

УДК 532.517.3

© 1989

КОЛЯДА В. В., ПАВЕЛЬЕВ А. А.

ВЛИЯНИЕ ПЕРЕХОДА К ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА НАЧАЛЬНОМ УЧАСТКЕ КРУГЛОЙ ТРУБЫ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ПУЛЬСАЦИЙ СКОРОСТИ ВНЕ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

Течение на начальном участке труб и каналов характеризуется состоянием пограничного слоя на стенке, а также интенсивностью и масштабом турбулентности в ядре потока. Эти характеристики потока зависят от условий на входе в канал. В аэродинамических установках и технических устройствах начальные условия определяются параметрами турбулизующих или успокоительных решеток и хоней-комбов, степенью предварительного поджатия потока, характерной величиной шероховатости стенок и т. д. Однако влияние некоторых из перечисленных факторов на течение в пределах начального участка канала до сих пор недостаточно изучено.

Вызывает также интерес возможная связь между начальными условиями на входе в канал и автоколебательными режимами, которые могут возникать в аэродинамических установках [1, 2].

Цель данной работы — исследование влияния возмущений, вносимых путем создания локального уступа на поверхности стенки во входном сечении, на переход к турбулентности в пограничном слое в пределах начального участка круглой трубы. Особый интерес представляли пульсации скорости за пределами пограничного слоя.

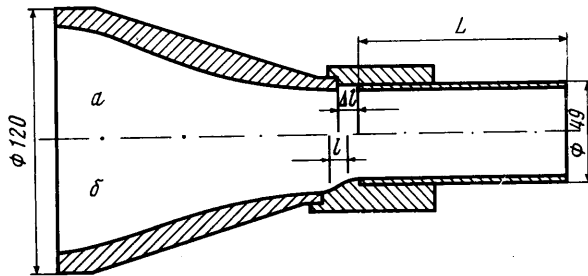
1. Эксперименты проводились на аэродинамической установке, предназначенной для изучения потоков в круглой трубе с естественным [3, 4] и искусственно сформированным [5] профилями скорости. Подача воздуха производилась от магистральной высокого давления, расход определялся по величине сверхкритического перепада давления на шайбе, установленной в системе подачи. Величина продольных пульсаций скорости в ядре исследуемого течения задавалась металлическими сетками, установленными на участке перед поджатием потока. Минимальное значение этих пульсаций на входе в трубу (\varnothing 49 мм) составляло 0,16%. Конфузор установки был выполнен в двух вариантах (фиг. 1). В случае *a* поджатие осуществлялось от диаметра 120 мм до диаметра трубы, которая пристыковывалась к выходу конфузора вплотную или с некоторым зазором Δl . При этом на входе в трубу образовывалась каверна длиной Δl и глубиной, равной толщине стенки трубы (2 мм). В дальнейшем, если это не оговаривается особо, имеется в виду использование конфузора, показанного на фиг. 1, *a* (конфузор 1), и случай $\Delta l=0$. Нарастание пограничного слоя на стенке конфузора давало эффективную добавку к длине трубы L около 16 см.

В другом варианте установки поджатие потока в конфузоре (далее конфузор 2) осуществлялось до диаметра 60 мм (фиг. 1, *b*). Для поджатия потока до диаметра 49 мм использовался дополнительный переходник, изменение сечения которого происходило на длине l .

Измерение продольной составляющей скорости потока $\langle U \rangle$ и среднеквадратичной величины ее пульсаций $\langle u \rangle$ производилось с помощью термоанемометра постоянной температуры 55М и аналоговой аппаратуры фирмы DISA. Датчик скорости 55Е30 с термокомпенсацией устанавливался на срезе трубы и перемещался в радиальном направлении y с помощью координатного устройства 52В01. Профили скорости и ее пульсаций записывались графопостроителями Н-306. Спектральный анализ пульсаций скорости осуществлялся анализатором спектра «Bruel & Kjaer 2131» с полосой разрешения $1/3$ октавы. За формой мгновенного сигнала термоанемометра можно было наблюдать на экране осциллографа С1-76.

