

5. Волков С. А., Зельвенский В. Ю., Сакодынский К. И., Фролов Ф. Я. Размывание хроматографических полос в колоннах большого диаметра.— Нефтехимия, 1972, т. 12, № 6.
6. Schwartz C. E., Smith I. M. Flow Distribution in Packed Beds.— Ind. Eng. Chem., 1953, vol. 45, N 6, p. 1209—1218.
7. Giddings I. C. Generalized Nonequilibrium Theory of Plate Height in Large — Scale Gas Chromatography.— J. Gas Chromatogr., 1963, vol. 1, N 4, p. 38—42.
8. Боннен А. Газожидкостная хроматография — промышленная технология очистки.— В кн.: Материалы симпозиума фирмы «Содетег» (Москва). Франция: изд. фирмы «Содетег», 1976.

*Поступила в редакцию 26 января 1981 г.;  
окончательный вариант — 9 октября 1981 г.*

УДК 532.57

В. В. БАБЕНКО, В. П. ИВАНОВ, Н. Ф. ЮРЧЕНКО  
(Киев)

### ИЗМЕРЕНИЕ ЛАЗЕРНЫМ АНЕМОМЕТРОМ ВОСПРИИМЧИВОСТИ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ К ПЛОСКИМ И ТРЕХМЕРНЫМ ВОЗМУЩЕНИЯМ

Практически во всех случаях внешнего и внутреннего течений жидкости имеет место воздействие на пограничный слой возмущений, поступающих из окружающей среды. Теоретическое изучение реакции пограничного слоя на такие возмущения чрезвычайно сложно, поэтому отправной точкой здесь должен служить эксперимент. Обладающие сложной формой реальные возмущения удобно представить комбинациями более простых волновых движений разного вида, частоты и амплитуды.

В связи с этим была поставлена задача экспериментального исследования восприимчивости пограничным слоем плоских и трехмерных возмущений конечной амплитуды, а также их комбинаций. Кроме изучения нестационарных процессов в жидкости, имеющих большое теоретическое и прикладное значение для решения вопросов, связанных с обтеканием реальных тел, разработанная методика позволяет определить физические закономерности и структуру пограничного слоя в различных его состояниях: ламинарном, переходном и турбулентном.

Исследования выполнялись на гидродинамическом стенде малой турбулентности ( $\varepsilon \leq 0,05\%$ ) в диапазоне скоростей 0,05—0,6 м/с [1] на съемном дне рабочего участка, которое может быть как плоским, так и вогнутым с кривизной  $1/R = 1; 0,25; 0,08$  1/м. Измерения проводились с помощью лазерного анемометра [2] и визуализации потока электрохимическим теллур-методом [1, 3]. Сочетание объемной визуализации течения с беззондовым измерением осредненной и пульсационной составляющих скорости дает полное представление о структуре пограничного слоя в различных его состояниях.

Схема рабочего участка стенда представлена в [1, 4]. Визуализация поля скоростей осуществляется при подаче напряжения на теллуровую проволоку — катод и расположенный ниже по течению анод, который выполнен в виде обтекаемых пластинок, прижатых к боковым стенкам канала. Для наблюдения поля течения в плоскости  $xz$  теллуровая проволока располагается вдоль оси  $z$  и может перемещаться по  $x$  вместе с подвижной тележкой, по  $y$  — при помощи микрометрического винта с точностью  $10^{-5}$  м, по  $z$  (при визуализации линий тока) — с точностью  $5 \times 10^{-4}$  м. Получение теллуровых струек для визуализации линий тока и профилей  $U(y)$  производится при ориентации теллуровой проволоки соот-

