

УДК 532.526.5.013.4

УСТОЙЧИВОСТЬ ЛАМИНАРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ И ЗАТЯГИВАНИЕ ПЕРЕХОДА НА НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ¹

БЕЛОВ И. А., ЛИТВИНОВ В. М., КАЗАКОВ А. В.,
КОГАН М. Н., КУПАРЕВ В. А.

В настоящее время большое внимание уделяется управлению ламинарно-турбулентным переходом с целью уменьшения сопротивления трения [1]. Воздействие на развитие возмущений в пограничном слое может осуществляться двумя способами: перестройкой профилей скорости и температуры в пограничном слое и непосредственным активным гашением возмущений без перестройки основного течения [2-3]. Наиболее известными способами затягивания перехода являются создание благоприятного градиента давления, отсос газа из пограничного слоя и охлаждение поверхности тела.

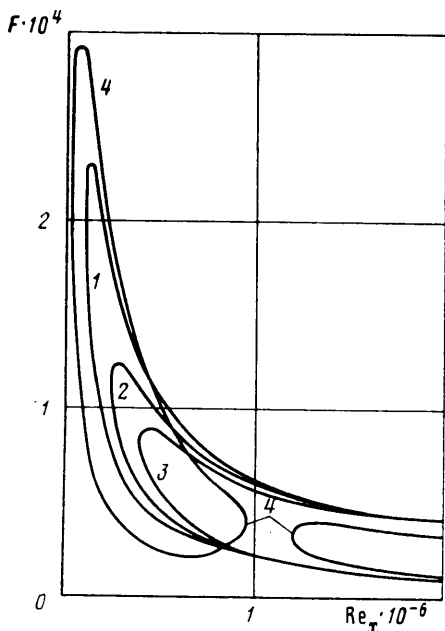
Недавно в [4-7] было показано, что нагрев поверхности в передней части обтекаемого тела до температуры, большей, чем температура набегающего потока, может приводить к повышению устойчивости ламинарного пограничного слоя и затягиванию перехода. Настоящая работа посвящена дальнейшему изучению влияния неравномерного распределения температуры по поверхности тела на характеристики устойчивости пограничного слоя. Показано, что наличие достаточно протяженных участков поверхности, где температура тела превышает температуру набегающего потока, приводит к дестабилизации течения около такого участка и появлению локальной замкнутой области неустойчивости ламинарного течения.

1. Рассматривается дозвуковое обтекание плоской пластины длиной l при больших числах Рейнольдса $Re_\infty = \rho_\infty u_\infty l / \mu_\infty$, где ρ_∞ , u_∞ , μ_∞ — плотность, скорость и коэффициент динамической вязкости набегающего потока. Внешний поток предполагается невозмущенным, а течение в пограничном слое описывается уравнениями Прандтля для сжимаемого теплопроводного газа. На поверхности тела задаются распределение температуры, условия прилипания и непротекания. Зависимость коэффициента динамической вязкости от температуры описывается законом Саттерленда. Решение уравнений пограничного слоя находилось численно.

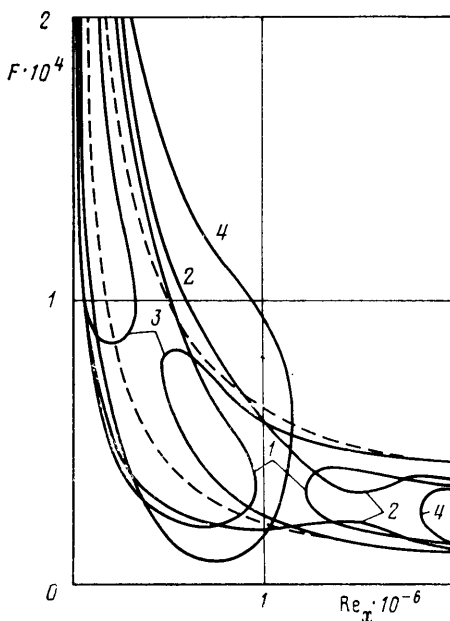
Найденные профили скорости и температуры в сечениях $x = \text{const}$ использовались для определения характеристик устойчивости ламинарного течения на основе линейной теории устойчивости плоскопараллельных течений во временной постановке [11, 12]. Возмущенное течение при этом представляется в виде бегущей волны, волновые числа (α и β) и частота ($\omega = \omega_r + i\omega_i$), которой связаны между собой дисперсионным соотношением. Определение частоты ω при заданных значениях волновых чисел сводится к нахождению собственных значений и решений системы обыкновенных дифференциальных уравнений для возмущений. Система уравнений и метод решения задачи подробно описан в [11].