В данных экспериментах число Рейнольдса $Re = \langle U_0 \rangle L / \nu$, где $\langle U_0 \rangle$ — скорость в ядре потока (измерялась на оси трубы), ν — кинематическая вязкость, варьировалось путем изменения расхода воздуха при $L = \text{const}$. В таких случаях для определения числа Re^* перехода к турбулентности

в пограничном слое используют метод, основанный на факте изменения формы профиля скорости при смене режимов течения в пограничном слое [6]. На фиг. 2 приведены профили скорости $u = \langle U \rangle / \langle U_0 \rangle$, полученные на срезе трубы длиной 411 см при $\langle U_0 \rangle = 16,7$ (1) и 17,8 м/с (2). Будем называть внутренней частью пограничного слоя область слева от точки пересечения этих профилей, первый из которых соответствует ламинарному, а второй — турбулентному режиму течения в пограничном слое. В известном способе определения числа Re^* используются два датчика скорости,



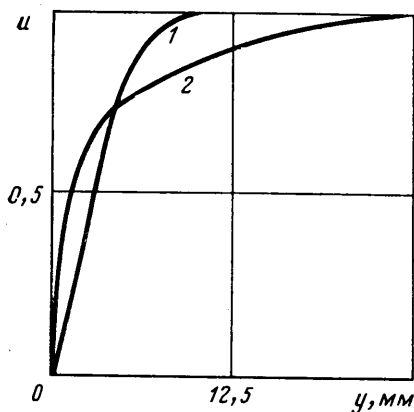
Фиг. 1

например две трубки Пито, одна из которых помещается во внутреннюю часть пограничного слоя, а другая — в ядро потока. Строится зависимость отношения скоростных напоров, измеренных этими трубками: $p' = p/p_0$, от показания p_0 трубки, находящейся в ядре потока, или от соответствующего значения $\langle U_0 \rangle$. При увеличении скорости потока, пока пограничный слой ламинарный, величина p' растет, так как толщина пограничного слоя уменьшается. Перемещаясь вверх по потоку, область перехода к турбулентности, начиная с некоторой скорости $\langle U_0^* \rangle$, оказывается выше того сечения, где установлены датчики скорости. Теперь при увеличении скорости зависимость $p'(p_0)$ начинает расти круче, так как относительная скорость во внутренней части пограничного слоя в турбулентном режиме выше, чем в ламинарном.

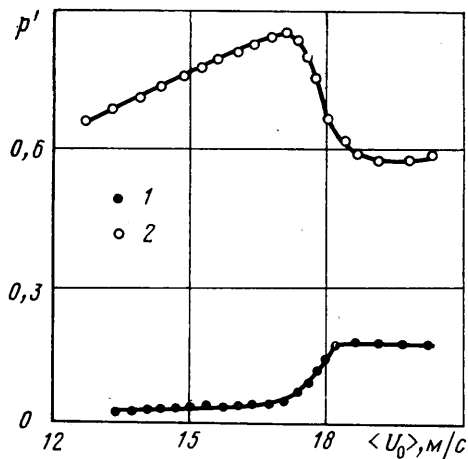
Недостатком этого способа является то, что в некоторых случаях изменение темпа роста зависимости $p'(p_0)$ происходит плавно и точное определение скорости $\langle U_0^* \rangle$ затруднено. Кроме того, помещение датчика скорости во внутреннюю часть пограничного слоя приводит к возмущению потока, а если толщина пограничного слоя сравнима с размером датчика, то из-за грубого пространственного осреднения величина скорости измеряется неточно.

