

А 84
А 9000

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР
МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

Галонов Сергей Александрович

УДК 532.526

РАЗВИТИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

01.02.05 - механика жидкостей, газа и плазмы

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва - 1984

Работа выполнена в Институте теоретической и прикладной механики Сибирского отделения АН СССР

Официальные оппоненты:

академик В.В.СТРУМИНСКИЙ

доктор технических наук, профессор В.Н.ЖИГУЛЕВ

доктор физико-математических наук, профессор В.Я.ШКАДОВ

Ведущая организация – Центральный Аэрогидродинамический
Институт им. проф. Н.Е.Жуковского

Защита состоится " " 1984 года в часов на
заседании специализированного совета Д. 063.91.01 при Московском
ордена Трудового Красного Знамени физико-техническом институте
(141700, г.Долгопрудный Московской области, Институтский пер.9)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МФТИ

Автореферат разослан " " 1984 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
доктор физико-математических наук

Щербина Ю.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

А к т у а л ь н о с т ь т е м ы. Проблема развития возмущений в сверхзвуковом пограничном слое возникла в связи с необходимостью изучения процесса перехода ламинарного течения в турбулентное. Понять причины, приводящие к смене режима течения — значит научиться квалифицированно проводить расчеты сопротивления и тепловых потоков летательных аппаратов. Исследования процесса взаимодействия возмущений в потоках позволит более глубоко понять природу турбулентности и способствуют созданию соответствующей теории. Большое практическое значение имеет задача управления течением. Например, путем ламинаризации пограничного слоя можно снизить энергетические затраты на преодоление сопротивления трения, уменьшить тепловые потоки на летательных объектах. Одна из важных проблем настоящего времени для проведения целого ряда аэрофизических экспериментов и моделирования полета в лабораторных условиях — создание малотурбулентных аэродинамических труб. Основным источником возмущений в сверхзвуковых трубах — турбулентный пограничный слой их стенок. Ламинаризация и в этом случае оказывается полезной. Известно, что переход ламинарного течения в турбулентное связан с возникновением неустойчивых колебаний и последующим их усилением. Процесс перехода охватывает как линейную, так и нелинейную стадии развития возмущений, и полное его описание отсутствует даже для дозвуковых течений. Вместе с тем следует заметить, что основные черты перехода могут быть описаны с позиций линейной теории. К сожалению, для сверхзвуковых скоростей даже линейная теория устойчивости долгое время оставалась недостаточно развитой. Если говорить о исследованиях в нашей стране, то до начала семидесятых годов отсутствовали вообще публикации по этим вопросам. Исключение составляли отдельные экспериментальные данные по положению перехода.

Ц е л ь р а б о т ы — создание расчетно-математического аппарата для описания линейного развития возмущений в параллельных и слабонепараллельных сверхзвуковых течениях и проведение на его основе конкретных физических исследований.

Н а у ч н а я н о в и з н а. В отличие от традиционного асимптотического метода Дана-Линя-Лиза в работе предложен, обоснован и доведен до практического использования численный метод решения задачи устойчивости сверхзвукового пограничного слоя. Впервые проведены точные расчеты температур гладкой поверхности, обеспечивающих полную стабилизацию пограничного слоя, исправлены ошибочные данные Решотко (США). Получены новые данные по влиянию охлаждения поверхности, продольного отрицательного градиента давления и отсасывания на устойчивость сжимаемого пограничного слоя, показана их стабилизирующая роль. Расчетным путем обнаружены неизвестные ранее области неустойчивых частот. Впервые исследовано совместное влияние проницаемости и охлаждения поверхности на устойчивость пограничного слоя и обнаружена немонотонная зависимость критического числа Рейнольдса от температуры поверхности. Новыми являются данные по возбуждению внешним звуком колебаний внутри пограничного слоя, превышающих интенсивность внешних акустических волн в несколько раз. В зависимости от определяющих параметров задачи коэффициенты отражения звука от пограничного слоя изменяются от нулевого значения до величин, превышающих единицу. На основе метода многих масштабов разработан алгоритм расчета параметров волны в сверхзвуковом слаботеплопроводном потоке. На его основе впервые вычислены локальные коэффициенты порождения волн Толлмина-Шлихтинга звуком. В работе предложен критерий устойчивости, не имеющий аналогов в известной литературе, критическое значение которого слабо меняется для широкого класса течений.

Н а у ч н а я и п р а к т и ч е с к а я ц е н н о с т ь.

Развитый в работе численный метод находит широкое применение при исследовании устойчивости и перехода сверхзвуковых течений, а именно, вблизи искривленных поверхностей, в трехмерных пограничных слоях, при наличии диссоциации и др. Теоретические данные работы стимулировали постановку целого ряда отечественных экспериментов по развитию возмущений в сверхзвуковых пограничных слоях и используются при их анализе.

Отдельные результаты работы уже в настоящее время объясняют наблюдаемые практически важные явления.

Исследования по взаимодействию акустических возмущений с пограничным слоем показали, что звуковые волны возбуждают интенсивные колебания пограничного слоя и являются причиной более

раннего перехода ламинарного пограничного слоя в турбулентный аэродинамических трубах в сравнении с летными данными.

В настоящее время ведутся интенсивные дискуссии относительно роли неоднородности среды (непараллельность течения в теории гидродинамической устойчивости) в развитии возмущений. Для случая сжимаемой жидкости в работе решена задача о развитии возмущений в слабонепараллельном потоке. Предложенная теория более полно, в сравнении с теорией плоско-параллельных течений, моделирует развитие возмущений в реальных условиях, особенно при малых числах Рейнольдса. В то же время показано, что максимальные по пограничному слою колебания нарастают в направлении основного потока практически в соответствии с обычной теорией гидродинамической устойчивости (приближение плоско-параллельного течения) в области, близкой к зоне перехода ламинарного течения в турбулентное на плоской пластине. Тем самым, теория слабонепараллельных течений может использоваться для обоснования и определения области применимости приближения параллельного течения. Проведенные исследования по порождению волн Толмина-Шлихтинга звуком найдут применение при расчете положения перехода с учетом уровня и спектрального состава внешних возмущений.