ветственно по  $x$  или  $y$ . Визуализированное поле скоростей регистрируется с помощью двух фотоаппаратов в плоскостях  $xu$  и  $xz$ . Конструкция фотоаппаратов позволяет делать непрерывную съемку 8—10 кадров при одном взводе затвора. Это дает возможность автоматически спускать затвор через необходимые промежутки времени и получать серии фотографий, характеризующих развитие течения вниз по потоку. Импульсы на задающего генератора через ключ поступали на спусковое устройство, которое включает электроклапан, подающий напряжение на теллуровую проволоку. В качестве задающего генератора использовался стандартный генератор прямоугольных импульсов Ф-590. Спусковым устройством являлось электромагнитное реле типа ПЭ-23, обмотка которого включена в коллекторную цепь транзистора ключевого устройства. Линия задержки была собрана на мультивибраторе с регулируемой длительностью импульса на выходе. Это позволяло получать импульсы длительностью 0,1 с для управления фотоаппаратами через электромагнит и длительностью 0,2—1,0 с для подачи на теллуровую проволоку; пауза между этими импульсами изменяется в пределах 0,1—1 с. Источник питания обеспечивал напряжение в диапазоне 20—60 В для подачи в непрерывном режиме на теллуровую проволоку при визуализации линий тока и 100—600 В в импульсном режиме при визуализации профилей скорости. Выбор режимов работы происходит с помощью ручек управления, собранных на единой коммутационной плате, которая установлена на подвижной тележке, благодаря чему можно оперативно и удобно проводить переключения при одновременном наблюдении поля течения.

Основные узлы лазерного анемометра также располагаются на подвижной тележке [2]. При этом реализована возможность перемещения и позиционирования измерительного объема по трем ортогональным осям. Методика обработки информации и используемая при этом аппаратура подробно описаны в работах [1, 2, 4].

Введение двумерных возмущений в пограничный слой осуществлялось с помощью колеблющейся ленты, которая может создавать как синусоидальную, так и несинусоидальную волну. Подробности изложены в монографии [1]. Возмущения вносились в области максимальных значений пульсационных скоростей по  $y$  с частотой, характерной для второй ветви нейтральной кривой диаграммы линейной устойчивости.

Были измерены профили осредненной (рис. 1, *a*) и пульсационной (рис. 1, *б*) составляющих скорости по оси рабочего участка ( $z=0$ ) при естественном развитии перехода (сплошные кривые) для  $x=2,48$  м и ряда значений  $U_\infty$ : 1—0,09; 2—0,12; 3—0,15; 4—0,18; 5—0,21; 6—0,27; 7—0,35; 8—0,4; 9—0,6 м/с. На этом рисунке профили Блазиуса обозначены штриховыми линиями. Координата  $x$  отсчитывалась от начала рабочего участка. Горизонтальной чертой на рис. 1 показаны в безразмерном виде положения ленты вибратора по толщине пограничного слоя. В семействе профилей при естественном развитии перехода (рис. 1, *a*) имеют место профили с явно выраженными перегибами (профили 3—5). Их появление связано с определенными этапами процесса перехода и отмечено в ряде экспериментальных работ [5—8]. Рис. 1, *б* дает представление о видоизменении пульсационных профилей с ростом числа Рейнольдса, начиная от ламинарного режима течения в пограничном слое до турбулентного, которому соответствует профиль 9 на рис. 1. Профили пульсационной составляющей, полученные для значений скорости вблизи  $U_\infty = 0,21$  м/с, т. е. для переходного режима течения, имеют два максимума по  $y$  и характеризуются значительно большими вели-

