

УДК 532.516

РАЗВИТИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ КОНЕЧНОЙ АМПЛИТУДЫ В ТЕЧЕНИИ ПУАЗЕЙЛЯ

КОЗЛОВ В. В., РАМАЗАНОВ М. П.

В плоском канале с помощью визуализации исследован процесс трехмерного искажения первоначально двумерных возмущений. Впервые получены формы трехмерных образований на стадии развала двумерной волны. Показано, что эти образования имеют форму, идентичную Λ -образным вихрям в пограничном слое на плоской пластине, и их поперечный размер не зависит от скорости потока и частоты вводимых возмущений.

Процесс перехода ламинарного течения в турбулентное в канале, по-видимому, впервые экспериментально исследовался в [1]. Затем исследования были продолжены в работах [2—4], где отмечалось, что переход к турбулентности начинается с «внезапного» появления турбулентных пятен. В [5] путем снижения уровня турбулентности в канале до 0,3% удалось наблюдать достаточно регулярные синусоидальные возмущения, предшествующие переходу. В работах [6, 7] были получены результаты по развитию возмущений малой амплитуды, которые подтвердили выводы линейной теории гидродинамической устойчивости для течения Пуазейля. Исследования [6, 8, 9], проведенные для возмущений конечной амплитуды при докритических и сверхкритических числах Рейнольдса, указывали на наличие в данном течении периодических структур.

Настоящие исследования были проведены с целью выявления формы этих структур и выяснения процесса развала первоначально двумерной волны.

Течение в канале исследовалось на установке, описанной в работе [7]. Установка состоит из входного устройства и канала с рабочей секцией (см. фиг. 1 в работе [7]), помещенных в рабочую часть малотурбулентной аэродинамической трубы Т-324 ИТПМ СО АН СССР. Входное устройство было выполнено из органического стекла и служило для плавного втекания воздуха в канал. Канал, сопряженный с входным устройством, был сделан из органического стекла и имел размеры: длина — 4,5 м; ширина — 15 мм; высота — 400 мм. Благодаря большому поджатию на входе в канал (3 : 80) и малой степени турбулентности набегающего потока удалось получить степень турбулентности внутри канала порядка 0,1%. На расстоянии 3600 мм от входа в канал размещалась рабочая секция, в которой изучалось развитие вводимых искусственных возмущений. Так же, как в работе [6], возмущения вводились в поток по всей высоте с помощью металлической ленточки толщиной 0,05 мм и шириной 3 мм, удаленной от входа в канал на $X_0 = 3600$ мм. Ленточка помещалась в постоянное магнитное поле около одной из стенок канала на расстоянии $Y = 0,85$ мм. Через нее пропускался переменный ток с частотой, задаваемой генератором синусоидальных сигналов ГЗ-34. Частота контролировалась частотомером ЧЗ-34А. Число Рейнольдса определялось по максимальной скорости U_c в канале и его полуширине h . Центр канала принимался за $Y = 0$, координаты стенок канала были соответственно равны 1 и -1 . Эксперименты проводились в области чисел Рейнольдса от 2500 до 5000.

Как было показано в [7], при отсутствии возмущений в канале реализовывалось течение Пуазейля во всей области измерений.

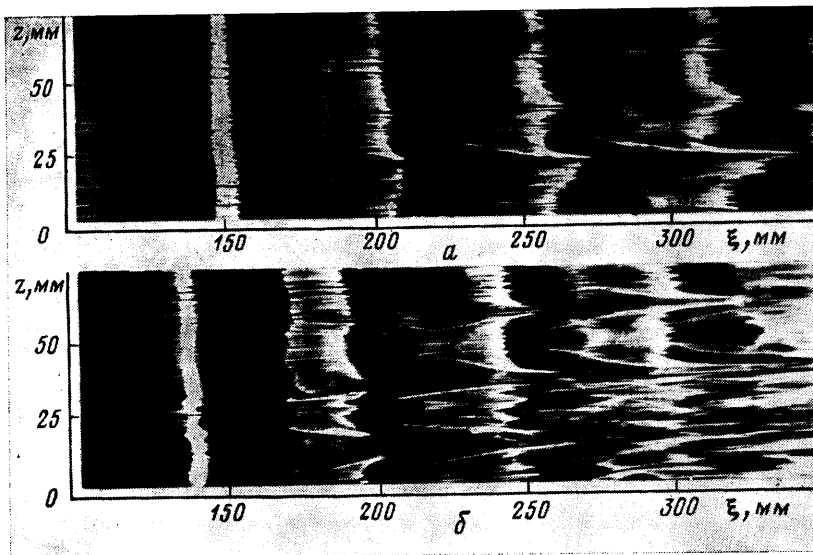
Структура течения в канале визуализировалась с использованием метода дымящей проволочки [10]. Суть метода заключается в том, что в потоке располагается достаточно тонкая металлическая нить, которая смазывается, например, машинным маслом, образующим множество капель на рабочем участке нити. При пропускании через нее электрического тока, масляные капли испаряются, образуя тонкие струйки аэрозольного «дыма», картина расположения которых дает представление о структуре течения.

