

В. В. БАБЕНКО, В. А. БЛОХИН,
В. П. ИВАНОВ, Л. Ф. КОЗЛОВ

(Киев)

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ЛАМИНАРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ С ПОМОЩЬЮ ЛДИС

Проблема устойчивости ламинарного пограничного слоя является одной из основных при изучении перехода от ламинарного к турбулентному режиму течения. Экспериментальное изучение устойчивости ламинарного пограничного слоя проводится обычно с помощью введения в него небольших возмущений (как правило, синусоидальных колебаний малой амплитуды) и наблюдения за их развитием [1—3]. При этом гидродинамическая установка должна обеспечивать поток с малой степенью турбулентности, так как в противном случае вносимые возмущения вследствие «лавинообразного» развития приведут к возникновению турбулентности непосредственно в районе расположения источника возмущений. В качестве последнего большинство исследователей применяет тонкую металлическую ленту, которая может колебаться в потоке с заданными частотой и амплитудой. К измерительной аппаратуре предъявляются достаточно высокие требования по точности и чувствительности.

В последнее время лазерный доплеровский измеритель скорости (ЛДИС) нашел широкое применение в различных областях экспериментальной гидромеханики. Особый интерес представляют исследования, выполненные с помощью ЛДИС, механизма потери устойчивости и перехода к турбулентному режиму в течении Куэтта [4—6]. В связи с этим целесообразно использование ЛДИС для экспериментального изучения гидродинамической устойчивости на горизонтальной пластине [1—3].

Экспериментальная установка, на которой проводились исследования, состояла из гидродинамического стенда малой турбулентности с рабочим участком прямоугольного сечения с отношением высоты к ширине и длине $y : z : x = 1 : 3 : 33$, а также лазерного анемометра со специально разработанной электронно-измерительной аппаратурой [7]. Боковые стенки рабочего участка выполнены из качественного стекла, что позволяет применять различные оптические методы исследований, в частности ЛДИС. Диапазон рабочих скоростей стенда составляет 0,05—1,5 м/с. Размещение узлов ЛДИС на гидродинамическом стенде изображено схематически на рис. 1. Вдоль рабочего участка стенда 1 по двум направляющим 2 перемещается рабочая тележка 3. К этой тележке с помощью мощного координатного устройства 4 прикреплена специальная монтажная ферма 5, на которой размещены фотоприемник 6, фокусирующая линза 7, расщепитель луча 8 и поворотные призмы 9, 10. Призма полного отражения 11 закреплена неподвижно относительно рабочей тележки. Тележка имеет виброзащитную ходовую часть, позволяющую ей двигаться плавно и прямолинейно. Лазер 12 устанавливается отдельно на массивном виброзащитном основании таким образом, чтобы его луч попадал на призму 11 вне зависимости от местоположения тележки. Фотоприемник, фокусирующая линза и расщепитель луча установлены на специальных юстировочных устройствах 6, 13. Такое размещение оптических узлов дает возможность легко перемещать по трем координатам измерительный объем внутри рабочего участка без дополнительной юстировки ЛДИС. Размеры измерительного объема составляли $300 \times 30 \times 30$ мкм.

Выделение и обработка доплеровского сигнала выполняются способом дискретного измерения частоты, основанным на двухуровневой системе анализа. Сама электронная система обработки состоит из взаимосвязанных частей: блоков усиления и фильтрации (БУФ), дискретного