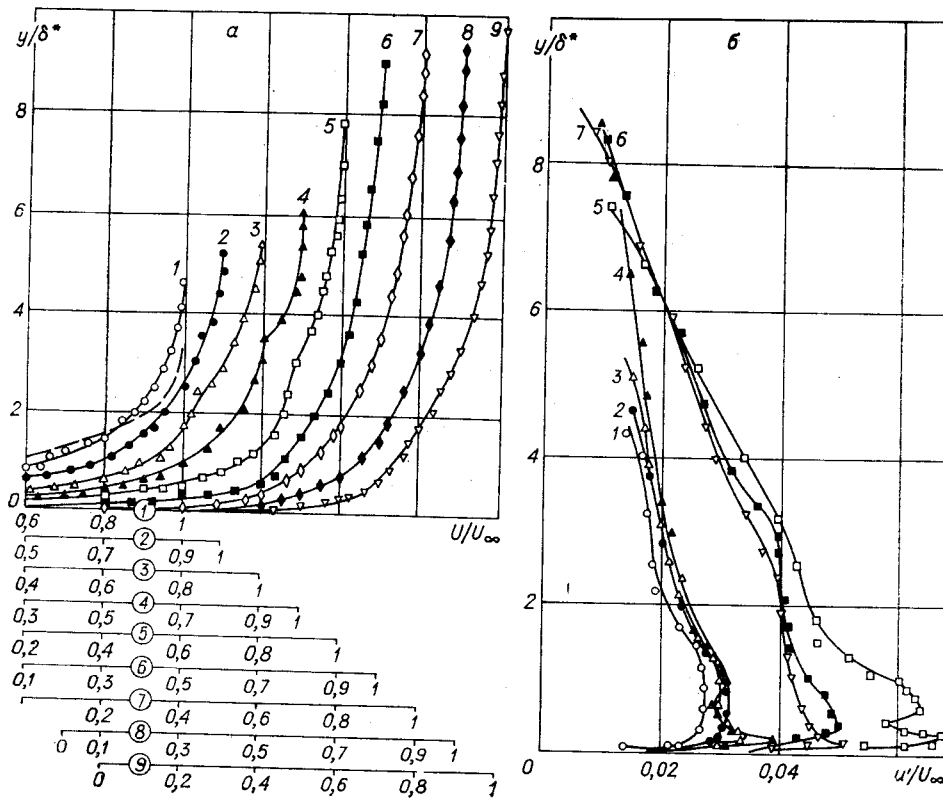


Рис. 1

чинами  $u'$ , что хорошо согласуется с экспериментальными результатами работы [7].

Результаты выполненных авторами измерений показывают, что наложение плоских возмущений конечной амплитуды приводит к ускорению процесса перехода на начальных его этапах. Это проявляется, во-первых, в увеличении толщины пограничного слоя, во-вторых, в появлении точек перегиба в профилях  $U/U_\infty(y/\delta^*)$  уже при  $U_\infty = 0,12$  м/с, в-третьих, в образовании двух максимумов в профилях  $u'/U_\infty(y/\delta^*)$  для  $U_\infty = 0,12$  м/с и, наконец, в формировании пульсационного профиля, типичного для турбулентного режима течения, начиная со скорости  $U_\infty = 0,21$  м/с. Реакция пограничного слоя на плоские возмущения, вносимые на последних этапах перехода и после перехода к турбулентности, приводит к противоположному эффекту: уменьшению максимумов пульсационных скоростей.

Точки перегиба в профилях осредненной составляющей скорости, а также двойные максимумы в профилях  $u'/U_\infty(y/\delta^*)$  свидетельствуют о нелинейном развитии плоских волн в процессе перехода [6, 7], приводящем к качественно новому структурному состоянию пограничного слоя — системе противоположно вращающихся продольных вихрей [8]. Стихийно возникающая такая система характеризуется различным масштабом вихрей и, следовательно, нерегулярностью распределения кинематических характеристик пограничного слоя в трансверсальном направлении [5, 8].

Организация «правильной», периодической структуры потока по  $z$  дает возможность проведения подробных и тщательных физических исследований механизма перехода, упрощает и уточняет измерения закономерностей развития такой структуры, а также позволяет выяснить реакцию пограничного слоя на трехмерные возмущения, вид которых определяется одним из этапов процесса перехода.

