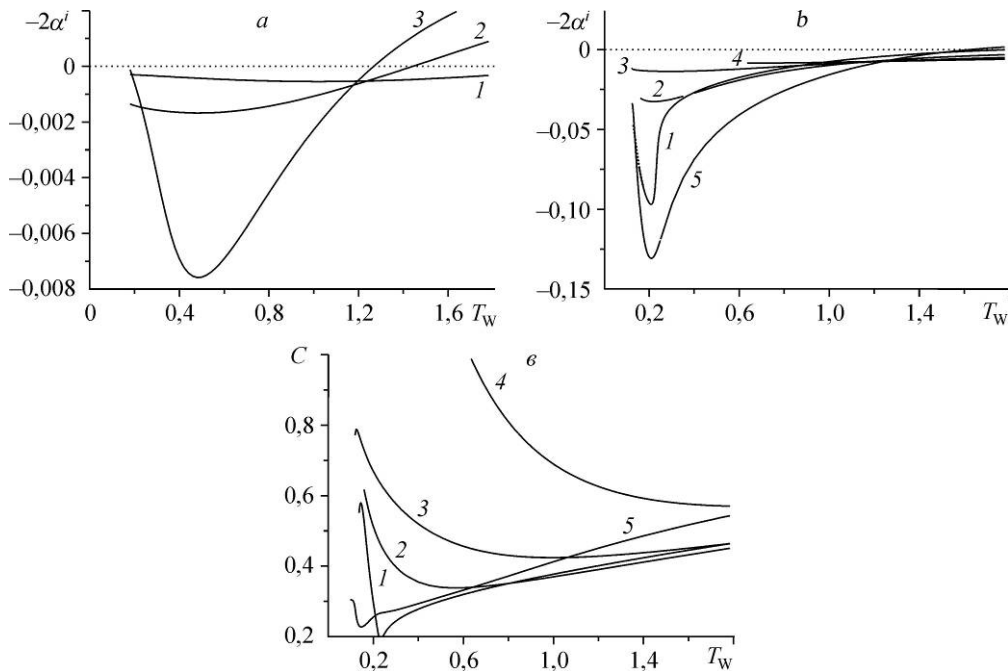
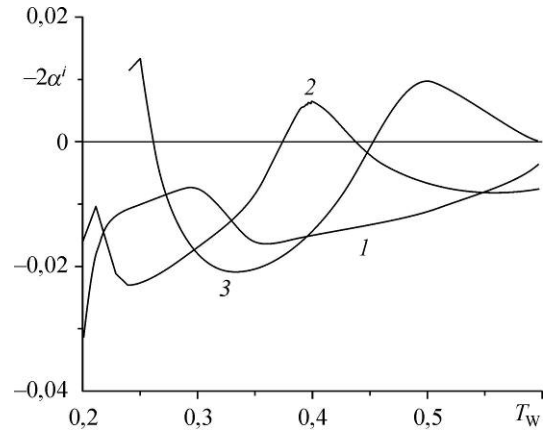


Рис. 10. Реверс возмущений при охлаждении поверхности. Коэффициенты продольного усиления вихревых возмущений при $M = 2$.

а — двумерные волны $b = 0$ на $Re = 498$ при частотных параметрах $F = 0,19 \cdot 10^{-4}$ (1), $0,38 \cdot 10^{-4}$ (2) и $Re = 3348$ при $F = 0,19 \cdot 10^{-4}$ (3); б — трехмерные волны $2b = 0,18$ на $Re = 617,7$ при $F = 0,1755 \cdot 10^{-4}$ (1), $0,0955 \cdot 10^{-4}$ (2), $0,0495 \cdot 10^{-4}$ (3), $0,0245 \cdot 10^{-4}$ (4) и $Re = 1508$ при $F = 0,1755 \cdot 10^{-4}$ (5).

