

УДК 532.526

© 1990 г.

БОЙКО А. В., ДОВГАЛЬ А. В., КОЗЛОВ В. В.,
ЩЕРБАКОВ В. А.

НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ТЕЧЕНИЯ В ЗОНЕ ОТРЫВА ЛАМИНАРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ НА МАЛОЙ НЕРОВНОСТИ ПОВЕРХНОСТИ

Экспериментально исследовано развитие возмущений ламинарного течения в зоне отрыва за выступом поверхности, расположенным в пограничном слое плоской пластины. Определены характеристики линейной неустойчивости отрывного течения; изучено взаимодействие колебаний, нарастающих в зоне отрыва, со средним течением.

Хорошо известен экспериментальный факт ускорения перехода к турбулентности в пограничном слое, вызываемого неровностями малой высоты, расположенными на обтекаемой поверхности. В [1] установлено, что соответствующий механизм заключается в сравнительно быстром усилении возмущений неустойчивого течения в зоне отрыва, формирующейся за выступом поверхности. Об этом же свидетельствуют и результаты расчетов нарастания возмущений малых амплитуд в пограничном слое с локальными областями рециркуляции [2-4]. Настоящая работа проведена с целью экспериментального изучения этого вопроса.

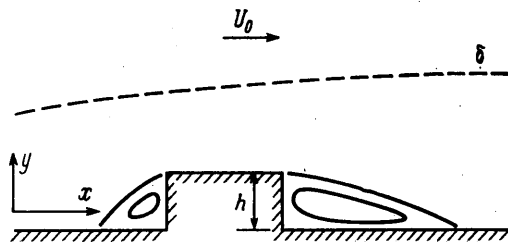
Предшествующие экспериментальные работы по неустойчивости течений в отрывных пузырях [5-7] посвящены областям отрыва переходного типа, формирование которых связано с происходящим в течении переходом к турбулентности. Для них характерна зависимость распределения средней скорости ламинарного течения, в котором нарастают малые колебания, от их амплитуды. В рассматриваемых здесь условиях при достаточно малом числе Рейнольдса течение во всей зоне отрыва сохраняется ламинарным. Таким образом удается отделить образование рециркуляционной области от перехода, происходящего за ее пределами. В свою очередь это дает возможность в обычной постановке исследовать устойчивость заданного среднего течения, не зависящего от наложенных на него малых возмущений.

Наряду с изучением устойчивости анализировалось влияние колебаний, нарастающих в зоне отрыва, на распределение средней скорости течения.

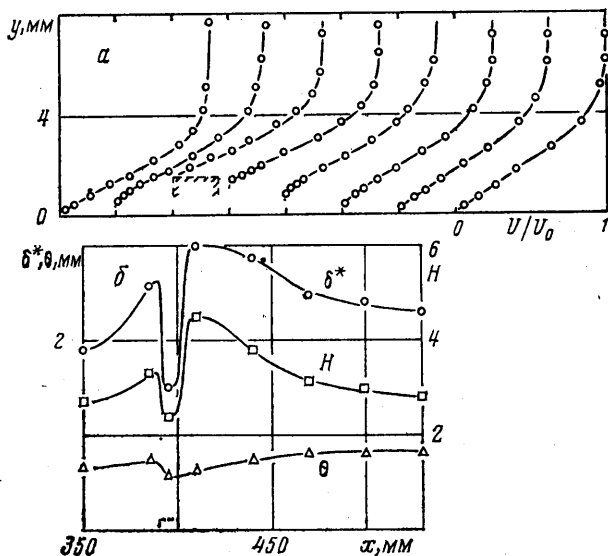
1. Экспериментальная методика. Исследование проводилось в малотурбулентной аэродинамической трубе дозвуковых скоростей Т-324 ИТГМ СО АН СССР при степени турбулентности свободного потока $\epsilon < 0,04\%$. Экспериментальная модель, представляющая собой плоскую пластину из полированного оргстекла, располагалась вдоль потока. На поверхности модели имелся двумерный прямоугольный выступ длиной 10 мм и высотой $h=1,65$ мм, расположенный на расстоянии $x=390$ мм от передней кромки пластины (фиг. 1).