Построенный в работе инвариантный критерий устойчивости важен для выяснения физических процессов, происходящих в зоне перехода ламинарного течения в турбулентное. Кроме того, он может использоваться в приложениях для предсказания положения перехода на телах сложной формы без специальных расчетов (как правило трудоемких) обычных характеристик устойчивости.

Результаты работы уже в настоящее время используются на практике для оценки положения перехода на телах сложной формы при обтекании сверхзвуковым потоком. Развитый метод решения задачи о взаимодействии акустических возмущений с пограничным слоем позволяет оценить тепловые потоки и сопротивление трения на моделях при наличии акустического поля. Полученные в работе результаты будут полезны для решения проблемы ламинаризации течения в пограничном слое.

сверхзвуковом пограничном слое, представленные в диссертации.

В главе I дана общая математическая формулировка проблемы линейного развития возмущений в сверхзвуковом пограничном слое. Там же обсуждены основные положения теории.

В качестве основополагающих уравнений, описывающих движение сжимаемого газа, взяты полные уравнения Навье-Стокса, неразрывности, сохранения энергии и состояния. Задача о развитии возмущений формулируется для стационарного основного потока и решение принимается в виде суммы, состоящей из независимой от времени части и малой нестационарной добавки, удовлетворяющей линеаризованным уравнениям. Для двумерного стационарного течения возмущение по боковой координате z и времени t может быть взято пропорциональным $\exp(i\beta z - i\omega t)$, уравнения упрощаются, а решение становится зависящим от двух переменных: y (координата в нормальном относительно основного потока направлении) и x (продольная координата). Все это приводится в первом параграфе.

Полученные уравнения все еще сложны для их интегрирования. Наибольшие трудности возникают при формулировке граничных условий при x_0 и x_1 (левая и правая границы рассматриваемой области течения). Во втором параграфе приводятся основные уравнения для случая плоскопараллельного потока, то есть когда стационарное течение зависит только от y . Решение в этом случае принимается в виде $z(y)\exp(i\alpha x + i\beta z - i\omega t)$, где $z(y)$ - восьми компонентная вектор-функция, соответствующая возмущениям трех составляющих скоростей, давления, температуры, а также производных по y от продольной и боковой компонент скорости и температуры. Полученная система восьми уравнений распадается на систему шестого порядка

$$\rho [(U-c)f + U'\epsilon] = -(\nu/\gamma M^2)\pi + (\mu/\alpha Re)f'', \quad (1)$$

$$[\alpha^2(U-c)\epsilon] = -(\nu/\gamma M^2)\pi',$$

$$i(U-c)r + \rho'\epsilon + \rho(i f + \epsilon') = 0,$$

$$\rho [i(U-c)v + T'\varphi] = -(\gamma - 1)(if + \varphi') + (\gamma\mu/\sigma\alpha Re)v''$$

$$\pi/\rho = r/\rho + v/T$$

и систему второго порядка, не имеющую принципиального значения для проблемы устойчивости. Здесь U , ρ , μ — скорость, плотность, вязкость основного течения; M , γ , σ — число Маха, показатель адиабаты, число Прандтля; f , $\alpha\varphi$, π , v , r — амплитуды возмущений скорости в направлении распространения волны и в y — направлении, давления температуры, плотности; α , c — параметры волны: волновое число и фазовая скорость.

В третьем параграфе обсуждаются граничные условия. Показано, что для затухающих в бесконечности ($y \rightarrow \infty$) возмущений необходимо выполнение трех граничных условий на поверхности ($y = 0$), которые записываются в виде

$$f(0) = \varphi(0) + a\pi(0) = v(0) = 0 \quad (2)$$

В случае непроницаемой жесткой поверхности можно принять $a = 0$. На протяжении долгого времени нормальная составляющая возмущения скорости принималась равной нулю даже в случае проницаемой поверхности, что явилось непоследовательным рассмотрением. Колебания давления, непременно, вызовут колебания и нормальной скорости. Пусть проницаемые участки пластины представляют узкие цилиндрические каналы. Тогда в них можно рассмотреть распространение звуковых волн (или волн давления) и получить величину a , зависящую от чистоты колебаний, вязкости газа в отверстиях, диаметра отверстия и толщины пластины (длина цилиндрического канала). В работе показано, что в случае несжимаемой жидкости увеличение толщины пластины (повышая гидравлическое сопротивление) приводит к уменьшению a вплоть до нулевого значения. Для сжимаемого газа величина a стремится к конечному значению, и поры начинают работать как гибкие покрытия, а влияние пор будет чувствоваться для материала любой толщины.

Дифференциальные уравнения (1) с граничными условиями (2) и требованием затухания возмущений в бесконечности определяют задачу на собственные значения. В §4 подробно обсуждается метод

численного интегрирования системы уравнений устойчивости. Наличие малого параметра при старшей производной потребовало применения специального метода. Нами использовался метод ортогонализации С.К.Годунова. Весь интервал интегрирования разбивался на достаточное количество подинтервалов, в каждом из которых частные решения, полученные методом Рунге-Кутты не превышали заданного значения. В конце каждого интервала предусматривается ортогонализация частных решений. Построенные ортогональные решения принимаются в качестве начальных данных при интегрировании в следующем подинтервале. Для нахождения собственных значений не требуется построение собственных функций. Поэтому частные решения внутри области интегрирования не запоминались. В тех случаях, когда нужны были собственные функции, запоминались результаты ортогонализации и проводилась обратная прогонка с целью восстановления истинного решения.