Системы продольных вихрей создавались механическим способом с помощью ряда вихреобразователей (см. [4]), устанавливаемых на месте колеблющейся ленты и представляющих собой вертикальные крылышки, закрепленные на тонких растянутых вдоль оси  $z$  нитях. В отличие от применявшихся ранее способов [9, 10] в данном случае использование вихреобразователей разных размеров, возможность тонкого перемещения их по  $y$  и изменения расстояния между ними позволяют легко и в достаточно широком диапазоне варьировать масштаб и интенсивность формируемых вихревых возмущений. Визуализация течения в плоскости  $xz$ , дающая представление о виде профилей скорости по оси  $z$ , и одновременное измерение осредненных и пульсационных значений скорости по  $y$  показали, что увеличение длины волны вихревой системы при постоянных прочих параметрах ведет к изменению формы вихрей и образованию дополнительных вихревых пар. Кроме того, для генерации «правильной» системы продольных вихрей существует оптимальная величина соотношения между длиной волны  $\lambda_z$ , или расстоянием между вихреобразователями, и эффективной высотой расположения их над поверхностью пластины  $y_0 = y_1/\delta_{cp}^*$ , где  $y_1$  — высота вихреобразователя, а  $\delta_{cp}^*$  — средняя по  $z$  толщина вытеснения. Эта величина находится в пределах  $\lambda_z/y_0 \approx 1,3-1,6$ .

На рис. 2 представлены профили осредненной и пульсационной продольных составляющих скорости в пограничном слое при возбуждении в нем вихревой системы с  $\lambda_z = 1,2 \cdot 10^{-2}$  м при  $U_\infty = 0,1; 0,2; 0,6$  м/с. Каждая группа профилей измерялась для трех значений  $z$ : I — за вихреобразователями,  $z = 0$  (линии тока внутри вихревой системы направлены вверх); II — между ними,  $z = \lambda_z/2$  (линии тока направлены вниз) и III — при  $z = \lambda_z/3$ . В левой части рисунков по вертикальной оси в безразмерном виде отложена эффективная высота вихреобразователя  $y_0$ .

Первая группа профилей (рис. 2, а) характеризует взаимодействие наложенного вихревого возмущения с возмущениями пограничного слоя на первом этапе процесса перехода, т. е. с плоскими волнами Толлинга — Шлихтинга. Другими словами, при этой скорости потока в данном месте в отсутствие какого-либо воздействия на пограничный слой наблюдаются плоские возмущения и начальная стадия их деформации по оси  $z$  (см. кривые 1, 2 на рис. 1). При наложении системы продольных вихрей на эти естественные возмущения по аналогии с наложением плоских волн можно считать, что результирующее поле скоростей (см. рис. 2, а, б) становится характерным для более поздних этапов перехода, т. е. смена этапов ускоряется. Сравнение профилей осредненных скоростей показывает, что I группа профилей (см. рис. 2, а) изменилась в большей степени, чем профили, полученные в том же канале при наложении плоских возмущений. Те же выводы следуют из анализа профилей пульсационной составляющей скорости. Так, наложение плоских возмущений при  $U_\infty = 0,12$  м/с (см. рис. 1, б, кривая 1) изменяет форму профиля таким образом, что она становится похожей на форму профиля, соответствующего  $U_\infty = 0,15-0,18$  м/с и этапу деформации волны вдоль оси  $z$ . Наложение продольной вихревой системы при  $U_\infty = 0,1$  м/с привело к формированию профиля (см. рис. 2, б, I группа кривых), подобного по виду профилю, полученному при естественном развитии перехода для скорости потока 0,27 м/с и наличии в пограничном слое развитой системы продольных вихрей. Это свидетельствует о том, что наложенное поле продольных вихревых возмущений либо подавляет естественные возмущения, либо ускоряет процесс перехода больше, чем наложенные плоские возмущения.

Вторая группа профилей показывает, что при скорости  $U_\infty = 0,2$  м/с происходит еще более интенсивное взаимодействие с пограничным слоем. Форма профилей здесь очень сильно зависит от координаты измерения  $z$ , и сравнение с соответствующими кривыми рис. 1, 2 свидетельствует о полностью развитой системе продольных вихрей [6]. Однако следует отметить уменьшение максимумов пульсационной скорости при наложении