Высота препятствия выбиралась по возможности большой для того, чтобы получить за ним достаточно протяженную область рециркуляции и хорошее пространственное разрешение в измерениях средней скорости и пульсаций. Вместе с тем допустимый размер выступа ограничен величиной, при которой сохраняется стационарное отрывное течение. В условиях эксперимента при скорости внешнего течения в окрестности препятствия $U_0=6,6$ м/с отношение высоты препятствия к толщине пограничного слоя Блазиуса, рассчитанной для сечения $x=390$ мм, равнялось 0,35.

Развитие искусственно возбуждаемых двумерных монохроматических вихревых колебаний изучалось в зоне отрыва за выступом. Для их генерации использовалась методика вибрирующей ленты [8]; лента помещалась в пограничном слое перед препятствием на расстоянии 300 мм от передней кромки пластины. Распределения средней скорости и пульсационные ха-



Фиг. 1

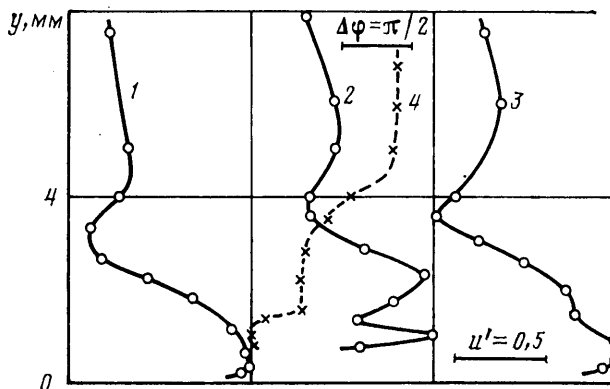


Фиг. 2

характеристики измерялись при помощи термоанемометрического комплекса DISA 55 D00, использовался однониточный датчик. Аппаратура обработки сигнала с термоанемометра включала частотный анализатор FAT-1, с помощью которого исследовались амплитудно-фазовые свойства возмущений выделенной частоты в полосе 4 Гц.

2. Структура течения. Обтекание выступа поверхности сопровождается образованием двух областей рециркуляции: область меньших размеров находится перед препятствием, более протяженная — за ним. На фиг. 2, а изображены профили скорости (y — расстояние от поверхности пластины) последовательно в сечениях $x=350, 385, 395, 410, 440, 470, 500$ и 530 мм. Результаты измерений вблизи поверхности пластины в области возвратных токов не представлены, так как скорость течения здесь близка к нулю, что увеличивает ошибку в ее определении, вызванную относительно большой амплитудой пульсаций. По данным измерений, максимальная величина скорости возвратного течения в отрывной зоне не превосходит $0,5-1\%$ от U_0 .

Определенные по результатам измерений средней скорости значения толщины вытеснения δ^* , толщины потери импульса θ и формпараметра H изображены на фиг. 2, б. Слева и справа от выступа величины δ^* и H имеют максимальные значения, соответствующие перегибным профилям скорости в зоне отрыва (фиг. 2, а). По мере удаления от препятствия течение релаксирует к пограничному слою Блазиуса: в сечении $x=530$ мм пограничный слой присоединен к поверхности, но профиль скорости еще не рав-



Фиг. 3

новесный — формпараметр превышает значение 2,6, соответствующее течению Блазиуса. В условиях эксперимента длина области рециркуляции за препятствием составляла 70—80 мм; течение в этой области оставалось ламинарным с амплитудой пульсаций скорости, не превосходившей 0,3% от U_0 . Более подробно данные по среднему течению изложены в [9]. Там же дано сопоставление с результатами [1] для обтекания выступа поверхности цилиндрического сечения, полученными в схожих экспериментальных условиях.