В параграфах с 5-го по 7-ой дан краткий анализ свойств решения без учета вязкости. После несложных преобразований уравнения устойчивости (I) (в "невязком" приближении) приводятся к дифференциальному уравнению второго порядка

$$\frac{d}{dy} \left\{ \frac{(U-c)\varphi' - U'\varphi}{T - M^2(U-c)^2} \right\} = \frac{\alpha^2(U-c)}{T} \varphi. \quad (3)$$

Уравнение (3) допускает два типа нейтральных возмущений. Их сущность можно выяснить при рассмотрении аналитического решения в бесконечности ($y \gg 1$). Вне пограничного слоя параметры основного течения постоянны и уравнение (3) приводится к виду

$$d^2\varphi/dy^2 = \beta^2\varphi, \quad \beta^2 = \alpha^2 [1 - M^2(1-c)^2]. \quad (4)$$

В случае нейтральных возмущений β - действительно, но может принимать как положительное, так и отрицательное значение в зависимости от величины фазовой скорости c . В первом случае ($1 - 1/M < c < 1 + 1/M$) одно из решений уравнения (4) затухает, а второе неограниченно возрастает при $y \rightarrow \infty$. Поэтому второе частное решение должно быть исключено из рассмотрения, и следует принять

$$\varphi = c_0 \exp(-\beta y), \quad \beta > 0. \quad (5)$$

Во втором случае ($c > 1 + 1/M$, $c < 1 - 1/M$) оба решения ограничены и следует принять

$$\varphi = c_1 \exp(\beta y) + c_2 \exp(-\beta y), \quad \beta - \text{мнимое} \quad (6)$$

Для определенности рассмотрим обтекание непроницаемой поверхности, на которой выполняется условие

$$\varphi(0) = 0. \quad (7)$$

Видно, что при заданном значении c в первом случае решение (5) может быть продолжено в сторону поверхности в соответствии с уравнением (3) и удовлетворено (7) только для дискретного набора значений α . Во втором случае наличие двух постоянных в (6) позволяет построить решение, удовлетворяющее (7), при любых α . Дополнительное рассмотрение показывает, что первый случай соответствует обычной задаче на собственные значения для возмущений, затухающих в бесконечности. Вторая задача связана с взаимодействием монохроматической волны и пограничного слоя. Одно из слагаемых в (6) описывает падающую звуковую волну, второе — отраженную.

Одна из важных особенностей сверхзвукового пограничного слоя состоит в его чувствительности к внешним воздействиям. В частности, известно сильное стабилизирующее воздействие охлаждения поверхности. Более того, существуют критические температуры, при которых достигается полная стабилизация течения — устойчивость при любых числах Рейнольдса. Следует однако уточнить, что это справедливо только для одного класса возмущений, изучение которых было начато в работах Лиза, Линя и Дана. На основе асимптотического метода ими было установлено, что при охлаждении на ветвях кривой нейтральной устойчивости $c \rightarrow 1 - 1/M$, $\alpha \rightarrow 0$, $Re \rightarrow \infty$. На каждой из ветвей произведение αRe стремится к своему пределу. Предельные значения αRe на верхней и нижней ветвях нейтральной кривой при дополнительном охлаждении сближаются, а неустойчивая область частот сокращается. Полное ее исчезновение наступает при критическом значении температуры поверхности T_w^* . Наиболее известные данные Лиза, Линя и Дана, Решотко были получены асимптотическим методом, справедливым при $\alpha Re \gg 1$. Однако, согласно их же результатам последнее не-

неравенство не выполняется, по крайней мере, при $M \approx 2$. Поэтому нами была поставлена задача – провести аналогичное исследование по полной стабилизации прямым численным методом. Первое, что требовалось для этого – сформулировать задачу на собственные значения, из которой определялись бы значения αRe на асимптотах кривой нейтральной устойчивости.

Так как на асимптотах $\alpha \rightarrow 0$, $c = 1 - 1/M$, а αRe – конечно, то система (I) в пределе приводится к виду

$$\rho [i(U-c)f + U'\varphi] + i\pi/\gamma M^2 = (\mu/\alpha Re)f'',$$

$$\pi' = 0,$$

(8)

$$\rho [i(U-c)v + T'\varphi] + (\gamma - 1)(if + \varphi') = (\gamma\mu/\sigma\alpha Re)v'',$$

$$i(U-c)r + \rho'(if + \varphi') = 0,$$

$$\pi/\rho = r/\rho + v/T, \quad c = 1 - 1/M.$$

Анализ условий на внешней границе пограничного слоя (или решения при $\gamma \rightarrow \infty$) выявил дополнительную к αRe неопределенную величину, представляющую предел отношения $A = \sqrt{1 - M^2(1 - c^2)}/\alpha$ на асимптотах кривой нейтральной устойчивости. С учетом однородных граничных условий величины αRe и A находятся как результат задачи на собственные значения. После того, как для фиксированной T_w получена пара значений αRe , отыскивается T_w^* , при которой две величины αRe совпадают между собой. Уравнение (8) и метод решения приведены в §§8–9.

В последнем параграфе первой главы рассмотрена модель развития возмущения постоянной частоты в слабонепараллельном потоке. Рассматриваются уравнения для двумерных возмущений, развивающихся в потоке при автомодельном течении. Методика для двумерных возмущений обобщается на случай трехмерных в четвертой главе при проведении конкретных расчетов. Линеаризованные уравнения относительно возмущений типа $Z(\eta, \xi) \exp(i\omega t)$ приводятся к виду

$$(z_i)_\eta - a_{ij}^0 z_j - a_{ij}^1 \theta z_j / \partial \xi = b_{ij} z_j / X, \quad (9)$$

где z_i - функции, определяющие возмущения параметров потока, $d\eta = dy/\delta(x)$, $d\xi = dx/\delta(x)$, $X = \delta Ue/\nu_e$. Коэффициенты в уравнениях (9) - медленно меняющиеся функции x , а $X \gg 1$. Предполагается, что размеры возмущений малы по сравнению с размерами, на которых существенно изменение основных параметров потока, что дает основание принять зависимость z от η и X в виде

$$z = [z^0(\epsilon X, \eta) + z^1(\epsilon X, \eta)/X + \dots] \exp(\theta(X)). \quad (10)$$