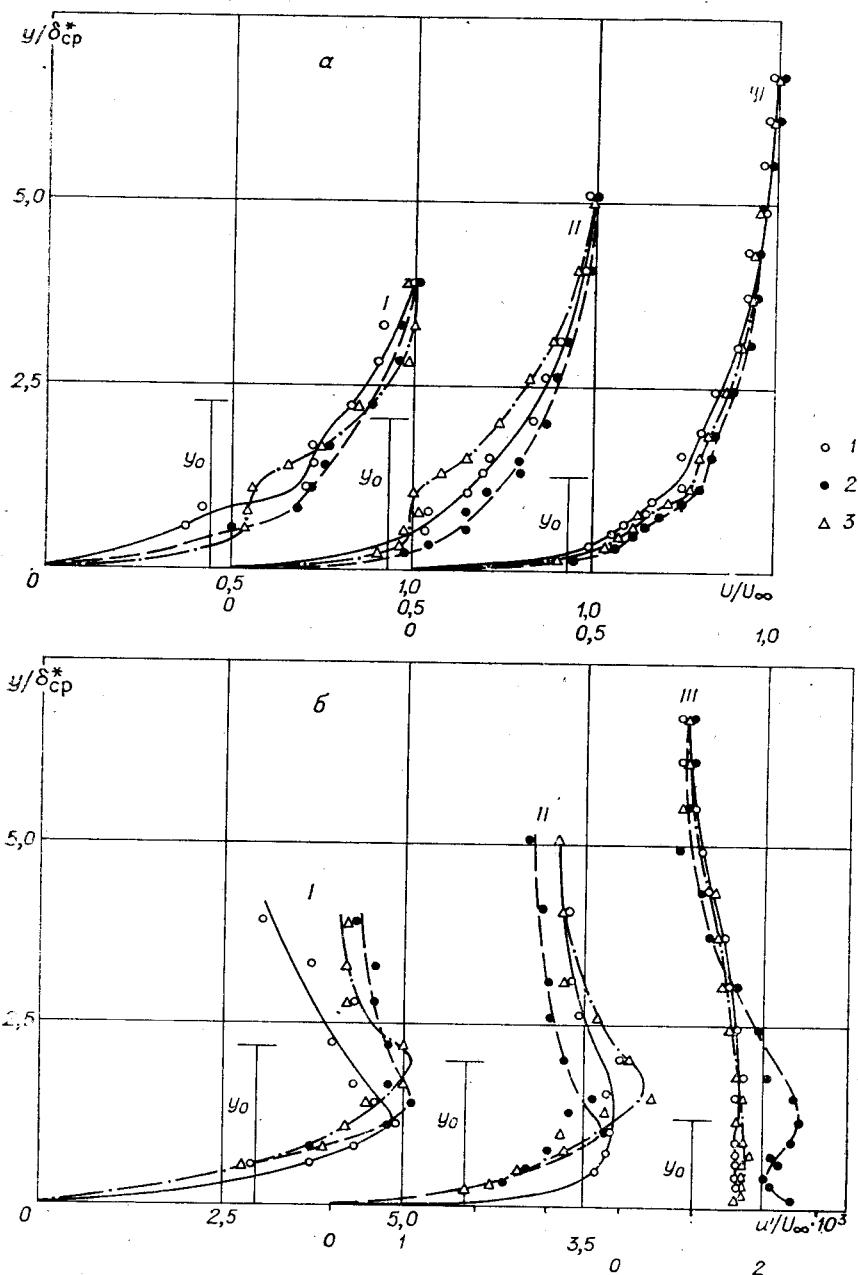


Рис. 2

системы продольных вихрей по сравнению с кривыми I и II группы рис. 2, б, что можно трактовать как некоторую реламинаризацию пограничного слоя. Для I и II групп (см. рис. 2, а) наиболее наполненные профили соответствуют положениям  $z = \lambda_z/2$ , где ускоренные частицы жидкости из верхних слоев пограничного слоя опускаются вниз, следуя по направленным к стенке линиям тока. На расстоянии  $\lambda_z/2$  от этого места, т. е. при  $z = 0$ , вращение вихрей создает поток замедленной жидкости от стенки вверх и профили скорости оказываются вогнутыми. В промежутке между двумя этими положениями по  $z$  профили имеют четко выраженную точку перегиба. Визуализация пограничного слоя в плоскости  $xz$  дает периодическую почти синусоидальную линию, амплитуда которой меняется в зависимости от расстояния от дна рабочего участка, что отражает форму