В данной работе для определения Re^* был применен способ, отличающийся от указанного тем, что первый датчик скорости помещался во внешнюю часть пограничного слоя. На фиг. 2 это область между точкой пересечения ламинарного и турбулентного профилей скорости ($y = 4,5$ мм) и внешней границей ламинарного пограничного слоя ($y = 10$ мм). Способ основан на том факте, что темпы нарастания ламинарного и турбулентного пограничных слоев различаются. При увеличении скорости $\langle U_0 \rangle$ величина p' растет, пока пограничный слой ламинарный и его толщина с ростом $\langle U_0 \rangle$ уменьшается. Когда область перехода к турбулентности оказывается выше по течению, чем трубка Пито, эта трубка с увеличением $\langle U_0 \rangle$ начинает «погружаться» в турбулентный пограничный слой, толщина которого нарастает по продольной координате x быстрее, чем толщина ламинарного пограничного слоя. Величина p' начинает падать и, следовательно, при некотором значении скорости $\langle U_0^* \rangle$ она проходит через максимум. Эксперименты показали, что значения $\langle U_0^* \rangle$, определенные обоими способами, совпадают, что позволяет применить описанную процедуру для нахождения $Re^* = \langle U_0^* \rangle L / \nu$.

На фиг. 3 приведены зависимости величины p' от скорости на оси трубы длиной 411 см. Кривая 1 соответствует случаю, когда первая трубка



Фиг. 2



Фиг. 3

Пито находилась на расстоянии ~ 1 мм от стенки, кривая 2 — расстоянию ~ 5 мм от стенки. По четко выраженному максимуму кривой 2 можно определить значение $\langle U_0^* \rangle = 17,2$ м/с.

В случае тонкого пограничного слоя для измерения скорости потока во внешней его части целесообразно использовать более миниатюрный, чем трубка Пито, датчик термоанемометра. Наличие аналогового сигнала в принципе позволяет, используя ЭВМ, автоматизировать описанную процедуру определения Re^* или создать систему для поддержания заданного положения области перехода к турбулентности в пограничном слое.

2. Переход к турбулентности в пограничном слое на стенке трубы сопровождается увеличением интенсивности пульсаций скорости на ее оси [3]. Для объяснения этого эффекта высказано предположение, что, передвигаясь по мере увеличения $\langle U_0 \rangle$ вверх по потоку, точка начала перехода к турбулентности в пограничном слое пульсирует относительно каждого своего нового среднего положения [3]. При этом пульсирует и эффективное сечение трубы ниже по потоку от области перехода, и при каждом новом фиксированном значении $\langle U_0 \rangle$ это приводит к пульсациям скорости вне пограничного слоя. Из условия постоянства расхода

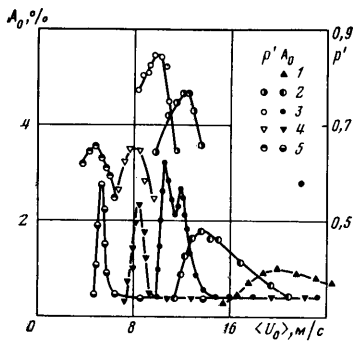
$$U_0 (r - \delta^*)^2 = U_p r^2 \quad (2.1)$$

где U_p — среднерасходная скорость потока в трубе, r — ее радиус, δ^* и U_0 — мгновенные значения толщины вытеснения пограничного слоя и скорости потока за его пределами, получаем связь между соответствующими малыми изменениями ΔU_0 и $\Delta \delta^*$, которая при $\delta^*/r \ll 1$ принимает вид

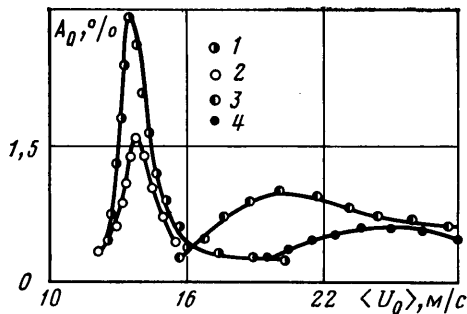
$$\frac{\Delta U_0}{U_0} = 2 \frac{\delta^*}{r} \frac{\Delta \delta^*}{\delta^*} \quad (2.2)$$

Таким образом, чем меньше относительная толщина пограничного слоя на стенке трубы, тем меньше пульсации скорости на ее оси, вызванные пульсациями величины δ^* .