Подстановка (10) в (9) и приравнивание членов с одинаковыми степенями $1/X$ приводит к рекуррентным системам уравнений

$$(z_i^0)_\eta - a_{ij}^0 z_j - a_{ij}^1 \theta_X \psi z_j^0 = 0, \quad (11)$$

$$(z_j^1)_\eta - a_{ij}^0 z_j^1 - a_{ij}^1 \theta_X \psi z_j^1 = b_{ij} z_j^0 + X a_{ij}^1 \psi z_{jX}^0. \quad (12)$$

Здесь $\psi = dX/d\xi$. Граничные условия:

$$z_i^k, z_3^k, z_5^k = 0 \quad \text{при} \quad \eta = 0, \infty. \quad (13)$$

В нулевом приближении возмущения описываются уравнениями устойчивости в приближении параллельности течения. Собственная функция z_0 определяется с точностью до произвольной функции $A(X)$. Само значение A не может быть найдено из однородной задачи. Для определения ее логарифмической производной воспользуемся следующим приемом. Пусть $z^0 = A \bar{z}^0$, где \bar{z}^0 - определенным образом нормированное решение однородной задачи (11), (13) с собственным значением θ_X . В этом случае оператор левой части (12) - вырожденный, и решение существует при условии ортогональности правой части к задаче, сопряженной относительно (11), (13). Из условия ортогональности и принятой нормировки легко получить величину $(dA/dX)/A$. В этом случае степень пространственного нарастания любой из величин z_i определится соотношением

$$(dz_i/dX)/z_i = \theta_x + \left\{ (dA/dX)/A + (\partial \bar{z}_i^0 / \partial X) / \bar{z}_i^0 \right\} \quad (I4)$$

Здесь θ_x - собственное значение нулевого приближения, \bar{z}_i^0 - собственная функция нулевого приближения с конкретной нормировкой (например, $\bar{z}_2(0) = 1$), $(dA/dX)/A$ определяется из условия разрешимости первого приближения.

Другая важная задача, требующая учета непараллельности течения - возбуждение одних волн другими. Например, при взаимодействии звуковых колебаний с пограничным слоем в последнем возбуждаются волны Толлмина-Шлихтинга даже в рамках линейной задачи, если течение не является однородным в пространстве. Пусть во внешней части пограничного слоя имеется волна с заданными параметрами: волновое число в боковом направлении β_0 , частота ω_0 , волновое число в x - направлении α_0 . Если рассмотреть участок, устойчивый или близкий к нейтральному, то возмущения в слое будут определяться в основном из решения задачи о взаимодействии звуковой волны с пограничным слоем в приближении плоскопараллельного потока. Поэтому общее решение будем искать в виде суммы

$$z = \Delta z + z^{\alpha_0}(\varepsilon x, y) \exp(i \int_{x_0}^x \alpha_0 dx). \quad (I5)$$

Здесь z^{α_0} - решение задачи о взаимодействии, параметрически зависящее от x , Δz - дополнительный член, возникающий из-за неоднородности течения в x - направлении. При больших числах Рейнольдса в устойчивой или нейтральной области можно ожидать выполнения условия $|\Delta z| \ll |z^{\alpha_0}|$. Уравнения, описывающие развитие возмущений аналогичны (9). Подстановка (I5) в систему (9), записанную в системе координат (x, y) , приводит к уравнениям

$$\frac{\partial(\Delta z)}{\partial y} - B_{ij}^0(\Delta z_j) - B_{ij}^1 \frac{\partial(\Delta z_j)}{\partial x} = B_{ij}^1 \frac{\partial z_i^{\alpha_0}}{\partial x} \exp(i \int_{x_0}^x \alpha_0 dx). \quad (I6)$$

Предположим, что Δz разлагается в спектр однородной задачи (II), (I3) с заменой нулевых граничных условий на бесконечности условиями ограниченности. В этом случае кроме дискретного спектра (волна Толлмина-Шлихтинга) можно получить непрерывный спектр задачи. Таким образом, предполагается что

$$\Delta z = z^k(\epsilon x, y) \exp(i \int \alpha^k dx) + \int [z^\alpha(\epsilon x, y) \exp(i \int \alpha dx)] d\alpha. \quad (17)$$

Здесь z^k — волна из дискретного спектра, z^α — волна из непрерывного спектра. Пусть $z^k = A \bar{z}^k$, где \bar{z}^k — определенным образом нормированное решение, A — амплитуда, зависящая от x . Подставляя (17) в (16) и умножая обе части уравнений скалярно на решение сопряженной задачи, соответствующей номеру k , легко получить для малых значений A уравнение.

$$\frac{dA^k}{dx} = - \frac{(B'(\partial z^{\alpha_0}/\partial x), \varphi^k)}{(B' \bar{z}^k, \varphi^k)} e^{i \int_{x_0}^x (\alpha_0 - \alpha^k) dx}, \quad (18)$$

где φ^k — решение сопряженной задачи, $(B' \psi, \varphi^k)$ — скалярное произведение. Таким образом, в однородном потоке $\partial z^{\alpha_0}/\partial x = 0$ и невозможно возбуждение волн Толлмина-Шлихтинга монохроматической внешней волной. Наоборот, чем выше неоднородность, тем с большей интенсивностью они порождаются. Интегральное порождение зависит, кроме того, от близости волновых чисел α_0 и α^k . Для сверхзвуковых скоростей даже параметры звуковой волны могут быть близкими к параметрам волны Толлмина-Шлихтинга. В этом случае осцилляции в (18) отсутствуют на значительных участках, и будет наблюдаться эффективное порождение одних волн другими даже в случае слабой неоднородности течения.

Проводя итог по первой главе, следует отметить, что автором поставлена задача о граничных условиях на проницаемой поверхности, сформулирована задача о численном исследовании условий полной стабилизации. Впервые обращено внимание на близость дискретного и непрерывного спектров в задаче устойчивости сверхзвукового пограничного слоя. Для случая слабой непараллельности течения разработан метод решения задачи о развитии возмущений и возбуждения волн Толлмина-Шлихтинга внешними возмущениями. Дано подробное описание метода ортогонализации для численного интегрирования уравнений устойчивости сжимаемого пограничного слоя.