3. Неустойчивость. Развитие вихревых колебаний в зоне отрыва за выступом, возбуждаемых выше по потоку вибрирующей лентой, изучалось при различных частотах и амплитудах генерации. Более детальное исследование проводилось для частоты $f=68,6$ Гц — одной из гармоник, принадлежащей диапазону неустойчивости течения. На фиг. 3 изображены профили среднеквадратичной амплитуды возмущений u' в трех характерных сечениях: перед выступом ($x=350$ мм, кривая 1), в отрывной области ($x=440$ мм, кривая 2) и в присоединившемся пограничном слое ($x=530$ мм, кривая 3). Для сечения $x=440$ мм наряду с амплитудным распределением приведена зависимость фазы колебаний φ от поперечной координаты (кривая 4).

На выступе волна Толлмина — Шлихтинга пограничного слоя (первое сечение) трансформируется в нарастающее собственное возмущение течения в отрывной зоне, для которого характерно появление третьего максимума в распределении амплитуды (второе сечение). За точкой присоединения, где течение постепенно возвращается к пограничному слою Блазиуса, происходит восстановление амплитудного профиля волны Толлмина — Шлихтинга. В третьем сечении профиль пульсаций близок к распределению интенсивности малых колебаний пограничного слоя на пластине; имеющееся отличие может быть вызвано и нелинейным искажением профиля (при амплитуде возмущений в сечении $x=530$ мм, равной 1,4% от скорости внешнего потока).

Фазовое распределение, изображенное на фиг. 3, имеет специфический для волн неустойчивости, развивающихся в локальных областях отрыва, вид с двумя размытыми по y скачками фазы, находящимися в минимумах амплитуды пульсаций (см. также [7]).

Дальнейшее исследование характеристик устойчивости течения заключалось в измерении пространственного усиления колебаний различных частот возбуждения. Было установлено, что в зоне рециркуляции за препятствием скорости нарастания возмущений фиксированных частот не зависят от интенсивности возбуждения, по меньшей мере до тех пор, пока амплитуда волны не превзойдет 1—1,5% от U_0 . Иными словами, возмущения достаточно малой интенсивности развиваются линейно по амплитуде.

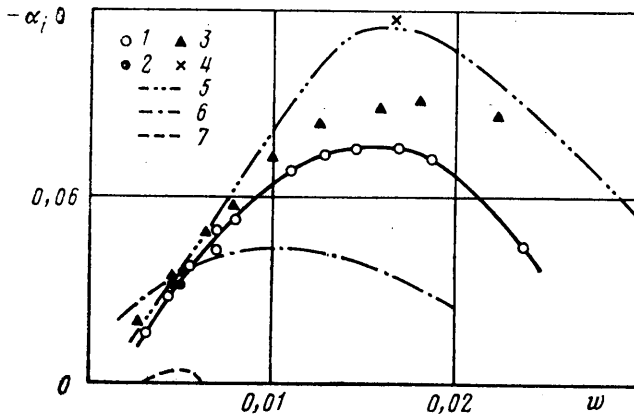
Естественный, казалось бы, результат — линейность развития колебаний малых амплитуд в зоне отрыва — является, между тем, нетривиальным свойством течения в отрывных областях. В предшествующих экспериментах по неустойчивости локальных областей отрыва, в которых исследовались течения с переходом к турбулентности, происходившем в пределах отрывной зоны, неизменно наблюдалось сильное влияние нарастающих возмущений на распределение средней скорости ламинарного течения [5—7]. В то же время, как показали экспериментальные исследования отрывных течений в различных конфигурациях, колебания независимо от амплитуды (до тех пор, пока она остается малой величиной) развиваются линейно.

Не обсуждая пока механизм взаимодействия возмущений с полем средней скорости, отметим противоречивость этого свойства локальных отрывных течений с обычным подходом к анализу устойчивости. Действительно, неустойчивость течения к колебаниям малых амплитуд подразумевает их развитие на фоне заданного, не зависящего от пульсаций среднего течения, профилем скорости которого определяются инкременты возмущений. А в зоне отрыва волны нарастают в течении, изменяющемся с амплитудой колебаний. Возникает вопрос о том, каким образом в этом случае может быть сформулирована задача устойчивости. Для объяснения противоречия в [6] было предположено, что развитие возмущений в области отрыва определяется неустойчивостью слоя смещения вблизи границы зоны рециркуляции, где форма профиля скорости (в окрестности точки перегиба) при возбуждении сохраняется неизменной.