По найденным собственным значениям определялись групповая скорость $C = \partial\omega_r / \partial\alpha$, коэффициенты пространственного нарастания возмущений $\alpha_i = -\omega_i / C$ и коэффициенты усиления возмущений $A(F)$ для ряда фиксированных частот $F = \omega_r / R = 2\pi f \mu_\infty / \rho_\infty u_\infty^2$. Здесь R — число Рейнольд-

¹ Доклад на VI Всесоюзном съезде по теоретической и прикладной механике (г. Ташкент, 1986 г.). При подготовке публикации учтены результаты работ [8, 9], вышедших после съезда.



Фиг. 1



Фиг. 2

са, посчитанное по местной толщине вытеснения, f — частота возмущения в герцах, A — отношение амплитуды возмущения в некоторой точке x к ее величине в соответствующей точке нижней ветви кривой нейтральной устойчивости. Положение ламинарно-турбулентного перехода определялось минимальным значением x , для которого выполнялось условие $\ln A = 8$ [10].

Следует отметить, что анализ характеристик устойчивости во временной постановке позволяет определить точно все нейтральные возмущения и кривые нейтральной устойчивости. В то же время коэффициенты пространственного нарастания возмущений, как показывают сравнения с результатами непосредственного расчета пространственного развития возмущений [13], отличаются менее чем на 5%.

2. Характеристики устойчивости и положение перехода в пограничном слое на плоской пластине были определены для различных распределений температуры по поверхности обтекаемого тела при числе Маха набегающего потока $M_\infty = 0,1$. На фиг. 1 показан вид нейтральных кривых в плоскости (F, Re_x) . Кривая 1 соответствует автомодельному пограничному слою Блазиуса при постоянной температуре поверхности $T_w = T_\infty$, а кривые 2–4 получены для распределения температуры согласно закону

$$T_w = T_\infty (T_0 - (T_0 - 1) Re_x / Re_1) \quad Re_x < Re_1$$

$$T_w = T_\infty, \quad Re_x \geq Re_1$$

(2.1)

Кривые 2–4 получены для значений $Re_1 = 8,6 \cdot 10^4$, $2 \cdot 10^5$ и 10^6 соответственно и $T_0 = 1,60$. При достаточной протяженности участка поверхности с повышенной температурой (при $Re_1 \geq 10^6$) нейтральная кривая (кривая 4 фиг. 1) разбивается на две части, образуя две подобласти неустойчивого течения. Передняя замкнутая подобласть неустойчивости обусловлена дестабилизирующим действием нагретой поверхности. В результате такой дестабилизации течения критическое значение числа Рейнольдса потери устойчивости значительно уменьшается, а высокочастотные возмущения в пограничном слое начинают нарастать значительно раньше, чем в случае постоянной температуры поверхности $T_w = T_\infty$. Расчет коэф-

коэффициентов пространственного усиления возмущений показывает, что в замкнутой подобласти $N = \ln A < 8$ и перехода ламинарного течения в турбулентное в районе замкнутой подобласти не происходит. Ниже по течению нагретый газ оказывается над поверхностью с более низкой температурой, что приводит к уменьшению скоростей пространственного нарастания возмущений.

При $Re_1 = 10^6$ ниже по течению от замкнутой области неустойчивости течение вновь становится устойчивым и вторично теряет устойчивость уже при $Re_x = 1,2 \cdot 10^6$. И хотя течение впервые теряет устойчивость в этом случае очень рано (при $Re_x \approx 4 \cdot 10^4$), значительное уменьшение скоростей нарастания возмущений внутри основной части нейтральной кривой ниже по течению от нагреваемого участка приводит к тому, что число Рейнольдса перехода для случая $Re_1 = 10^6$ увеличивается больше, чем в случаях $Re_1 = 2 \cdot 10^5$ и $8,6 \cdot 10^4$, и на 70% превышает значение числа Рейнольдса перехода на изотермической поверхности с $T_w = T_\infty$.