В главе 2 решен ряд конкретных задач по устойчивости сверхзвукового пограничного слоя в приближении плоскопараллельного течения. В настоящее время известно, что неустойчивость в сжимаемых потоках развивается наиболее интенсивно относительно волн, фронты которых распространяются под углом $\chi + 0$ относи-

тельно направления основного течения. Тем самым не верна теорема Сквайра, имеющая место в случае несжимаемой жидкости. Поэтому наряду с числом Маха на устойчивость сверхзвукового пограничного слоя влияет угол χ . В первом параграфе в диапазоне чисел Маха $M = 1.5 + 2.5$ рассмотрена устойчивость пограничного слоя с отсосыванием и продольным отрицательным градиентом давления. В исследованном диапазоне чисел Маха устойчивость слоя понижалась при увеличении M . Эти данные находятся в хорошем соответствии с зависимостью числа Рейнольдса от числа M для пограничного слоя на плоской теплоизолированной пластине, рассчитанной Масловым А.А. Как отсосывание, так и ускорение течения оказывают стабилизирующее воздействие. При этом, с увеличением критического числа Рейнольдса, увеличиваются углы χ и уменьшаются волновые числа и фазовые скорости распространения возмущений.

Последующие два параграфа посвящены влиянию охлаждения поверхности на устойчивость сжимаемого пограничного слоя. На первом этапе была рассмотрена задача дозвукового пограничного слоя. Здесь были подтверждены более ранние выводы других авторов о стабилизирующем влиянии охлаждения, сделанные на основе приближенных расчетов, а также получены новые данные в широком диапазоне дозвуковых чисел Маха и температур поверхности. В случае сверхзвуковых скоростей получены точные данные, в рамках уравнений Дана-Линя, по температуре поверхности, обеспечивающей полную стабилизацию течения. Было обнаружено, при этом, что неустойчивая область частот под влиянием охлаждения может разделиться на две. Этот результат получил дальнейшее развитие в работах А.А.Маслова и подтвержден экспериментально А.А.Масловым и В.И.Лысенко. Ввиду того, что в настоящее время известно существование дополнительных неустойчивых областей, на которые охлаждение оказывает дестабилизирующее влияние, проведены специальные расчеты по влиянию охлаждения на степень нарастания возмущений для $M = 4,5$. Эти данные хорошо согласуются с аналогичными результатами Мэка.

В третьем параграфе исследованы условия полной стабилизации и проанализированы результаты Решотко, полученные приближенным методом. Его исследования проведены при условии равенства нулю возмущений температуры на стенке $v'(0) = 0$, а не $v'(0) = 0$ как принято в работах Лиза, Линя, Дана. При этом были обнаружены две области полной стабилизации и делались попытки объяснить ано-

мальное поведение числа Рейнольдса перехода от температуры поверхности, замеченное в ряде экспериментальных работ, и заключающееся в существовании двух экстремальных значений (максимума и минимума) в зависимости $Re_{пер}$ от T_w при общем стабилизирующем влиянии охлаждения. Наши данные, основанные на точном интегрировании уравнений устойчивости, показали ошибочность выводов Решотко. Область полной стабилизации является единственной, слабо зависящей от тепловых граничных условий. Таким образом, снят вопрос относительно возможности полной стабилизации сверхзвукового пограничного слоя, относительно первой неустойчивой области частот охлаждением. Важно отметить, что в течение десяти лет, начиная с работы Решотко, существовало мнение о наличии двух областей полной стабилизации в плоскости критических температур и чисел Маха. В СССР были опубликованы аналогичные данные и в более позднее время. Анализ асимптотического метода в совокупности с нашими прямыми расчетами позволил выяснить причину ошибочных результатов Решотко. Как показали эксперименты А.А.Маслова и В.И.Лысенко, аномальная зависимость $Re_{пер}$ от T_w наблюдалась в аэродинамических трубах из-за образования инея на поверхности пластины. В рамках гладкой непроницаемой пластины двойной реверс перехода не может быть объяснен теоретически и, по-видимому, не наблюдается в опытах.

Если для первой неустойчивой моды охлаждение поверхности стабилизирует пограничный слой на непроницаемой стенке, в случае пористого материала зависимость критического числа Рейнольдса от степени охлаждения оказывается сложнее. В работе проведены специальные исследования для $M = 1.6$, двумерных возмущений ($\chi = 0$) и фиксированного значения пористости и размера пор. Были построены кривые нейтральной устойчивости для разных T_w . В расчетах использовались уравнения устойчивости плоскопараллельного потока и граничные условия на проницаемой поверхности, предложенные автором в первой главе. В области слабого охлаждения наблюдается стабилизация течения при уменьшении T_w , аналогично случаю непроницаемой пластины. Имеется область слабого изменения Re^* от T_w . При глубоком охлаждении наблюдается резкая дестабилизация течения. Скачкообразное изменение критических чисел Рейнольдса объясняется в случае увеличения разделением кривой нейтральной устойчивости на две, одна из которых замкнутая. Последняя стяги-

вается в точку и исчезает при конечном значении температуры. Сна- кообразное уменьшение связано с образованием замкнутой кривой нейтральной устойчивости в области низких температур. Данные о немонотонной зависимости критических чисел Рейнольдса находятся в соответствии с экспериментами по переходу на шероховатой по- верхности. Вопрос о полном соответствии физических процессов, происходящих на шероховатой и проницаемой поверхностях остается невнятным из-за отсутствия специальных экспериментов. Можно однако ожидать, что перенос условий непроницаемости для искрив- ленной поверхности на некоторую эффективную гладкую приведет к условиям, аналогичным условию проницаемости. Более того, основной фактор, формирующий граничные условия на проницаемой пластине с малыми размерами пор, может быть сведен к уровню диссипации энер- гии в порах. В силу того, что диссипация энергии на шероховатой поверхности аналогична случаю пористой, в ряде задач можно ожи- дать глубокой аналогии в развитии возмущений на двух типах по- верхностей. Однако для окончательного выяснения этих вопросов необходимы соответствующие эксперименты. При исследовании устой- чивости пограничного слоя на проницаемой поверхности была обна- ружена возможность вырождения волны Толлмина-Шлихтинга в излу- чаемую звуковую волну.

