УДК 532.526

УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМАМИ ТЕЧЕНИЯ ПРИ СВЕРХЗВУКОВОМ ОБТЕКАНИИ

Гапонов С.А., Терехова Н.М.

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

Грант РФФИ № 12-01-00158а и грант Интеграционного проекта СО РАН №4-2012

АННОТАЦИЯ

В линейном приближении рассмотрено влияние на линейную устойчивость изменений динамических и тепловых пограничных слоев сжимаемого газа при осуществлении различных способов управления режимами течения.

Анализу подверглись пограничные слои при высоких сверхзвуковых скоростях. Рассмотрены следующие способы управления – градиентность внешнего потока, распределенный массообмен через пористую поверхность и теплообмен в виде нагрева или охлаждения обтекаемой поверхности.

При M=5.35 в пограничных слоях могут сосуществовать возмущения разной природы – вихревые и акустические. Факторы, способствующие демпфированию вихревых мод – отрицательный внешний градиент, отсос и охлаждение, сопровождаются формированием более заполненных динамических пограничных слоев. Напротив, положительный 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 формированием тепловых пограничных слоев. В работе подробно разобраны характеристики параметров пограничных слоев и возмущений. Приведены кривые нейтральной устойчивости и частотные разрезы, дающие представление об инкрементах возмущений. Информационные картины позволяют доказательно установить какие факторы приведут к затягиванию ламинарных режимов, а какие – к ускорению турбулизации.

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.

Первый класс задач связан с возможностью снижения сопротивления трения за счет ламинаризации пограничного слоя [1,2]. В настоящее время хорошо известны многочисленные методы повышения устойчивости дозвуковых и сверхзвуковых пограничных слоев. К ним относятся: отсос, охлаждение поверхности, ускорение потока.

Второй класс задач следует из необходимости интенсификации процессов перемешивания, или увеличения надежности управления полетом летательного аппарата и обеспечения устойчивой работы отдельных его элементов. Ввиду того, что средняя скорость в турбулентном пограничном слое выше, чем в ламинарном, он обладает большей кинетической энергией и менее склонен к отрыву.

Основные методы управления эволюцией возмущений с пограничных слоях можно разделить на две группы – активные и пассивные. В первой требуется подвод энергии на осуществление методов управления, во второй управление осуществляется либо через создание определенных характеристик средних пограничных слоев, либо через воздействие на процесс формирования и динамику самих возмущений через граничные, краевые или начальные условия.

© Гапонов С.А., Терехова Н.М.

Из всего многообразия способов управления выделим три, в которых воздействие осуществляется через деформацию средних характеристик потока, это:

1. использование внешнего градиента давления, когда осуществляется выбор контура обтекаемого тела. При этом положительный или отрицательный внешний градиент создают благоприятный или неблагоприятный факторы для развития возмущений.

2. использование охлаждения или нагрева обтекаемых поверхностей [4.5]. Течение с охлажденной поверхностью имеет место при кратковременном полете на большой скорости самолета или ракеты. В этом случае обшивка летательного аппарата не успевает сильно нагреться и ее температура существенно ниже температуры теплоизолированной поверхности.

3. использование распределенного массообмена с обтекаемой поверхности в виде вдува или отсоса массы газа для создания или поддержания определенного режима [1,6].

Во всех способах общим является сильная деформация средних характеристик как динамического, так и теплового слоев. Рассмотрим физические аспекты методов управления подробно.

Ламинарный пограничный слой в состоянии преодолеть без отрыва только очень небольшое возрастание давления вдоль контура тела. При понижении внешнего давления переход происходит при более высоких числах Рейнольдса, чем при возрастании давления в направлении течения. Это используется для уменьшения сопротивления трения на крыле.

В теории исследования устойчивости течений с градиентом давления выполняются так же, как для безградиентного обтекания пластины. Для среднего течения используется класс подобных решений, который существует, когда скорость потенциального течения пропорциональна степени текущего 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.

Влияние теплообмена на устойчивость пограничных слоев многообразно. При охлаждении профили скорости становятся более наполненными и более тонкими, менее склонными к переходу, что работает на повышение их устойчивости, в тоже время уменьшение температуры на стенке значительно деформирует средний профиль температур, так что на нем могут изменяться знаки температурных градиентов.