Влияние протяженности нагреваемого участка и его температуры продемонстрированы на фиг. 2. Здесь штриховой линией показана кривая нейтральной устойчивости для случая $T_w = T_\infty$, а кривые 1 соответствуют $T_0 = 1,6$ и $Re_1 = 10^6$ в формуле (2.1), которые на фиг. 1 обозначались цифрой 4. Кривые 3 и 4 соответствуют постоянной температуре $T_0 = 1,6$ вплоть до чисел $Re_2 = 10^5$ и 10^6 соответственно с дальнейшим линейным падением температуры на участке $Re_2 \leq Re_x \leq 1,1 Re_2$ до $T_w = T_\infty$. Далее вниз по потоку $T_w = T_\infty$.

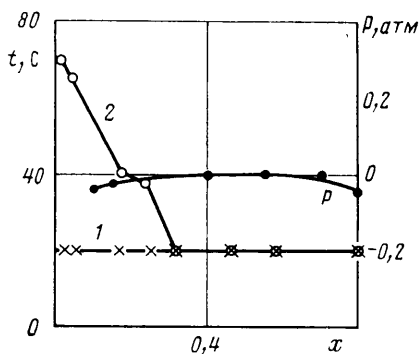
Из сравнения кривых 1 и 4 видно, что удлинение зоны нагрева в передней части тела приводит к дальнейшему смещению начала основной области неустойчивости вниз по потоку. Однако одновременно расширяется и замкнутая область неустойчивости, так что рост возмущений в этой области приводит к переходу при $Re_x = 5,5 \cdot 10^5$, т. е. значительно раньше, чем при $T_w = T_\infty$.

Кривая 2 фиг. 2 демонстрирует процесс разрыва области неустойчивости на две подобласти. Эта кривая получена при $T_0 = 1,5$ и $Re_1 = 1,5 \cdot 10^6$ в формуле (2.1). Расчеты показывают, что при удлинении области нагрева $Re_1 > 1,5 \cdot 10^6$ или увеличении $T_0 > 1,5$ область неустойчивости разрывается.

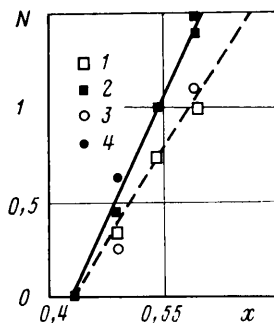
В работах [8, 9] также рассмотрено влияние нагрева поверхности на устойчивость пограничного слоя. В частности, приведены результаты расчета для параметров нагрева, соответствующих кривой 2 фиг. 2. По-видимому, передняя часть (до сужения) расчетами работ [8, 9] не была выявлена и суждение об эффекте нагрева делалось по смещению начала области неустойчивости $Re_x = Re^*$, которое принималось вблизи горловины сужения. Однако все вышесказанное убедительно показывает, что о положении точки перехода нельзя судить по положению Re^* . Для определения положения точки перехода необходимо находить всю область неустойчивости ламинарного течения и рассчитывать коэффициенты усиления возмущений для достаточно широкого диапазона частот.

3. Экспериментальные исследования влияния нагрева поверхности пластины вблизи передней кромки на устойчивость ламинарного пограничного слоя проводились в аэродинамической трубе с открытой рабочей частью при скорости потока $V_\infty = 10$ м/с и степени турбулентности потока $\sim 0,3\%$. Модель представляла собой плоскую пластину длиной 1, шириной 0,5 и толщиной 0,02 м. Передняя часть пластины была выполнена в виде двух сопряженных полуэллипсов с отношением полуосей с рабочей стороны модели 1:30. В носовой части модели, выполненной из дюралюминия, находился омический подогреватель протяженностью 0,05 м. Остальная часть пластины была снабжена змеевиком для охлаждения поверхности водой до температуры, равной температуре набегающего потока.