В т р е т ь е й г л а в е рассмотрена задача о взаимо- действии сверхзвукового пограничного слоя с звуковыми внешними возмущениями. Эта проблема возникла в результате обсуждения много- численных экспериментальных данных по переходу в различных аэро- динамических трубах. Было установлено, что число Рейнольдса пе- рехода сильно зависит от внешнего фона в аэродинамической трубе. Ввиду того, что доля акустических колебаний в них преобладает над другими типами возмущений, было важно рассмотреть характер взаимодействия звуковых колебаний с пограничным слоем при сверх- звуковых скоростях. Возмущения, связанные с внешними акустичес- кими волнами, описываются обычными уравнениями устойчивости и принадлежат к сплошному спектру проблемы на собственные значе- ния. Задача ставилась следующим образом. На внешней границе по- граничного слоя задается единичная амплитуда возмущений продоль- ной скорости в падающей волне. В процессе решения отыскивается распределение амплитуд возмущений основных параметров течения и коэффициенты отражения звуковых волн от пограничного слоя. Под- робно исследован случай $M = 2.0$. При фиксированных значениях

c , Re , ω построены распределения амплитуд возмущений всех гидродинамических величин потока. Получено, что возмущения продольной скорости внутри слоя существенно превышают колебания вне его. Величина максимума зависит от частоты, фазовой скорости и числа Рейнольдса. Специальные эксперименты, проведенные в ИГИМ, подтвердили основные выводы теории. В работе построена зависимость максимальной по частоте амплитуды возмущений внутри слоя для фиксированного значения числа Рейнольдса от величины числа Маха. Показано, что с увеличением M интенсивность колебаний внутри слоя возрастает и может превышать внешние возмущения в несколько десятков раз. Этот результат важен с двух точек зрения. Во-первых, интенсивные колебания, возникшие под влиянием внешних возмущений, могут быть источниками неустойчивых волн, амплитуда которых будет пропорциональна внешнему фону. С другой стороны, внутри пограничного слоя могут возникнуть интенсивные колебания, которые окажутся ответственными за возникновение турбулентности без предварительного усиления по теории устойчивости (минуя линейную стадию усиления). В первом параграфе рассмотрены двумерные волны ($\chi = 0$), во-втором — трехмерные. Хотя отношение максимума колебаний внутри слоя к амплитуде внешних возмущений оказывается наибольшим для двумерных волн, рассмотрение трехмерных колебаний ($\chi \neq 0$) представляет особый интерес из-за возможности порождения звуком волн Толлмина-Шлихтинга, для которых наиболее опасными могут оказаться направления с $\chi \neq 0$. Проведенные расчеты показали, что для низких частот максимальное значение амплитуды возмущений массового расхода не всегда достигается при $\chi = 0$. Значения коэффициентов отражения в зависимости от параметров пограничного слоя и внешней звуковой волны изменяются в широких пределах от нуля до величины, превышающей единицу.

В четвертой главе рассмотрено развитие возмущений в пограничном слое на плоской пластине с учетом непараллельности. Один из важных выводов теории устойчивости непараллельных потоков состоит в зависимости степени нарастания возмущений от поперечной координаты. Для проверки этого явления нами проводились как расчеты по схеме, описанные в первой главе, так и эксперименты при $M = 2$ и фиксированной частоте в естественных условиях. Результаты теории качественно согласуются с экспериментальными данными. Трудности постановки эксперимента с кон-

тролируемыми возмущениями не позволяют в настоящее время провести более тщательную проверку теории. Расчеты амплитуды возмущений массового расхода (в частности для $M = 4.5$) показали, что колебания сосредоточены в узкой области, прилегающей к критическому слою. Однако даже в этой области степень усиления зависит от нормальной к поверхности координате. Этот факт является одним из главных, ведущих к разбросу экспериментальных данных, полученных Кенделлом даже с контролируемыми возмущениями. Сопоставление теоретических результатов с данными Кенделла для наклонных возмущений показало большее соответствие теории с экспериментом в области высоких частот колебаний, из-за меньшего влияния непараллельности. По этой же причине разброс экспериментальных данных тоже уменьшается с увеличением частоты. В области низких частот и малых чисел Рейнольдса влияние непараллельности увеличивается. Степень усиления, полученная для максимума возмущений массового расхода с учетом непараллельности лучше согласуется с экспериментом, хотя вклад непараллельности в целом невелик. Слабое влияние непараллельности было получено как для $M = 4.5$ при $Re = 1550$, так и для $M = 2.2$ при $Re = 10^8$. Таким образом, усиление максимума возмущений может быть рассчитано на основе теории устойчивости плоскопараллельных течений. В связи с этим интересно обсудить первые данные Найфа и Ел Хади, опубликованные в 1980 году, где указывается на сильное влияние непараллельности на степень нарастания возмущений в сверхзвуковом пограничном слое. Как выяснилось в личных беседах, их данные были ошибочными. Последующие расчеты Ел Хади согласуются с нашими результатами.

Более важная роль непараллельности течения может оказаться в порождении неустойчивых волн внешними монохроматическими волнами. На основе метода, описанного в первой главе, были рассчитаны источники неустойчивых волн, возникающие под воздействием внешних возмущений. Кроме того, проведены оценки интегрального порождения волн Толлмина-Шлихтинга. Полученные результаты показывают, что усиление собственных волн, связанное с наличием внешних возмущений сопоставимо с самоусилением в неустойчивой области. Другой важный факт состоит в увеличении эффективности порождения при уменьшении числа Рейнольдса (усиление эффекта непараллельности), что приводит к неопределенности в расчетах амплитуды волн Толлмина-Шлихтинга. Поэтому данные по порождению

собственных колебаний внешними возмущениями следует считать предварительными, демонстрирующими метод расчета начальной амплитуды неустойчивой волны. Задача реакции пограничного слоя к внешним воздействиям привлекает внимание широкой научной общественности и находится в самом начале своего решения.