Были измерены пульсации скорости на оси трубы $A_0 = \langle u \rangle / \langle U_0 \rangle$, сопровождающие переход к турбулентности в пограничном слое на ее стенке. В случае, когда длина трубы равна 50 см, уровень начальных возмущений на входе в трубу составлял $\epsilon_0 = 0,16\%$, а толщина вытеснения пограничного слоя на срезе трубы составляла ~ 1 мм. Максимальное значение A_0 достигало приблизительно $0,75\%$, а при $Re < 0,7 Re^*$ уровень пульсаций скорости на оси трубы составлял $0,11\%$. Приняв разность этих значений в качестве характерной амплитуды пульсаций скорости, вызванных пульсациями тол-



Фиг. 4



Фиг. 5

щины пограничного слоя в выходном сечении трубы, по соотношению (2.2) можно оценить характерную величину $\Delta\delta^*/\delta^*$, которая для условий данного эксперимента составила $\sim 9\%$.

Поскольку $\delta^*/r \ll 1$, в качестве зависимостей $\delta_i^*(x)$, $\delta_i^*(x)$, $\theta_i(x)$ и $\theta_i(x)$ (толщины вытеснения δ^* и толщины потери импульса θ от продольной координаты x для ламинарного и турбулентного пограничных слоев) можно принять соответствующие зависимости для плоской пластины и в этом предположении оценить величину пульсаций точки начала перехода к турбулентности x^* (согласно [7], в этой точке $\theta_i = \theta_i$), которым соответствует найденное значение $\Delta\delta^*/\delta^*$. Для условий данного эксперимента амплитуда пульсаций этой точки составляет $\sim 3,7$ см и $\Delta x^*/x^* = 8\%$.

Наблюдения за формой мгновенного сигнала термоанемометра показали, что увеличение уровня A_0 сопровождается появлением всплесков пульсаций скорости на оси трубы, причем по мере роста U_p промежутки между этими всплесками сокращаются. При помещении датчика термоанемометра внутри пограничного слоя также наблюдается картина «перемежаемости во времени» (по терминологии работы [8]), указывающая на то, что датчик, помещенный в пограничный слой, действительно время от времени оказывается в области с интенсивными пульсациями скорости.

В точках внутри пограничного слоя, где интенсивность пульсаций скорости максимальна, были получены спектры этих пульсаций. Оказалось, что в диапазоне чисел Re , в котором происходит рост величины A_0 ($0,8Re^* < Re < 1,07Re^*$), уже произошло сглаживание спектров пульсаций скорости, и лишь при $Re < 0,8Re^*$ в этих спектрах наблюдались выделенные частоты, соответствующие частотам колебаний, неустойчивых по линейной теории.

3. Для внесения возмущений в пограничный слой в данной работе использовалась каверна, создаваемая на входе в трубу. Регулирование длины каверны позволяло плавно менять величину вносимых возмущений и тем самым регулировать положение точки начала перехода к турбулентности. На фиг. 4 приведены зависимости пульсаций скорости на оси трубы длиной 50 см от скорости в той же точке, полученные при различной длине каверны. В этих экспериментах использовался конфузор 2, поджатие потока в переходнике происходило на длине $l=30$ мм. Приведены также зависимости $\rho'(\langle U_0 \rangle)$, полученные с помощью двух трубок Пито. Точкам 1 соответствует $\Delta l=0$ и $\Delta l=2$ мм, точкам 2 — $\Delta l=7$ мм, 3 — $\Delta l=10$ мм, 4 — $\Delta l=17$ мм и 5 — $\Delta l=27$ мм. Число Рейнольдса перехода к турбулентности в пограничном слое на стенке трубы уменьшается с ростом длины каверны, однако это влияние проявляется лишь при $\Delta l > 2$ мм, т. е. лишь тогда, когда длина каверны превышает ее глубину.

Интенсивность пульсаций скорости в ядре потока на входе в трубу во всех случаях лежала в пределах 0,35—0,40%.