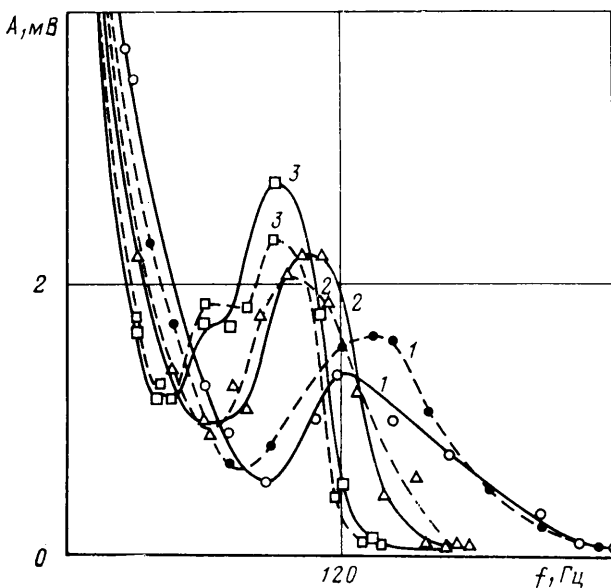
Распределение температуры по поверхности пластины фиксировалось системой хромель-копелевых термопар, напряжение с которых измеря-



Фиг. 3



Фиг. 5



Фиг. 4

лось цифровым вольтметром Щ-68 000 через коммутационное устройство. Для измерения статического давления модель была дренирована в продольном и поперечном направлениях. Перепады давления измерялись с помощью датчиков ИКД-0,016, информация с которых обрабатывалась на ЭВМ. Распределение статического давления и температуры по поверхности модели при скорости набегающего потока 10 м/с приведено на фиг. 3.

Исследовалось развитие в пограничном слое как естественных, так и искусственно создаваемых возмущений. В последнем случае для возбуждения вихревых возмущений использовался известный метод вибрирующей ленточки, устанавливаемой в пограничном слое вблизи поверхности пластины на расстоянии 0,335 м от передней кромки. Средняя скорость и пульсации скорости измерялись термоанемометром постоянной температуры. Амплитуда пульсационной составляющей скорости и спектральные характеристики пульсаций скорости определялись с помощью многоканального анализатора спектра СК4-72. Измерение параметров течения вдоль продольной координаты x проводилось на расстоянии y от поверхности модели, близком к положению пристеночного максимума в профиле пульсаций скорости поперек пограничного слоя. Перемещение датчика термоанемометра осуществлялось дистанционно управляемым координатником.

На фиг. 4 представлены спектральные характеристики естественных возмущений, распространяющихся вниз по течению в случае изотермической поверхности (сплошные линии) и на неравномерно нагретой поверхности модели (штриховые линии). Спектральные характеристики, полученные в центральном сечении модели на расстояниях от передней кромки $x=0,32; 0,52; 0,72$ м, изображены на фиг. 4 кривыми 1–3 соответственно.

В каждом из приведенных на фиг. 4 спектров имеются два ярко выраженных максимума. Один из них соответствует частотам, лежащим в диапазоне $f=85\div 140$ Гц, а другой максимум располагается вблизи низких частот и обусловлен, по-видимому, низкочастотными колебаниями модели. Максимум, находящийся на более высоких частотах в спектрах пульсаций скорости ($f\approx 100$ Гц), смещается по мере роста координаты x в сторону более низких частот и соответствует возмущениям типа волн Толлмина — Шлихтинга. Действительно, возмущения с различными частотами, распространяясь вниз по потоку, теряют на некотором расстоянии от передней кромки устойчивость и начинают нарастать в области неустойчивости вплоть до достижения второй ветви кривой нейтральной устойчивости. Коэффициенты усиления возмущений в области неустойчивости зависят от частоты, причем возмущения с более низкими частотами теряют устойчивость несколько ниже по течению, а нарастают на все более протяженных участках, пока не достигнут своей второй нейтральной точки.

Оказалось, что вниз по течению амплитуды пульсаций скорости, соответствующих второму максимуму в спектре на частотах $f=85\div 140$ Гц нарастают в пограничном слое на пластинке с нагретой носовой частью медленнее, чем в случае изотермической поверхности пластины $T_w=T_\infty$. С использованием спектральных характеристик возмущений был проведен анализ пространственного нарастания возмущений для ряда фиксированных частот как без нагрева, так и при нагреве части поверхности модели вблизи передней кромки. Оказалось, что при нагреве части поверхности возмущения с фиксированными частотами нарастают медленнее, чем без нагрева поверхности.