В заключении проанализирован проведенный цикл работ по теории линейного развития возмущений в сверхзвуковом пограничном слое, изложенный в диссертации, сделан ряд важных выводов, а также обсуждены новые направления теории развития возмущений в сложных сверхзвуковых течениях.

Наиболее важные цели, сформулированные около 15-ти лет назад, к настоящему времени достигнуты. На основе методов расчета, описанных в первой главе, проводились и ведутся широкие исследования по сходным, но более сложным проблемам. Достаточно сказать, что А.А.Масловым подробно теоретически изучено влияние охлаждения поверхности на устойчивость сверхзвукового пограничного слоя как относительно двумерных, так и трехмерных возмущений. Кроме результатов, включенных здесь, им рассмотрено детально влияние трехмерных возмущений на условия полной стабилизации течения охлаждением, проведены расчеты устойчивости при разных числах Маха, исследовано влияние тепловых граничных условий.

В ИТТМ Г.В.Петровым подробно изучалась устойчивость пограничного слоя неравновесно диссоциированного газа. Тема работы являлась новой, аналогичные работы отсутствовали. Благодаря созданным программам расчета устойчивости течений сжимаемой жидкости и полученным для этого случая результатам удалось исследовать устойчивость многокомпонентного потока сжимаемого газа.

Исследования, проведенные в данной работе, положительно повлияли на развитие экспериментальных работ по устойчивости и переходу сверхзвукового пограничного слоя в ИТТМ СО АН СССР. Теоретические работы по устойчивости течения вблизи гладкой поверхности не могли объяснить экспериментально наблюдаемый "двойной реверс перехода" в зависимости числа Рейнольдса перехода от температуры поверхности. Поэтому были проведены многочисленные эксперименты по влиянию охлаждения на устойчивость и переход сверхзвукового пограничного слоя. Исследования производились А.А.Масловым и В.И.Лысенко. В частности, экспериментально объяснен один случай появления двойного реверса перехода. Уменьшение числа Рейнольдса перехода в области умеренно низких температур связано

с выпадением инея, образующего шероховатую поверхность. В области более глубокого охлаждения структура инея становится мелкозернистой, поверхность по своим свойствам приближается к гладкой, и наблюдается быстрый рост числа Рейнольдса перехода. В тех случаях, когда выпадение инея отсутствовало, число Рейнольдса изменялось монотонно с температурой поверхности, что согласуется с теорией устойчивости. В настоящее время в лаборатории волновых процессов в вязких сверхзвуковых течениях Института теоретической и прикладной механики ведутся эксперименты по взаимодействию акустических возмущений с пограничным слоем, развитию волн в различных потоках (вблизи затупленного тела, конуса, проницаемой поверхности и др.), начаты исследования по развитию контролируемых возмущений, вводимых в поток искусственно. Некоторое представление о научных направлениях по обсуждаемой проблеме можно составить по монографии [1].

Развитый в работе аппарат расчета характеристик устойчивости и взаимодействия пограничного слоя с внешними возмущениями позволяет приближенно предсказывать положение перехода в сверхзвуковом пограничном слое как e^n - методом Смита, так и амплитудным методом Липпмана-Мэка, что находит применение в прикладных работах по аэродинамике.

Основным методом в расчетах положения перехода является процедура нахождения собственных значений, определяющих характеристики неустойчивости. Вопросы, связанные с локализацией и определением наиболее неустойчивой волны Толлмина-Шлихтинга, оказываются сложными. Поэтому некоторые физические гипотезы могут оказаться полезными для приближенного определения наиболее неустойчивых колебаний. Предположим, что встречающиеся в практике течения характеризуются небольшим набором типов неустойчивостей. Как уже известно, для случая несжимаемой жидкости имеется вязкая неустойчивость, развивающаяся в отсутствие точки перегиба в профиле скорости и невязкая (релеевская), связанная с наличием такой точки. Для сверхзвуковых скоростей становятся важными свойства сжимаемости среды и распределение плотности, и могут развиться другие типы неустойчивостей. Во всех случаях в качестве критерия устойчивости (неустойчивости) принимают число Рейнольдса. К сожалению, его критическое значение не остается постоянным даже в рамках одного типа потери устойчивости, а само оно - неинвариантно. В 1978 году академиком Н.Н. Яненко была по-

ставлена задача поиска инвариантного критерия. Нами было построено градиентное число Рейнольдса R_{gr} , определяемое по локальным свойствам потока. Проведенные исследования показали, что его критическое значение слабо зависит для широкого класса течений как при дозвуковых, так и при сверхзвуковых скоростях. В частности, градиентное число Рейнольдса остается постоянным в интервале $M = 1 + 4$, в то же время как обычное число Рейнольдса изменяется. Как нам кажется, градиентное число Рейнольдса будет полезно и в разработке строгой теории перехода ламинарного течения в турбулентное.

О с н о в н ы е р е з у л ь т а т ы и в ы в о д ы

1. Разработан, обоснован и доведен до практического использования расчетно-математический аппарат для решения задачи устойчивости сверхзвукового пограничного слоя. На его основе:

а) Получены новые данные по влиянию продольного отрицательного градиента давления и отсасывания на устойчивость течения в слое при числах Маха $M = 1,5 + 2,5$. Показано стабилизирующее влияние этих факторов. В случае охлаждаемой пластины обнаружены неизвестные ранее области неустойчивых частот.

б) Проведены расчеты температуры полной стабилизации, проанализировано влияние температурных граничных условий. Выявлены причины возникающих ошибок при использовании асимптотического метода.

в) Решена задача устойчивости пограничного слоя на проницаемой поверхности. Проведены исследования по совместному влиянию охлаждения и проницаемости поверхности на развитие возмущений в слое. Показана возможность скачкообразного изменения критического числа Рейнольдса при охлаждении пористой пластины. Получен случай вырождения волны Толлмина-Шлихтинга в излучаемую звуковую волну.