В противоположность сказанному, при нагреве заполненность динамических пограничных слоев понижается, профили утолщаются, на них появляются возможности дополнительных перегибов, в тоже время растут значения средних температур поперек слоя.

При отсосе производится удаление из пристенных областей низкоскоростных объемов газа, в результате чего профили средних скоростей опять же становятся более наполненными, это приводит к увеличению их устойчивости, повышению критических чисел Рейнольдса и затягиванию перехода. Многочисленные результаты расчетов по влиянию отсасывания на устойчивость дозвукового пограничного слоя убедительно свидетельствуют о весьма эффективном стабилизирующем действии отсасывания. Таким образом, течение в пограничном слое при отсасывании сохраняется ламинарным не только благодаря уменьшению толщины слоя, но также, и притом в гораздо большей степени, благодаря повышению предела устойчивости для профилей скорости.

При вдуве, напротив, пограничные слои становятся более толстыми, наполненность их уменьшается с тенденцией к появлению на них локальных перегибов, что ускоряются линейные процессы развития возмущений, уменьшает запас устойчивости и ускоряет переход. Течение с кратковременным вдувом часто применяют для усиления обменных процессов в проблемных областях.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Итак, информации о деформациях средних характеристик при реализации разных способов управления поведением возмущений вполне достаточно. Остается связать их с направлением и характеристиками устойчивости, которая реализуются в сверхзвуковом пограничном слое сжимаемого газа.

Волновые решения ищутся в виде

$\overline{Z}' = \{u', v', w', p', \Theta'\}(Y)\exp(i\theta)$ – собственных амплитудных функций продольной, нор-

мальной и трансверсальной компонент волновых скоростей, возмущения давления и температуры; $\theta = \alpha X + \beta Z - \omega t$, $\alpha = \alpha^r + i\alpha^i$, α^i – коэффициент продольного усиления, при α^i <0 – инкремент; волновые числа α, β и вещественная частота $\omega = 2\pi f$ связаны дисперсионным соотношением $\alpha = \alpha(\omega, \beta)$ по линейной теории, фазовая скорость волны $c = \omega / \alpha^r$. Все вопросы, связанные с описанием методов решения, подробно изложены в [3-6] и здесь не приводятся.

В случае течения сжимаемого газа теоретические исследования осложняются необходимостью учета возмущений температуры и плотности. При высоких числах Маха помимо собственных колебаний – бегущих волн вихревой природы, которые доминирую в дозвуковых и в сверхзвуковых потоках при умеренных M, появляются возмущения, связанные с возбуждением акустических волн [1].

Известно, что вихревые возмущения возникают только при участии вязкости. Она порождает в пристенной области такие пульсации компонент скорости, что возникают напряжения Рейнольдса нужного знака, обеспечивающие положительную работу по генерации энергии от среднего потока к возмущениям. В тоже время вязкость ответственна и за диссипацию 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 волн. Можно также объяснить стабилизацию вихревых возмущений при уменьшении толщины пограничного слоя следующим образом: при формировании более наполненных и более тонких пограничных слоев возрастают градиенты средних скоростей у стенки, при этом напряжения Рейнольдса меняются значительно меньше, так что передача энергии от среднего потока уменьшается, а возмущения стабилизируются.