В данной работе нить толщиной 68 мкм помещалась в канале параллельно длинной стенке. Постоянное напряжение, равное 20–25 В, подавалось на нить от источника питания ВС-26. Дымовая картина, возникающая при «сгорании» масляных капель, освещалась двумя лампами-вспышками, расположенными в конце канала и направленными по потоку, и снималась фотоаппаратом из окна рабочей части аэродинамической трубы сквозь одну из стенок канала. Таким образом получалась картина течения в $X-Z$ -плоскости. Вторая стенка канала предварительно зачернялась. Моменты включения напряжения и освещения канала были разнесены во времени с помощью линии задержки таким образом, чтобы к моменту вспышки дым успел распространиться на всю исследуемую область. Смазывание нити маслом производилось при помощи приспособления, описанного в [10]. Поскольку в момент нагревания нити происходит увеличение ее длины, для компенсации этого использовалась пружина, расположенная вне канала.

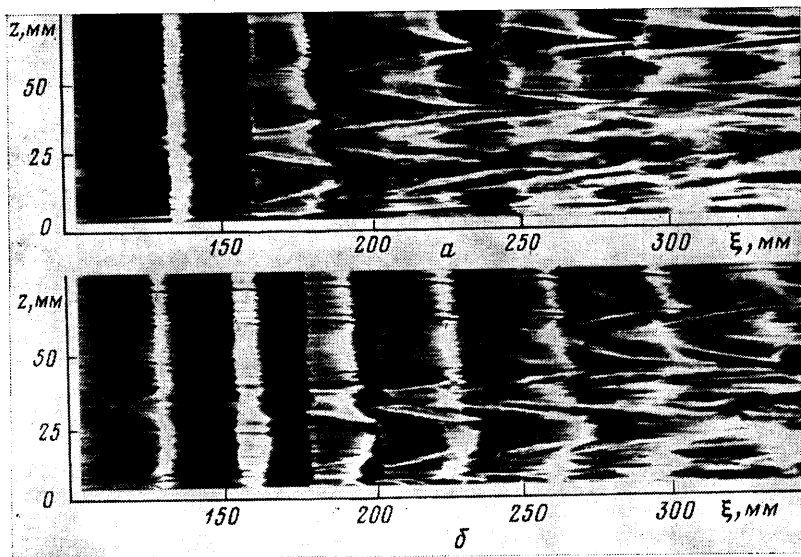
Дымящая проволочка располагалась в районе максимума возмущений скорости по оси y на расстоянии 2,2 мм ($y/h=0,29$) от стенки, что приблизительно соответствует положению критического слоя. Как было показано в работе [11], струйки дыма, введенные в поток в районе критического слоя, наиболее точно выделяют волновую структуру поля течения, а расстояние между скоплениями дыма достаточно точно совпадает с длиной волны.

На фиг. 1 изображен процесс трехмерного искажения первоначально плоского фронта волны на частоте $f=73$ Гц и $Re=3850$ при различных амплитудах возмущения u' : а) — $u'/U_c=1\%$; б) — $u'/U_c=1,36\%$. Амплитуда возмущений измерялась в районе минимума по z (см. фиг. 4 и работу [8]). Направление потока — слева направо, $\xi=x-x_0$ — расстояние от вибрирующей ленточки, $z=0$ соответствует середине канала. В левой части каждого снимка мы видим светлую полосу, представляющую собой скопление дыма, достаточно равномерное в направлении по z . Как было показано в работе [11], струйки дыма, распространяющиеся в потоке со скоростью волны, постепенно скапливаются в районах локального уменьшения скорости и начинают заворачиваться назад, образуя четко видимую широкую полосу. Когда же амплитуда возмущения достигает величины порядка 1%, в потоке начинают появляться попарно продольные вихри, т. е. струйки дыма, скапливаясь в районе максимальной завихренности, образуют две наклонные линии в форме греческой буквы Λ .