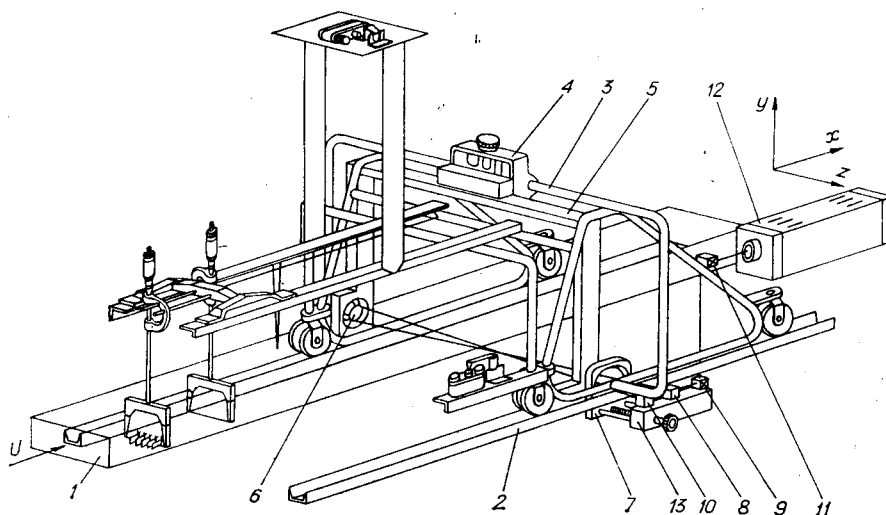


Рис. 1.

анализа (БДА), выделения аналогового сигнала (БВАС) и выходных устройств (БВУ). На входе БУФ установлен перестраиваемый вручную полосовой фильтр с небольшой добротностью ($\sim 2-3$) и широким диапазоном перестройки (от 10 кГц до 1 МГц). Коэффициент усиления БУФ порядка 100, а неравномерность амплитудно-частотной характеристики не больше 3 дБ. Отношение доплеровского сигнала к шуму на входе усилителя составляет 34—38 дБ, а уровень собственных шумов блока БУФ не превышает 20 мВ. Блок дискретного анализа вырабатывает строб-импульсы длительностью, равной продолжительности сигнала от каждой частицы, пролетающей через измерительный объем. Эти строб-импульсы управляют работой двух счетчиков, на один из которых поступают импульсы контрольного генератора, а на второй — сигнальная последовательность. Показания сигнального счетчика после остановки счета регистрируются цифрочечатающим устройством и представляют собой среднюю за время счета доплеровскую частоту. Счетная концентрация частиц (количество доплеровских «пачек» за секунду) достигала 2—4 тыс.

В БВАС для получения информации о «мгновенной» скорости использовалось преобразование кода сигнала реализации скорости в аналоговый сигнал с темпом до 500 преобразований в секунду. Перед записью на ленту светолучевого осциллографа этот сигнал пропусклся через интегратор. Расчет погрешности измерений, проведенный для аппаратуры дискретного анализа, показал, что относительная погрешность измерений средней скорости не превышает 1%, а «мгновенной» — 4%.

Для формирования возмущающего движения использовался механический вибратор кулачкового типа с гибкой вибрирующей лентой из бронзы толщиной 0,15, шириной 3 и длиной 150 мм, который описан в [1]. При выбранных размерах ленты синусоидальное возмущение, вносимое ею, искажено менее всего. Частота возмущающего движения регулировалась в пределах 0,01—10 Гц.

Вначале исследовалась зависимость величины амплитуды скорости возмущающего движения \bar{A} от местоположения вибрирующей ленты: $\bar{y}_v = y_v/\delta$. \bar{A} представляет собой отношение амплитуды колебаний скорости к средней скорости, полученное по осциллограммам. Измерения проводились на расстоянии 10—15 см от ленты вниз по потоку при $U_\infty = 0,11$ м/с. Амплитуда колебаний ленты A_v при этом выбрана около 0,8 мм, безразмерная частота $\beta_r v/U_\infty^2 = 350 \cdot 10^{-6}$, а число Рейнольдса $Re^* = 545$, что соответствует второй ветви нейтральной кривой [1, 2]. На ленту светолучевого осциллографа записывались одновременно выходной

сигнал ЛДИС, реализации скорости и колебания ленты вибратора. Для регистрации колебаний ленты применен индуктивный датчик. Исходя из результатов этих измерений для всех дальнейших опытов была выбрана амплитуда $A_n = 0,9$ мм, которая, с одной стороны, является достаточно малой, а с другой — обеспечивает хорошую наглядность записей протекающих процессов. По сравнению с [1] эта амплитуда несколько увеличена, но в то же время выдержано рекомендованное в [1] соотношение $v'/U_\infty \leq 0,02$, где v' — скорость возмущающего движения. Установлено, что при данной амплитуде еще не возникают нелинейные искажения вызванных синусоидальных возмущений. Все это позволило выбрать оптимальное положение вибрирующей ленты на высоте $\bar{y}_n = 0,15—0,3$ при оптимальной амплитуде ее колебаний 0,9 мм.