Рис. 11. Реверс возмущений на пористой стенке при глубоком охлаждении. Инкременты двумерных волн при $M = 2$, $Re = 750$, степени пористости $N_{pora} = 0,7$ и частотных параметрах $F = 0,7 \cdot 10^{-4}$ (1), $0,8 \cdot 10^{-4}$ (2), $0,9 \cdot 10^{-4}$ (3).



целые семейства нарастающих неустойчивых акустических колебаний, что хорошо видно на рис. 11. Таким образом, можно считать доказанным, что в этом случае конкуренции динамических и тепловых пограничных слоев нет, и аномалии в поведении коэффициентов α^i связаны с переходом на другое семейство решений, что нередко случается при численном анализе спектра возмущений на сверхзвуке.

При высоком значении числа Маха подобных реверсов не обнаружено.

Сравнительное влияние массо- и теплообмена на характеристики вихревых возмущений. В заключении уместно привести прямое сравнение влияния теплового пограничного слоя на значения инкрементов вихревых волн. Сравнивались воздействия при отсосе и охлаждении. Для этого были найдены такие значения параметров массообмена ($C_q = 0,25$) и температуры стенки ($T_W = 1,035$), при которых существовало полное совпадение продольных скоростей U и их производных dU/dY . Эпюры средних температур при этом отличались значительно (рис. 12).

На рис. 13 показаны инкременты вихревых возмущений в обоих случаях в сравнении с характеристиками на непроницаемой теплоизолированной пластине. Действительно, растущие волны становились затухающими, причем стабилизация на охлаждаемой поверхности более сильная. Это подтверждается и кривыми нейтральной устойчивости и сравнением критических чисел Рейнольдса Re_c . Установлено, что, хотя при данном отсосе Re_c увеличивалось в несколько раз, смещаясь в область высоких Re ($Re_c \sim 1200$), при охлаждении все возмущения значительно раньше оказались лежащими в области полной

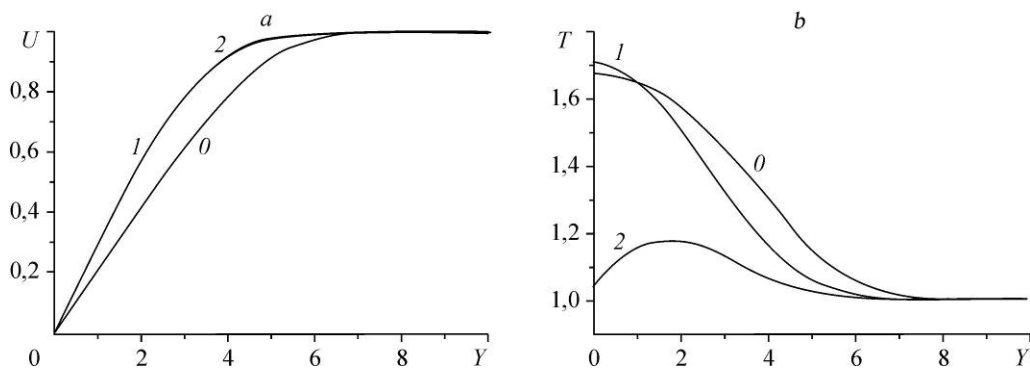


Рис. 12. Продольные средние скорости U (a) и температуры T (b) при $M = 2$. $C_q = 0,25$, $T_W = 1,687$ (1) и $C_q = 0$, $T_W = 1,035$ (2) в сравнении с эпюрами на непроницаемой теплоизолированной пластине $C_q = 0$, $T_W = 1,687$ (0).