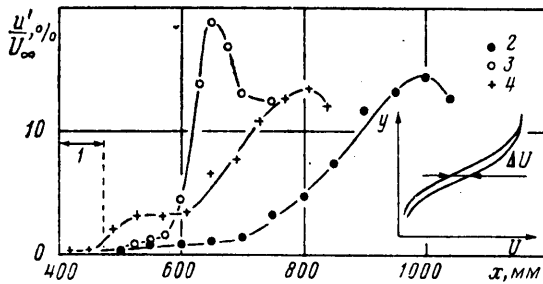
В исследуемом течении, как и в упомянутых работах, имело место описанное выше искажение волнами неустойчивости профилей средней скорости. Особенность данного случая, однако, заключается в том, что это искажение не наблюдалось при достаточно малой начальной амплитуде колебаний и появлялось с ее увеличением. Настоящее исследование, таким образом, показало, что свойства устойчивости течения, поле средней скорости которого искажается нарастающими в нем колебаниями, и исходного «невозмущенного», которое может быть рассчитано в рамках стационарной задачи, совпадают.

На основе измерений нарастания амплитуды возмущений различных частот были получены их коэффициенты пространственного усиления $-\alpha_x \theta$. Зависимость инкрементов от безразмерной частоты колебаний $\omega = \omega \theta / U_0$, ограничивающая диапазон неустойчивости течения в зоне отрыва за препятствием, показана на фиг. 4. Скорости нарастания определялись на участке экспоненциального усиления $x = 410 - 430$ мм. В качестве масштаба длины выбрано среднее значение толщины потери импульса между точками $x = 410$ и 440 мм (см. фиг. 2). С результатами настоящей работы (точки 1) хорошо согласуются данные экспериментов [1] (точки 2), где было измерено нарастание нескольких гармоник из естественного спектра пульсаций. Точки 2 нанесены согласно фиг. 18 работы [1] для возмущений, нарастающих на участке $x = 10 - 25$ мм за выступом в трех различающихся по числу Рейнольдса и высоте препятствия экспериментальных режимах. На фиг. 4 отмечены также результаты экспериментов [10] по устойчивости слоя смещения на границе струи, истекающей в неподвижную жидкость (точки 3), и слоя сдвига, формирующегося при обтекании уступа (точки 4, [11]). Сравнение полученного в настоящих измерениях диапазона неустойчивости с данными для слоев смещения вызывает интерес, поскольку они имеют схожие с течением в зоне отрыва профили средней скорости.

Помимо экспериментальных данных на фиг. 4 изображены расчетные диапазоны неустойчивости слоя смещения с распределением средней скорости в виде гиперболического тангенса (кривая 5, [12]), профиля скорости пограничного слоя в точке отрыва (кривая 6, [13]) и пограничного слоя Блазиуса ($Re_0 = 1320$) из [14] (кривая 7), соответствующего толщине



Фиг. 4



Фиг. 5

вытеснения за выступом в точке $x=410$ мм. Сопоставление показывает, что течению в зоне отрыва за препятствием свойственны большие (в сравнении с пограничным слоем) частоты и инкременты нарастающих возмущений, характерные для невязкой неустойчивых слоев сдвига. В то же время в области низких частот, где лежат точки 2 ([1]), значения коэффициентов усиления сопоставимы с величинами для пограничного слоя с положительным градиентом давления ($\beta < 0$). Этим можно объяснить полученное в [1] неплохое соответствие результатов измерений нарастания возмущений в зоне отрыва и расчетов неустойчивости перегибных профилей скорости пограничного слоя, которыми аппроксимировалось течение в отрывной области. Для колебаний же произвольной частоты, как видно из фиг. 4, такая аппроксимация не позволяет получить правильную оценку неустойчивости.