С целью проведения экспериментальной проверки теоретически предсказываемого изменения фазы возмущающих колебаний на 180° при переходе через критический слой [2, 8, 9] исследовано изменение фазы колебаний возмущающего движения (рис. 2, кривая 1) и его амплитуды (кривая 2) по толщине пограничного слоя при частоте колебаний ленты 0,8 Гц. Из этих рисунков видно, как изменяется фаза колебаний между точками $\bar{y} = 0,55$ и $\bar{y} = 0,6$. Эти результаты качественно хорошо согласуются с [1, 2, 5]. Так, по данным [1] «скачок» фазы происходит в слое $(0,3—0,8)\delta$, а по данным [5] — около $0,7\delta$. Небольшие расхождения могут быть обусловлены погрешностями при измерении δ и конкретными условиями эксперимента. По теории, вообще говоря, скачок фазы должен наблюдаться ниже, однако эксперименты этого не подтверждают. В целом изменение фазы — реально существующий факт, являющийся фундаментальным свойством гидродинамической устойчивости и подтверждаемый экспериментально.

Одним из основных результатов исследования течения на устойчивость является построение нейтральной кривой — графика в координатах безразмерной частоты $\beta_r v/U_\infty^2$ и числа Re^* , который как бы отделяет область, точки которой соответствуют неустойчивым колебаниям, от области устойчивых колебаний. Различные методы нахождения нейтральных кривых экспериментальным путем разработаны в работе [2] и детально описаны в [4].

Для построения точек, соответствующих нейтральной кривой, по данным, полученным с помощью ЛДИС, использовался следующий метод. При фиксированной величине U_∞ в нескольких сечениях (при разных x) проводились измерения зависимости относительной амплитуды продольной скорости возмущающего движения от частоты колебаний. Эти измерения показали, что для каждого x (числа Re^*) имеется определенная частота, которой соответствует максимальная амплитуда регистрируемых колебаний продольной скорости. На рис. 3 изображено семейство таких кривых в зависимости от координаты x : кривая 4 соответствует $x = 650$ мм от начала рабочего участка, 3 — 1150, 2 — 1650, 1 — 1870 мм. Из этого рисунка видно, что максимальное значение амплитуды скорости возмущающего движения смещается с увеличением x в более низкочастотную область. Этот результат совпадает с полученным в [1] для поперечных компонент скорости возмущающего движения. Вид этих кривых свидетельствует о том, что нарастание амплитуды колебаний происходит быстрее, чем их спад.

По этим зависимостям можно получить координаты второй ветви нейтральной кривой, которые соответствуют, как показано в [1], максимуму на этих зависимостях. Это соответствие объясняется тем, что при развитии возмущающего движения вниз по потоку от источника возмущений оно проходит всю зону внутри нейтральной кривой, т. е. зону с положительными коэффициентами усиления. Поэтому у границы этой зоны (второй ветви нейтральной кривой) итоговое усиление максимально. После перехода через нейтральную кривую возмущающее движение затухает, так как попадает в зону с отрицательными коэффициентами

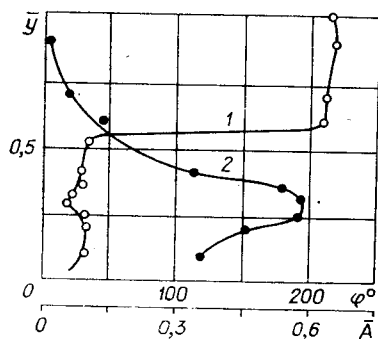


Рис. 2.