На верхнем снимке такой Λ -образный вихрь хорошо виден в районе $\xi=x-x_0=250-300$ мм. При увеличении амплитуды (фиг. 1, б) Λ -образный вихрь смещается на снимке влево. Следом за ним выстраивается цепочка таких же вихрей, расположенных строго друг за другом, рядом возникает вторая, а затем третья дорожка Λ -образных вихрей. Таким образом, процесс зарождения Λ -образных вихрей с увеличением амплитуды возмущения движется вверх по потоку и распространяется в поперечном направлении от центра канала к его периферии. Неодновременность возникновения вихрей в поперечном направлении связана с тем, что вибрирующая лента закреплена по краям и амплитуда ее колебаний максимальна в центре и уменьшается к краям. К тому же возмущения вводятся ленточкой около одной стенки, поэтому величины максимумов амплитуд



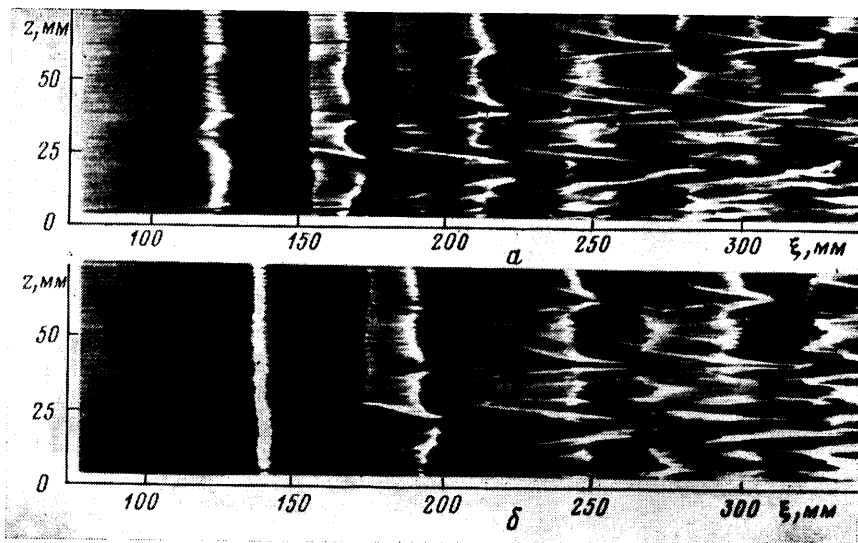
Фиг. 1



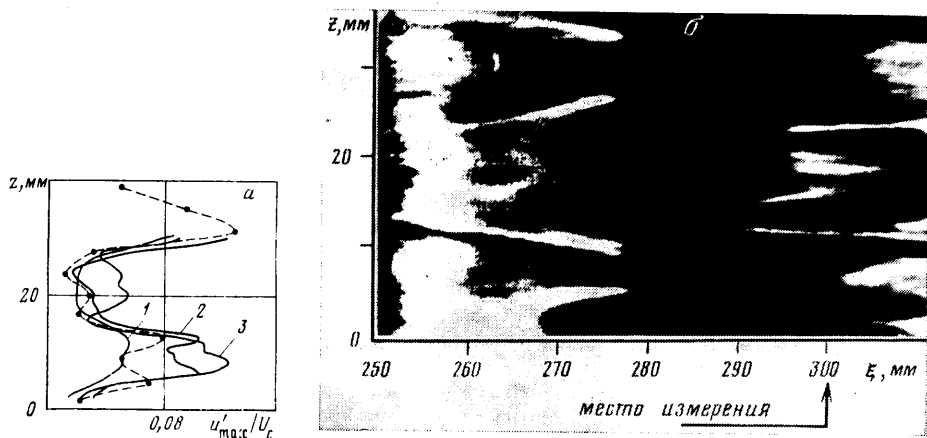
Фиг. 2

возмущений разные около разных стенок канала [7]. В работе [6] такая асимметрия тоже имела место и приводила к тому, что периодические во времени структуры возникали только у одной из стенок канала, а именно у стенки, где амплитуда возмущения была больше. В то же время у другой стенки фронт волны еще не искажался.