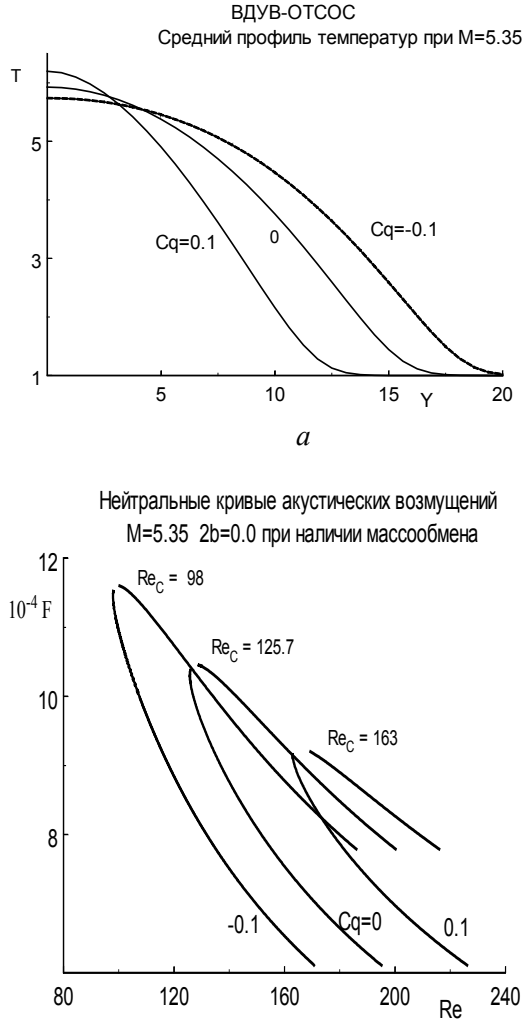
Приведем еще один важный аспект, который поможет понять возникающую иерархию возмущений при высоких числах Маха.

Записав уравнение для возмущений давления в асимптотическом виде (при больших α и α Re) как $p'' = \alpha^2(1\text{-}M^2(U\text{-}c)^2/T)p$ нетрудно убедится, что при

$K \equiv M^2(U\text{-}c)^2/T > 1$

решение p колеблется. Это интерпретируется как появление звуковых или акустических колебаний. Заметим также, что средняя температура T находится в знаменателе и ее уменьшение на стенке эквивалентно увеличению числа Маха.

Для волн разной природы отличаются значениями фазовых скоростей ($c_1 \approx 0.8$ у вихревых, $c_2 \approx 0.92$ у акустических,) и местоположением максимальных пульсации массовой скорости ($Y_1 \approx 12$ против $Y_2 \approx 16$). В теории устойчивости сверхзвуковых течений важную роль играет обобщенная точка перегиба Per ≡ *(U'/T)'*, в которой Per ≡ 0. Как известно, наличие обобщенной точки перегиба связывают с реализацией невязкой (релеевской) неустойчивости. При этом фазовая скорость волны равна скорости основного течения в точке перегиба.

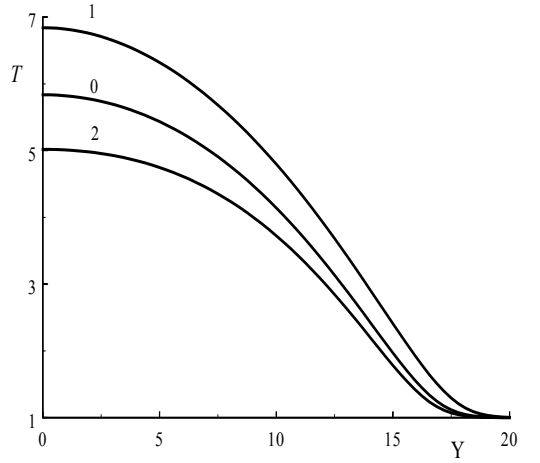


а

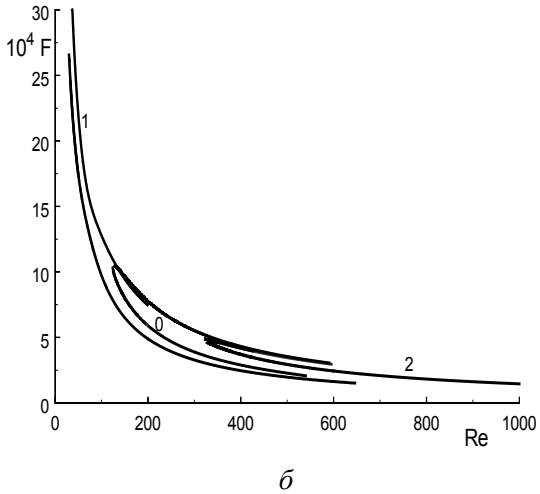
Рис.1 Продольные средние температуры *T (а)* и нейтральные кривые акустических возмущений *(б)* при M=5.35 и параметрах вдува и отсоса *Cq*=0, -0.1, 0.1. (*Cq*=-Re $V_W T_W$ – параметр массообмена, *Cq*<0 – вдув, *Cq*>0 отсос).