Сведенные на фиг. 4 результаты подтверждают представление о возмущениях, нарастающих в локальных областях отрыва, как волнах неустойчивости невязкой природы, связанных со слоем смешения вблизи границы зоны рециркуляции [6]. При этом, конечно же, нельзя полностью игнорировать присутствие твердой границы, которая может сказываться на величине коэффициентов усиления [15].

4. Взаимодействие возмущений со средним течением. Выше говорилось об изменении средних во времени характеристик ламинарного течения в зоне отрыва под действием развивающихся в нем колебаний малой амплитуды. Схематично искажение профиля средней скорости, вызываемое волной, распространяющейся в зоне рециркуляции, изображено на фиг. 5. Величина отклонения профиля скорости от невозмущенного ΔU во много раз превосходит местную (в том же сечении) амплитуду возмущения и возрастает с ее увеличением. Естественно отнести этот эффект на счет нелокального взаимодействия пульсаций и среднего течения.

Принимая во внимание экспериментальные результаты [16], где было зафиксировано влияние положения перехода к турбулентности на область отрыва, расположенную выше по потоку, деформацию профилей скорости можно расценивать как результат воздействия возбужденных колебаний на переход к турбулентности, к которому адаптируется вся зона рециркуляции. Такой схемой объясняется в общих чертах влияние колебаний на распределение средней скорости, наблюдавшееся в [5–7], когда переход происходил в области отрыва.

В настоящем случае отрывная зона была ламинарной, а турбулентное течение устанавливалось ниже по потоку. Нарастание вдоль x интегральной по частотному спектру амплитуды пульсаций, измеренное в максимуме возмущений поперек пограничного слоя, изображено на фиг. 5. В естественных условиях (без колебаний, возбуждаемых лентой) точка перехода (2), за которую принимается положение пика амплитуды, располагалась при $x \approx 1000$ мм, т. е. на расстоянии от выступа, в 7–8 раз превышавшем длину отрывной зоны 1.

Для выяснения того, каким образом в этих условиях волны неустойчивости искажают среднее течение, на поверхности пластины за препятствием поперек течения помещался цилиндр диаметром 4 мм. При перемещении его вдоль потока было определено минимальное значение координаты $x = 580$ мм, при котором зона отрыва не «чувствовала» изменения в течении, вызванного установкой турбулизатора. Точка перехода при этом находилась на расстоянии $x \approx 650$ мм (3). Таким образом, в отсутствие возмущений, возбуждаемых вибрирующей лентой, изменение положения перехода в диапазоне $x = 650–1000$ мм не сказывалось на течении в области отрыва. Далее переход фиксировался в отсутствие турбулизатора, когда в отрывную зону вносились возмущения в режиме влияния на распределение средней скорости. Из фиг. 5 видно, что в этом случае переход находился в промежуточном положении 4. Следовательно, наблюдавшееся изменение среднего течения вызывалось нарастающими волнами неустойчивости и не было связано с влиянием турбулентного течения вверх по потоку, которое возникало ниже по потоку.

В принципе механизм искажения среднего течения здесь тот же, что и при переходе в зоне отрыва или на небольшом от нее расстоянии: усиливаясь в направлении течения, возмущения достигают амплитуды, при которой они локально влияют на среднюю скорость, а течение выше по потоку приспособляется к происходящим изменениям. В пределах точности измерения средней скорости, составлявшей около 0,15% от U_0 , эффект появлялся начиная с интенсивности колебаний в конце зоны отрыва, равной примерно 1% от скорости внешнего течения.

5. Основные выводы. Показано, что в области отрыва за малой неровностью поверхности, расположенной в ламинарном пограничном слое, нарастают возмущения, частоты и инкременты которых близки к величинам, характерным для невязко неустойчивых свободных сдвиговых течений. Это согласуется с представлением, основанным на результатах предыдущих работ по устойчивости течения в локальных областях отрыва, о том, что развитие возмущений в зоне рециркуляции управляется неустойчивостью слоя смещения на ее границе. По мере увеличения начальной амплитуды нарастающих колебаний проявляется их влияние на среднюю скорость ламинарного течения, аналогичное наблюдавшемуся ранее в переходных областях отрыва.