На рис. 2 изображен процесс образования Λ -образных вихрей для частот 90 Гц (а) и 120 Гц (б) при $Re=3850$. Интересно отметить, что, несмотря на значительное изменение длины волны, поперечный размер Λ -образных вихрей не изменяется и приблизительно равняется 23 мм. Не изменяется он и при увеличении амплитуды возмущения до определенной величины, в чем можно убедиться, вернувшись к фиг. 1. Изменение скорости потока тоже не приводит к изменению расположения дорожек Λ -образных вихрей. На фиг. 3 приведены фотографии поля течения для раз-



Фиг. 3



Фиг. 4'

личных чисел Рейнольдса, подтверждающие это. Частота вводимых возмущений $f=90$ Гц. Фотографии *a* соответствует $Re=3850$, *б* — $Re=4525$.

По-видимому, период по z является неким инвариантом, зависящим только от поперечных размеров канала и не зависящим от параметров потока. В работе [8] использовался канал с такими же размерами, что и в данной работе, и неравномерность возмущений потока в направлении по z для различных амплитуд колебаний ($1 - u'/U_c=6\%$, $2 - u'/U_c=10\%$, $3 - u'/U_c=13\%$), имела тот же период, что и в данной работе (см. фиг. 4, *a*, где изображено изменение интенсивности возмущения при $\xi = -x - x_0 = 300$ мм в зависимости от поперечной координаты z , измеренное в районе критического слоя при $y/h=0,29$; сплошная линия соответствует данным работы [8], а штриховая — данным настоящей работы). Здесь же приведена фотография поля течения в районе измерения (см. фиг. 4, *б*). Наблюдается хорошее соответствие визуализированной картины течения термоанемометрическим измерениям.

В заключение можно отметить, что переход к турбулентности в канале при введении двумерных возмущений происходит через механизм пространственного развития гидродинамических волн типа волн Толлмина —

Шлихтинга, их трехмерного искажения, образования Λ -образных вихрей и развала этих вихрей в турбулентность, т. е. таким же образом, как в пограничном слое на плоской пластине. Поперечный размер Λ -образного вихря является инвариантом, не зависящим ни от частоты, ни от параметров основного потока, а зависящим, по-видимому, только от поперечных размеров канала. При моделировании развития возмущений конечной амплитуды в канале следует принимать во внимание, что при амплитуде возмущения порядка 1% в течении появляются трехмерные структуры, для описания которых требуются адекватные модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Davies S. J., White C. M.* An experimental study of the flow of water in pipes of rectangular section.—Proc. Royal Soc., London, 1928, v. 119, № 781, p. 92–96.
2. *Sherlin G. C.* Behaviour of isolated disturbances superimposed on laminar flow in a rectangular pipe.—J. Res. Phys. and Chem., 1960, v. 64A, № 1, p. 281.
3. *Narayanan M. A. B., Narayana T.* Some studies on transition from laminar to turbulent flow in a two-dimensional channel.—Z. Angew. Math. und Phys., 1967, v. 18, № 5, p. 642–648.
4. *Patel V. C., Head M. R.* Some observation on skin friction and velocity profiles in fully developed pipe and channel flows.—J. Fluid Mech., 1969, № 1, p. 181–201.
5. *Karnitz M. A., Potter M. C., Smith M. C.* An experimental investigation of transition of a plane Poiseuille flow.—Trans. ASME J. Fluid Eng., 1974, v. 96, № 4, p. 384–388.
6. *Nishioka M., Iida S., Ichikawa Y.* An experimental investigation of the stability of plane Poiseuille flow.—J. Fluid Mech., 1975, v. 72, № 4, p. 731–751.
7. *Козлов В. В., Рамазанов М. П.* Экспериментальное исследование устойчивости течения Пуазейля.—Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук, 1981, № 8, вып. 2, с. 45–48.
8. *Nishioka M., Iida S., Asai M.* An experimental investigation of the secondary instability.—Laminar-Turbulent Transition Symp. Stuttgart, 1979. Berlin e. a., 1980, p. 34–46.
9. *Козлов В. В., Рамазанов М. П.* Экспериментальное исследование процесса развития возмущений в течении Пуазейля. Новосибирск, 1980, 14 с. Препринт Ин-та теор. и прикл. мех. СО АН СССР, № 21.
10. *Довгаль А. Р., Козлов В. В., Носырев И. П., Сарих В. С.* О методе визуализации структуры течения в пограничном слое. Новосибирск, 1981, 18 с. Препринт Ин-та теорет. и прикл. мех., СО АН СССР, № 37.
11. *Hama F. R.* Streaklines in a perturbed shear flow.—Phys. Fluids, 1962, v. 5, № 6, p. 644–650.

Новосибирск

Поступила в редакцию
18.III.1982