профиля  $U(z)$ . Увеличение  $\lambda_z$  приводит к искажению теллуровой линии, которое характеризуется провалами, т. е. уменьшением скорости, в местах  $z = 0$ , что говорит об изменении вихревой структуры. Третья группа профилей определяет взаимодействие системы продольных вихрей с полем скоростей турбулентного пограничного слоя. В отличие от плоских возмущений система продольных вихрей создает упорядоченность структуры даже в турбулентном течении, о чем свидетельствует появление точек перегиба в профилях осредненной скорости. Особенно интересен эффект воздействия вносимых трехмерных возмущений на пульсационные профили (см. рис. 2, б). По виду эти профили оказываются подобными кривым 1—3 рис. 1, соответствующим начальным этапам естественного перехода, при значительном уменьшении уровня пульсаций.

Вообще, внесение регулярных возмущений приводит к сглаживанию пульсационных профилей, т. е. меньшему изменению значений скорости по толщине пограничного слоя, причем воздействие вихревых возмущений оказывается более эффективным, поскольку оно меняет кинематические характеристики даже турбулентного пограничного слоя. При этом оба вида вносимых возмущений ускоряют переход на начальных этапах и оказывают реламинизирующее действие на последние этапы и развитый турбулентный пограничный слой. Выполненные исследования показали, что реакция пограничного слоя на вносимые возмущения носит резонансный характер. Это означает, что плоское возмущение эффективнее влияет на начальные этапы перехода, а трехмерное наиболее интенсивно взаимодействует с пограничным слоем, когда структура его при естественном переходе представляет собой развитую систему продольных вихрей.

Разработанная аппаратура и приспособления визуализации потока теллур-методом совместно с лазерным доплеровским измерителем скорости позволили с высокой степенью достоверности и наглядности исследовать физические особенности течения в пограничном слое.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Козлов Л. Ф., Бабенко В. В. Экспериментальные исследования пограничного слоя.— Киев: Наукова думка, 1978.
2. Иванов В. П., Бабенко В. В., Блохин В. А., Козлов Л. Ф., Коробов В. И. Исследование поля скоростей в гидродинамическом стенде малой турбулентности с помощью лазерного доплеровского измерителя скорости.— ИФЖ, 1979, т. 37, № 5.
3. Wortmann F. X. Eine Methode zur Beobachtung und Messung von Wasserströmung mit Tellur.— Z. für angew. Phys., 1953, Bd 5, S. 200—206.
4. Юрченко Н. Ф. Экспериментальное исследование системы продольных вихрей в пограничном слое.— ИФЖ, 1981, т. 41, № 6.
5. Klebanoff P. S., Tidstrom K. D., Sargent L. M. The Three-Dimensional Nature of Boundary Layer Instability.— J. Fluid Mech., 1962, vol. 12, pt. 1, p. 1—34.
6. Wortmann F. X. Visualisation of Transition.— J. Fluid Mech., 1969, vol. 38, pt. 3, p. 473—480.
7. Собстель Н. Б., Тэтянко В. А., Шарапова В. А., Штатнов Ю. В. К вопросу о формировании турбулентного пограничного слоя.— В кн.: Исследования по управлению пограничным слоем. Новосибирск: изд. Ин-та теплофизики СО АН СССР, 1976.
8. Юрченко Н. Ф., Бабенко В. В., Козлов Л. Ф. Экспериментальное исследование гертлеровской неустойчивости в пограничном слое.— В кн.: Стратифицированные и турбулентные течения. Киев: Наукова думка, 1979.
9. Bippes H., Görtler H. Dreidimensionale Störungen in der Einer ko Nkaven Wand.— Acta Mech., 1972, Bd 14, S. 251—267.
10. Komoda H. Nonlinear Development of Disturbance in a Laminar Boundary Layer.— Phys. Fluids, 1967, vol. 10, p. 11.

Поступила в редакцию 26 января 1982 г.