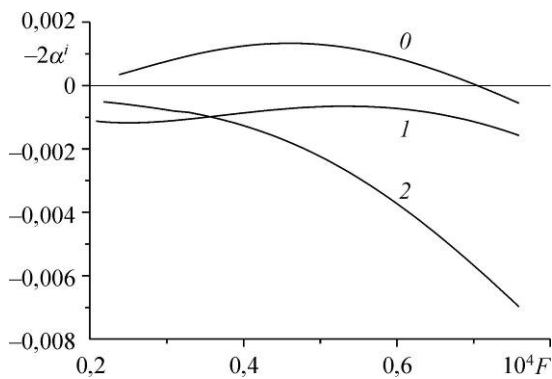


Рис. 13. Коэффициенты продольного усиления двумерных вихревых возмущений для параметров рис. 12.

стабилизации, которая наступила уже при $T_W \sim 1,3$ на $Re \sim 650$. Это демонстрирует важную роль температурного фактора в динамике вихревых волн.

Выводы

Проведенные исследования прояснили некоторые anomальные зависимости, обнаруженные при численном моделировании как на умеренных, так и на высоких числах Маха. Они показали, что независимо от того, какой фактор воздействия (способ управления) применяется, соотношение средних параметров динамического и теплового пограничных слоев оказывает непосредственное влияние на параметры неустойчивых колебаний.

1. При воздействии на пограничный слой внешним градиентом давления установлено, что при умеренных числах Маха ($M = 2$) оно оказывает такое же влияние, как в несжимаемой жидкости на дозвуке: отрицательный внешний градиент (ускорение внешнего потока) стабилизирует вихревые возмущения, а положительный градиент (замедление внешнего потока) — дестабилизирует их. Такое же действие оказывает отрицательный внешний градиент на акустические возмущения при высоком сверхзвуковом числе Маха $M = 5,35$. В то же время при этом M вихревые возмущения обнаруживают anomальный характер реакции на деформацию средних полей, производимую внешним градиентом. Эта anomalia объясняется соотношением между характеристиками динамических и тепловых пограничных слоев сжимаемого газа при высоких числах Маха, когда дестабилизирующее влияние роста температуры стенки доминирует над стабилизирующим влиянием повышения наполненности профиля средней скорости.

2. Моделирование воздействия распределенного отсоса на устойчивость вихревых возмущений при $M = 2$ показало, что при отсосе неустойчивые волны стабилизируются, довольно быстро становясь затухающими. Но в затухающей области при интенсивном отсосе обнаружен реверс зависимостей, приводящий к уменьшению декрементов таких волн. Он также связан с конкуренцией параметров динамических и тепловых слоев. При большой наполненности динамические пограничные слои становятся достаточно тонкими и чувствительными к разного рода неоднородностям. Такой дестабилизирующей затравкой является повышение температуры стенки при отсосе. Существует диапазон интенсивностей отсоса C_q , в пределах которого стабилизирующее воздействие большей наполненности динамического слоя является доминирующим. Выше этого диапазона на тонком профиле может проявиться дестабилизирующее влияние температурных характеристик, приводя к описанному реверсу.

3. При охлаждении обтекаемой поверхности происходит стабилизация вихревых возмущений на всех числах Маха, значительное повышение критического числа Рейнольдса и сужение частотных областей растущих колебаний. При численном расчете для $M = 2$ также обнаружен реверс зависимостей $\alpha^i(T_W)$, когда более глубокое охлаждение понижает степени продольного затухания. Установлено, что реверс в этом случае связан с возбуждением низкочастотных инерционных волн акустической природы.