В пограничных слоях при высоком числе М есть две обобщенные точки перегиба, одна в пристенной части, вторая ближе к границе пограничного слоя. В пристенной части влияние вязкости велико, и теория невязкой неустойчивости неприменима. Поэтому невязкая неустойчивость в первую очередь будет проявляться через вторую точку перегиба.

В тоже время комплекс *K* позволяет понять почему при охлаждении акустические возмущения дестабилизируются. Дестабилизация акустической моды связана с тем, что увеличивается пристенный участок в пределах которого комплекс *K>1*.



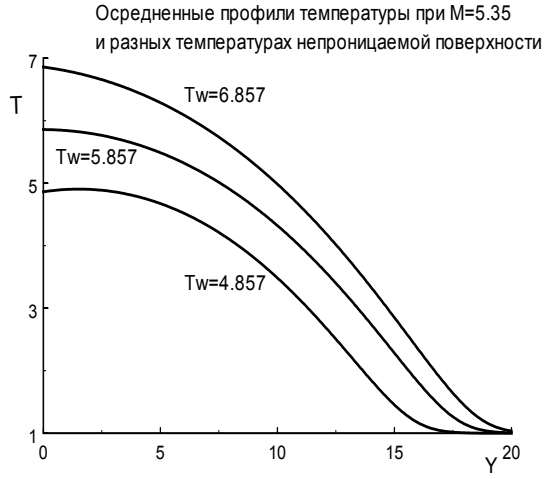
а



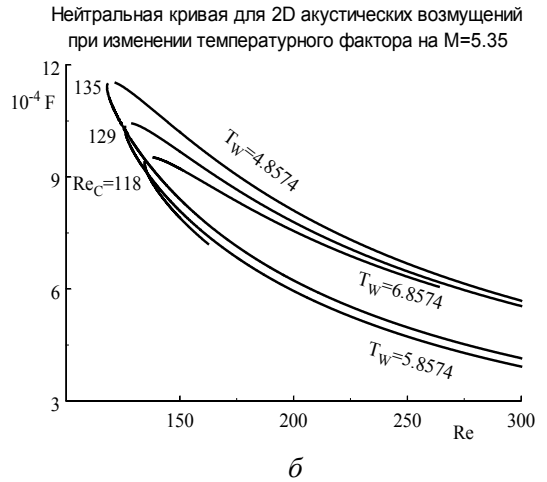
б

Рис.2 Продольные средние температуры *T* (*а*) и нейтральные кривые акустических возмущений *(б);* при безградиентном обтекании *(*кривая *0)* и положительным и отрицательном внешнем градиенте *dav*=-0.01, 0.01 *(1-2).* (*dav=s/U*$_e$ *dU*$_e$*/ds* – параметр градиентности внешнего потока).

На основании анализа можно доказательно утверждать, что при высоких числах Маха обтекания формирование более наполненных (по сравнению с эталонным профилем безградиентного обтекания непроницаемой теплоизолированной пластины) приводит к стабилизации вихревых возмущений. У них увеличивается критическое число Рейнольдса потери устойчивости и уменьшается область опасных частот. В тоже время значения инкрементов внутри этих нейтральных кривых зависят от степени превышения температур теплоизолированной стенки.



а



б

Рис.3 Продольные средние температуры *T* (*а*) и нейтральные кривые акустических возмущений *(б)* при разных температурных факторах: нагреве T_W=6.8574; теплоизолированной стенке T_W=5.8574; охлаждении T_W=4.8574.

К таким способам стабилизации вихревых возмущений, затягиванию линейных участков можно отнести использование распределенного вдува, благоприятного внешнего отрицательного градиента давления и охлаждения обтекаемой поверхности.

В противоположность, такие факторы как отсос, положительный внешний градиент и нагрев поверхности приводят к дестабилизации вихревых волн, что может приводить к более раннему переходу.

Более сложно реагируют на деформацию средних параметров пограничных слоем акустические волны.