Измерения нарастания возмущений, выполненные при их различных амплитудах, продемонстрировали совпадение характеристик устойчивости невозмущенной зоны отрыва и течения, профили скорости которого искажаются волнами неустойчивости. Таким образом, чувствительность отрывной зоны к возмущениям малых амплитуд не является препятствием для анализа устойчивости течения в стандартной постановке. Влияние колебаний на поле средней скорости не связано с переходом к турбулентности,

происходящим ниже по потоку области отрыва, а обусловлено развитием самой волны в отрывной зоне, т. е. деформация зоны отрыва при возбуждении малых возмущений свойственна не только переходным режимам течения, но может иметь место и в ламинарных областях рециркуляции с неустойчивым средним течением.

ЛИТЕРАТУРА

1. Klebanoff P. S., Tidstrom K. D. Mechanism by which a two-dimensional roughness element induces boundary-layer transition // *Phys. Fluids*. 1972. V. 15. № 7. P. 1173–1183.
2. Gruber K., Bestek H., Fasel H. Interaction between a Tollmien – Schlichting wave and a laminar separation bubble // *AIAA Pap.* 1987. № 87-1256. 10 p.
3. Nayfeh A. H., Ragab S. A., Al-Maaitah A. Effect of roughness on the stability of boundary layers // *AIAA Pap.* 1986. № 86-1044.
4. Sebeci T., Egan D. A. The effect of wave-like roughness on transition // *AIAA Pap.* 1988. № 88-0139. 7 p.
5. Довгаль А. В., Козлов В. В., Косорыгин В. С., Рамазанов М. П. Влияние возмущений на структуру течения в области отрыва // *Докл. АН СССР*. 1981. Т. 258. № 1. С. 45–48.
6. Довгаль А. В., Козлов В. В. Устойчивость отрывного течения при обтекании поверхности с точкой излома // *Докл. АН СССР*. 1983. Т. 270. № 6. С. 1356–1358.
7. Довгаль А. В., Козлов В. В. Устойчивость отрывного течения в двугранном угле // *Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук*. 1984. № 4. Вып. 1. С. 47–51.
8. Schubauer G. B., Skramstad H. K. Laminar boundary layer oscillation and stability of laminar flow // *NACA Rep.* 1948. № 909.
9. Бойко А. В., Довгаль А. В., Козлов В. В. и др. Отрыв ламинарного течения на двумерном препятствии в пограничном слое: Препринт № 7-88. Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР, 1988. 24с.
10. Freymuth P. On transition in a separated laminar boundary layer // *J. Fluid Mech.* 1966. V. 25. Pt 4. P. 683–704.
11. Browand F. K. An experimental investigation of the instability of an incompressible, separated shear layer // *J. Fluid Mech.* 1966. V. 26. Pt 2. P. 281–307.
12. Monkewitz P. A., Huerre P. Influence of the velocity ratio on the spatial instability of mixing layers // *Phys. Fluids*. 1982. V. 25. № 7. P. 1137–1143.
13. Van Ingen J. L. On the calculation of laminar separation bubbles in two-dimensional incompressible flow // *AGARD CP*. 1975. № 168. 17 p.
14. Левченко В. Я., Володин А. Г., Гапонов С. А. Характеристики устойчивости пограничных слоев. Новосибирск: Наука, 1975. 313 с.
15. Taghavi H., Wazzan A. R. Spatial stability of some Falkner-Skan profiles with reversed flow // *Phys. Fluids*. 1974. № 12. P. 2181–2183.
16. Chapman D. R., Kuehn D. M., Larson H. K. Investigation of separated flows in supersonic and subsonic streams with emphasis on the effect of transition // *NACA Rep.* 1958. № 1356. 40 p.

Новосибирск

Поступила в редакцию
22.IX.1988