Величина максимума пульсаций скорости на оси трубы возрастает с уменьшением числа Re^* и, следовательно, с увеличением относительной толщины пограничного слоя. Исключение составил случай $\Delta l=10$ мм, когда максимальная величина A_0 превысила 3%.

Рассмотрим теперь случай, когда каверны на входе в трубу не было ($\Delta l=0$), а менялась длина участка поджатия l . На фиг. 5 представлены пульсации скорости на оси труб длиной 50 см (точки 1 и 3) и длиной 26 см (точки 2 и 4). Длина переходника составляла 16 мм в случаях 1 и 2 и 30 мм в случаях 3 и 4. При резком поджатии потока в переходнике скорости $\langle U_0^* \rangle$ для труб обеих длин совпадают. Более того, при $L=90$ см переход к турбулентности происходит при том же значении $\langle U_0^* \rangle$. Это связано, по-видимому, с образованием интенсивных возмущений на уступе стенки переходника, которое происходит при определенной скорости потока и приводит к турбулизации всей области ниже по течению. После того как было выполнено сглаживание участка поджатия переходника, величина $\langle U_0^* \rangle$ возросла и стала зависеть от длины трубы (точки 3 и 4). При этом уменьшилось максимальное значение A_0 на оси трубы, что объясняется уменьшением толщины пограничного слоя. В обоих случаях пульсации на оси более длинной трубы выше, чем более короткой, что объясняется различной толщиной пограничного слоя.

4. Из полученных экспериментальных результатов следует, что переход к турбулентности в пограничном слое на стенке трубы в пределах ее начального участка сопровождается повышением интенсивности пульсаций скорости вне пограничного слоя, и, в частности, на оси трубы, причем при $Re > Re^*$ величина пульсаций скорости может вновь уменьшиться до уровня, существовавшего при $Re < Re^*$. Максимальная интенсивность пульсаций скорости в ядре потока пропорциональна относительной толщине пограничного слоя и может достигать величины 3—4%. Указанный эффект наблюдался в диапазоне уровня начальных возмущений от 0,16 до нескольких процентов.

Возникновение пульсаций скорости на оси трубы связано с пульсациями точки перехода к турбулентности в пограничном слое вблизи своего среднего положения как следствие пульсаций толщины пограничного слоя в данном сечении трубы при постоянном значении расхода. Внесение возмущений путем создания уступа на стенке канала (в одном случае — каверна, в другом — резкое сужение канала) позволяет управлять положением области перехода к турбулентности в пограничном слое на его стенке и амплитудой пульсаций скорости на оси канала, сопровождающих этот переход.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зосимов А. В. Акустический метод управления пульсациями скорости и давления в аэродинамических трубах с открытой рабочей частью // Тр. ЦАГИ. 1986. Вып. 2292. 38 с.
2. Боярчикова М. Ю., Власов Е. В., Гиневский А. С., Зосимов А. В. Подавление автоколебаний в аэродинамических трубах с открытой рабочей частью // Изв. АН СССР. МЖГ. 1982. № 1. С. 126—132.
3. Коляда В. В., Павельев А. А. О переходе к турбулентности на начальном участке круглой трубы // Изв. АН СССР. МЖГ. 1985. № 4. С. 52—56.
4. Коляда В. В., Павельев А. А. О смене механизмов перехода к турбулентности в пограничном слое // Изв. АН СССР. МЖГ. 1986. № 3. С. 179—181.
5. Коляда В. В., Павельев А. А. Влияние профиля скорости на входе в круглую трубу на переход к турбулентности // Изв. АН СССР. МЖГ. 1986. № 4. С. 166.
6. Abu-Channat B. J., Shaw R. Natural transition of boundary layers — the effects of turbulence, pressure gradient and flow history // J. Mech. Eng. Sci. 1980. V. 22. № 5. P. 213—228.
7. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя: Пер. с нем. М.: Наука, 1969. 742 с.
8. Качанов Ю. С., Козлов В. В., Левченко В. Я. Возникновение турбулентности в пограничном слое. Новосибирск: Наука, 1982. 151 с.

Москва

Поступила в редакцию
3.XI.1988