При использовании массообмена и внешнего градиента их реакция однонаправлена с реакцией вихревых волн, т.е. отсос и отрицательный градиент стабилизируют эти инерционные волны, а вдув и положительный градиент - дестабилизируют их. Установлено, что акустические возмущения обнаруживают очень высокую зависимость от знака и величины внешнего градиента, причем при благоприятном градиенте их критическое число Рейнольдса становится меньше, чем для вихревых возмущений, а при неблагоприятном – пограничный слой дестабилизируется сразу на передней кромке.

Разнонаправленную реакцию с вихревыми обнаруживают акустические возмущения при использовании температурного фактора – нагрева или охлаждения обтекаемой поверхности. Здесь нагрев стабилизирует, а охлаждение – дестабилизирует инерционные волны. Объяснение возможной причины этого физического феномена дано выше.

В работе разъясняется, что такая характеристика как массовая скорость, которая надежно может быть измерена в эксперименте, к сожалению, не может служить ориентиром, по которому можно оценивать характер влияния внешних сил на параметры возмущений.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования показали, что независимо от того, какой фактор воздействия (способ управления) применяется, средние параметры и динамического и теплового пограничных слоев формируются совместно, оказывая непосредственное влияние на параметры неустойчивых колебаний и определяя их линейную эволюцию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гапонов С.А. Развитие возмущений в сжимаемых потоках / Гапонов С.А., Маслов А.А. - Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1980.- 144с. Gaponov S.A. and Maslov A.A. (1980). *Razvitie vozmushcheniy v szhimaemykh potorakh* [The development of disturbances in compressible flows], Science, Novosibirsk,USSR.
2. Бойко А.В. Возникновение турбулентности в пристенных течениях / Бойко А.В., Грек Г.Р., Довгаль А.В., Козлов В.В. - Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1999.- 1000 с. Boyko .A.V., Grek G.R., Dovgal' A.V. and Kozlov V.V. (1999). *Vozniknovenie yurbulentnosti v pristennykh techeniykh* [Turbulence in the near-wall flow], Science, Novosibirsk, Rossia.
3. Гапонов С.А. Субгармоническая неустойчивость сверхзвукового пограничного слоя / Гапонов С.А., Масленникова И.И.// Теплофизика и аэромеханика.- 1997.- Т. 4. -№ 1, С. 3–12. Gaponov, S.A. and Maslennikova, I.I. (1997), "Subharmonic instability of a supersonic boundary layer", *Teplofizika i aerodinamika*,. Vol. 4, no. 1, pp.3-12.
4. Гапонов С.А. Устойчивость и трехволновое взаимодействие возмущений в сверхзвуковом пограничном слое с охлаждением / Гапонов С.А., Терехова Н.М. // Вестник НГУ. Серия: Физика, 2010.Т.5,в.3.С.52-62. Gaponov, S.A. and Terekhova, N.M. (2010), "Stability and three-wave interaction of disturbances in supersonic boundary layer with cooling", *Vestnik NGU. Seria: Fizika,*. Vol. 5, no. 3. pp .52-62.
5. Гапонов С.А., Терехова Н.М. Линейная эволюция и взаимодействие возмущений в пограничных слоях сжимаемого газа на непроницаемых и пористых поверхностях с теплообменом/ Гапонов С.А., Терехова Н.М. // Известия РАН. МЖГ, 2011. №3.С.69-83. Gaponov, S.A. and Terekhova, N.M. (2011),

© Гапонов С.А., Терехова Н.М.

"The linear evolution and interaction of disturbances in the boundary layers of compressible gas-tight and porous surfaces with a heat transfer", *Izvestia RAN. MZhG*,. no. 3. pp. 69-83.

6. Гапонов С.А. Устойчивость и трехволновое взаимодействие возмущений в сверхзвуковом пограничном слое с теплообменом на стенке / Гапонов С.А., Терехова Н.М. // Теплофизика и аэромеханика**.** 2012, том 19, № 2, С. 1-16. Gaponov, S.A. and Terekhova, N.M. (2012), "Stability and three-wave interaction of disturbances in supersonic boundary layer with heat transfer at the wall ", *Teplofizika i aerodinamika*,. Vol. 19, no. 2, pp.1-16.