2. Решена задача о взаимодействии сверхзвукового пограничного слоя с внешними возмущениями. Проведены систематические исследования для случая звукового поля. Обнаружены интенсивные ко-

лебания внутри пограничного слоя, наведенные внешними звуковыми возмущениями. При изменении числа Маха от 2 до 8 отношение максимальной в слое амплитуды к амплитуде падающей волны изменяется в пределах 10 + 60. Коэффициенты отражения могут превышать единицу.

3. Проведены численные исследования по влиянию непараллельности на характеристики устойчивости сверхзвукового пограничного слоя. Показано, что степень усиления возмущений зависит от нормальной координаты относительно направления основного потока. Вместе с тем установлено, что влияние непараллельности на возрастание максимума возмущения невелико для течений вблизи перехода. Более важная роль непараллельности связана с возбуждением неустойчивых возмущений звуковыми волнами из-за близости параметров двух типов волн. Расчеты и оценки, проведенные на основе разработанной методики показали, что амплитуда порожденной волны Толлмина-Шлихтинга может превышать внешнюю звуковую волну.

4. В работе построено градиентное число Рейнольдса, критическое значение которого слабо зависит от конкретного типа течения, и поэтому лучше характеризует условия смены режима течения.

5. Результаты работы стимулировали проведение комплексного изучения проблемы развития возмущений в сложных потоках как с точки зрения теории, так и эксперимента. Они легли в основу исследований устойчивости и перехода пограничного слоя с охлаждением и диссоциацией при гиперзвуковых скоростях. Разработанные в работе численные методы используются в практических задачах для оценки положения перехода ламинарного сверхзвукового пограничного слоя в турбулентный на телах сложной формы.

Таким образом, выполненными исследованиями сформулированы и обоснованы научные положения нового направления, содержание которого составляют разработанные численные методы решения теоретических и практических задач проблемы устойчивости и перехода к турбулентному состоянию сверхзвуковых пограничных слоев; решены задачи устойчивости сверхзвуковых параллельных течений, взаимодействия звуковых волн с пограничным слоем и развития возмущений в слабонепараллельном сжимаемом потоке.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Гапонов С.А., Маслов А.А. Развитие возмущений в сжимаемых потоках, Новосибирск: Наука, 1980, 144 с.
2. Гапонов С.А., Маслов А.А. Устойчивость сжимаемого пограничного слоя при дозвуковых скоростях. - Изв. СО АН СССР, 1971, № 3, сер. техн. наук, вып. I, с. 24-27.
3. Гапонов С.А., Маслов А.А. Численное решение задачи о полной стабилизации сверхзвукового пограничного слоя. - ПМТФ, 1972, № 2, с. 39-43.
4. Гапонов С.А., Маслов А.А. О численном и асимптотическом методах решения задачи о полной стабилизации пограничного слоя. - ПМТФ, 1972, № 3, с. 60-64.
5. Гапонов С.А. Влияние сжимаемости газа на устойчивость пограничного слоя на проницаемой поверхности при дозвуковых скоростях. - ПМТФ, 1975, № I, с. 121-125.
6. Гапонов С.А. Устойчивость сверхзвукового пограничного слоя на проницаемой поверхности с теплообменом. - Изв. АН СССР, МЖГ, 1977, № I, с. 41-46.
7. Гапонов С.А. Взаимодействие сверхзвукового пограничного слоя с акустическими возмущениями. - Изв. АН СССР, МЖГ, 1977, № 6, с. 51-56.
8. Гапонов С.А., Дрыжов А.С. Отражение и усиление звуковых волн сверхзвуковым пограничным слоем. - Труды II-го Всесоюзного симпозиума по физике акусто-гидродинамических явлений и оптоакустике, Москва: Наука, 1979, с. 20-21. (см. также "Возбуждение возмущений в сверхзвуковом пограничном слое звуком". - В сб. "Развитие возмущений в пограничном слое", Новосибирск: 1979, с. 118-126).
9. Гапонов С.А., Лебига В.А., Маслов А.А. и др. Развитие возмущений в сверхзвуковом пограничном слое, вызванных внешним звуковым полем. - Труды IX Всесоюзной конференции, Москва: Акустический институт АН СССР, 1977, с. 49-52.
10. Гапонов С.А. Влияние непараллельности течения на развитие возмущений в сверхзвуковом пограничном слое. - Изв. АН СССР, МЖГ, 1980, № 2, с. 28-31.
11. Гапонов С.А. Развитие трехмерных возмущений в слабо непараллельном сверхзвуковом потоке. - Изв. СО АН СССР, 1982, № 3,

вып. I, с. 19-23.

12. Яненко Н.Н., Гапонов С.А. Инвариантные критерии устойчивости течений сжимаемой жидкости. - ДАН СССР, 1981, т. 259, № 5, с. 1056-1059.
13. Гапонов С.А. Возбуждение волн Толлмина-Шлихтинга в сверхзвуковом пограничном слое звуком. - Изв. АН СССР, МЖГ, 1983, № 3.
14. Гапонов С.А., Левченко В.Я. Современные проблемы перехода пограничного слоя. - Успехи механики, 1981, № 4.
15. Yanenko N.N., Gaponov S.A. Local Criteria of Hydrodynamic Stability. In "Laminar-Turbulent Transition" Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 1980, pp. 96-101.
16. Gaponov S.A. The influence of Flow Non-parallelism on Disturbances Development in the Supersonic Boundary Layer Proceedings of the Eight Canadian Congress of Applied Mechanics, Moncton, 1981, pp. 673 - 674.
17. Yanenko N.N., Gaponov S.A. Invariant Criteria of Hydrodynamic Stability. Proceedings of the Eight Canadian Congress of Applied Mechanics, Moncton, 1981, pp. 671 - 672.

Ответственный за выпуск Гапонов С.А.

Подписано к печати 19 74-842 Л. № 83059
Формат 60x84/16 Усл. печ. л. 1,6. Уч. изд. л. 1,6
Тираж 100. Заказ № 236 . Бесплатно.

Ротапринт МФТИ