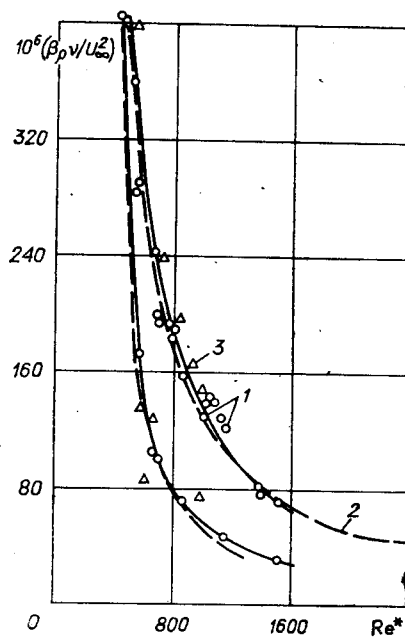
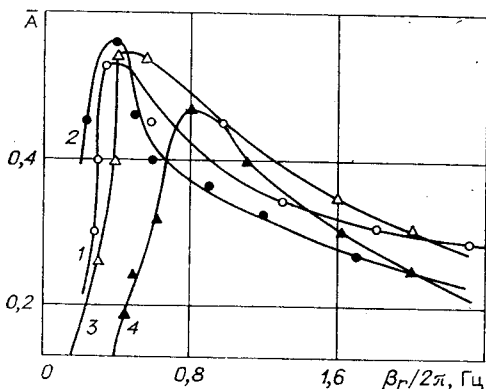


Рис. 4.

Рис. 3.

усиления. При больших значениях частоты это затухание более резкое.

Пользуясь данной методикой, были получены координаты нескольких точек второй ветви нейтральной кривой. Результаты представлены на рис. 4, где цифрой 1 обозначены результаты работы [1], 2 — работы [2], 3 — данные авторов. С помощью этого метода можно определить и координаты первой ветви нейтральной кривой, которые соответствуют минимуму на зависимостях амплитуды возмущающего движения от частоты. Начало подъема этой характеристики свидетельствует об усилении возмущающих колебаний, т. е. о вхождении в зону внутри нейтральной кривой (см. рис. 3). Координату минимума амплитудно-частотной зависимости невозможно определить с достаточной точностью, как, например, координату максимума, так как зона минимума широка и недостаточно четка. Это приводит к разбросу экспериментальных точек на первой ветви нейтральной кривой, что и наблюдается на рис. 4. Поэтому для построения первой ветви чаще используют другой метод, при котором исследуется поведение возмущающего колебания фиксированной частоты при перемещении точки измерения вдоль пластины относительно вибрирующей ленты. В данном случае этот метод не был опробован, так как вибратор и оптическая часть ЛДИС размещались на одной тележке и возможность их относительного перемещения была ограничена.

В целом, анализируя приведенные данные, можно сделать вывод о перспективности метода ЛДИС для исследования различных задач устойчивости, а также для изучения восприимчивости пограничного слоя к вносимым в него различным возмущениям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Козлов Л. Ф., Бабенко В. В. Экспериментальные исследования пограничного слоя.— Киев: Наукова думка, 1978.
2. Schubauer G. B., Skramstad H. K. Laminar Boundary Layer Oscillations and Stability of Laminar Flow.— J. Aeronaut. Sci., 1947, N 14, p. 69—81.

3. Бегцов Р., Криминале В. Вопросы гидродинамической устойчивости.— М.: Мир, 1974.
4. Gollub J. P., Freilich M. H. Optical Heterodyne Test of Perturbations for Taylor Instability.— Phys. Fluids, 1976, vol. 19, N 5.
5. Кузнецов Е. А. и др. О проблеме перехода к турбулентности в течении Куэтта.— Письма в ЖЭТФ, 1978, т. 30, вып. 4.
6. Василенко Ю. Г. и др. О зарождении вихрей Тейлора в течении Куэтта.— ПМТФ, 1980, № 2.
7. Иванов В. П. и др. Исследование поля скоростей в гидродинамическом стенде малой турбулентности с помощью лазерного доплеровского измерителя скорости.— ИФЖ, 1979, т. 37, № 5.
8. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя.— М.: Наука, 1969.
9. Schubauer G. B., Skramstad H. K. Laminar Boundary Layer Oscillations and Transition on a Flat Plate.— J. of Research of the National Bureau of Standards, 1947, vol. 38, N 2. p. 251—292.

Поступила в редакцию 26 января 1981 г.