Аналогичные результаты были получены и при анализе развития искусственно создаваемых возмущений за вибрирующей ленточкой для частот $f=60, 90, 110, 150$ Гц. На фиг. 5 представлены коэффициенты пространственного нарастания монохроматических возмущений с частотой $f=110$ Гц, причем точками 1, 2 отмечены экспериментальные данные развития естественных возмущений, а 3, 4 — результаты, полученные при исследовании возмущений за вибрирующей ленточкой. Точки 2, 4 соответствуют изотермической поверхности пластины, а 1, 3 — нагреву носовой части пластины. На фиг. 5 приведены также результаты расчетов коэффициентов пространственного нарастания возмущений с частотой 110 Гц по линейной теории устойчивости. Сплошной линией изображены результаты для изотермической поверхности, а штриховой — результаты, соответствующие нагреву поверхности модели в носовой части. Расчеты проводились для распределений температуры и статического давления по поверхности пластины, взятых из эксперимента. Сравнение результатов показывает, что экспериментально полученные коэффициенты пространственного нарастания возмущений близки к расчетным.

Таким образом, результаты экспериментальных исследований развития возмущений в пограничном слое подтверждают возможность повышения устойчивости ламинарного течения в пограничном слое с помощью нагрева поверхности пластины вблизи передней кромки.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Hefner J. N., Bushnell D. M.* Application of stability theory to laminar flow control // AIAA Paper. 1979. № 1493. 20 p.
2. *Liepmann H. W., Nosenchuck D. M.* Active control of laminar-turbulent transition // J. Fluid Mech. 1982. V. 118. P. 201–204.
3. *Пилипенко А. А., Шаповалов Г. К.* Управление состоянием пограничного слоя путем введения искусственных возмущений // Уч. зап. ЦАГИ. 1986. Т. 17. № 4. С. 73–80.
4. *Казаков А. В., Коган М. Н., Купарев В. А.* О повышении устойчивости дозвукового пограничного слоя при нагреве поверхности вблизи передней кромки обтекаемого тела // Докл. АН СССР. 1985. Т. 283. № 2. С. 333–335.
5. *Казаков А. В., Коган М. Н., Купарев В. А.* Об устойчивости дозвукового пограничного слоя при нагреве поверхности плоской пластины вблизи передней кромки // Изв. АН СССР. МЖГ. 1985. № 3. С. 68–72.
6. *Казаков А. В., Курачий А. П.* Влияние неизотермичности поверхности тонкого профиля на устойчивость ламинарного пограничного слоя // Изв. АН СССР. МЖГ. 1986. № 5. С. 36–42.
7. *Белов И. А., Литвинов В. М., Казаков А. В., Коган М. Н., Купарев В. А.* О повышении устойчивости ламинарного течения и затягивания перехода к турбулентности с помощью нагрева газа в пограничном слое // VI Всесоюз. съезд по теор. и прикл. мех. Ташкент, 24–30 сент., 1986. Ташкент: Науч. комитет СССР по теорет. и прикл. мех., 1986. С. 91.
8. *Струминский В. В., Лебедев Ю. Б., Фомичев В. М.* Влияние градиента температуры вдоль поверхности на протяженность ламинарного пограничного слоя газа // Докл. АН СССР. 1986. Т. 289. № 4. С. 813–816.
9. *Струминский В. В., Довгаль А. В., Лебедев Ю. Б., Левченко В. Я., Тимофеев В. А., Фомичев В. М.* Теоретическое и экспериментальное исследование устойчивости пограничного слоя при неравномерном нагревании поверхности. Новосибирск: Препринт ИТПМ № 3. 1987. 22 с.
10. *Jaffe N. A., Okamura T. T., Smith A. M. O.* Determination of spatial amplification factors and their application of predicting transition // AIAA J. 1970. V. 8. № 2. P. 301–308.
11. *Malik M. R., Orszag S. A.* Efficient computation of the stability of three dimensional compressible boundary layer // AIAA Pap. 1981. № 1277. P. 13.
12. *Гапонов С. А., Маслов А. А.* Развитие возмущения в сжимаемых потоках. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1980. 143 с.
13. *Левченко В. Я., Володин А. Г., Гапонов С. А.* Характеристики устойчивости пограничных слоев. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1975. 313 с.

Москва

Поступила в редакцию
15.VI.1987