Список литературы

1. Бойко А.В., Грек Г.Р., Довгаль А.В., Козлов В.В. Возникновение турбулентности в пристенных течениях. Новосибирск: Наука, 1999. 1000 с.
2. Гапонов С.А., Маслов А.А. Развитие возмущений в сжимаемых потоках. Новосибирск: Наука, 1980. 144с.
3. Гапонов С.А., Терехова Н.М. Трехволновые взаимодействия возмущений в гиперзвуковом пограничном слое на непроницаемой и пористой поверхностях // Известия РАН. МЖГ. 2009. № 3. С. 39–45.
4. Гапонов С.А., Терехова Н.М. Трехволновые взаимодействия возмущений в гиперзвуковом пограничном слое на пористой поверхности // ПМТФ. 2009. Т. 50, № 5. С. 3–13.
5. Гапонов С.А., Терехова Н.М. Трехволновые нелинейные взаимодействия возмущений в сверхзвуковом пограничном слое на непроницаемой и пористой поверхностях // Теплофизика и аэромеханика. 2009. Т. 16, № 3, С. 353–363.
6. Гапонов С.А., Терехова Н.М. Устойчивость и трехволновое взаимодействие возмущений в сверхзвуковом пограничном слое с охлаждением // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2010. Т. 5, вып. 3. С. 52–62.
7. Гапонов С.А., Терехова Н.М. Линейная эволюция и взаимодействие возмущений в пограничных слоях сжимаемого газа на непроницаемых и пористых поверхностях с теплообменом // Известия РАН. МЖГ. 2011. № 3. С. 69–83.
8. Гапонов С.А., Терехова Н.М. Устойчивость и трехволновое взаимодействие возмущений в сверхзвуковом пограничном слое с массообменом на стенке // Теплофизика и аэромеханика. 2012. Т. 19, № 3. С. 301–316.
9. Гапонов С.А., Терехова Н.М. Линейная эволюция и взаимодействие возмущений в пограничных слоях сжимаемого газа с массообменом // Известия РАН. МЖГ. 2011. № 3. С. 69–83.
10. Гапонов С.А., Терехова Н.М. Устойчивость сверхзвукового пограничного слоя на пористой пластине с гибким покрытием // Теплофизика и аэромеханика. 2014. Т. 21, № 1. С. 1–15.
11. Гапонов С.А., Терехова Н.М. Моделирование влияния внешнего градиента давления на устойчивость возмущений в пограничных слоях сжимаемого газа // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2013. Т. 8, вып. 4. С. 52–62.
12. Гапонов С.А., Терехова Н.М. Управление режимами течения при сверхзвуковом обтекании // Современная наука. 2013. № 1(12). С. 117–122.
13. Гапонов С.А., Масленникова И.И. Субгармоническая неустойчивость сверхзвукового пограничного слоя // Теплофизика и аэромеханика. 1997. Т. 4, № 1, С. 3–12.
14. Fedorov A., Kozlov V., Shiblyuk A., Maslov A., Malmuth N. Stability of hypersonic boundary layer on porous wall with regular microstructure // AIAA J. 2006. Vol. 44, No. 8. P. 1866–1872.
15. Tumin A., Wang X., Zhong X. Numerical simulation and theoretical analysis of perturbations in hypersonic boundary layers // AIAA J. 2011. Vol. 49, No. 3. P. 463–471.
16. Wang X., Zhong X., Ma J. Respose of a hypersonic boundary layer to wall blowing-suction // AIAA J. 2011. Vol. 49, No. 7. P. 1336–1353.
17. Lei J., Zhong X. Linear stability analysis of nose bluntness effects on hypersonic boundary layer transition // J. Spacecraft and rockets. 2012. Vol. 49. P. 24–37.
18. Duan L, Wang X., Zhong X. Stabilization of a Mach 5.92 boundary layer by two-dimensional finite-height roughness (TN) // AIAA J. 2013. Vol. 51, No. 1. P. 266–270.
19. Bountin D., Chimitov T., Maslov A., Novikov A., Egorov I., Fedorov A., Utyuzhnikov S. Stabilization of a hypersonic boundary layer using a wavy surface // AIAA J. 2013. Vol. 51, No. 5. P. 1203–1211.
20. Григорьев Ю.Н., Ершов И.В. Устойчивость течений релаксирующих молекулярных газов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. 230 с.
21. Дорренс У.Х. Гиперзвуковые течения вязкого газа. М.: Мир, 1966. 440 с.

Статья поступила в редакцию 13 января 2014 г.