

УДК 532.517.3

© 2006 г. А. А. ПАВЕЛЬЕВ, А. И. РЕШМИН, В. В. ТРИФОНОВ

**ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ НАЧАЛЬНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ  
НА РЕЖИМ УСТАНОВИВШЕГОСЯ ТЕЧЕНИЯ В ТРУБЕ**

Экспериментально исследовалось влияние способа формирования течения на входе на режим установившегося течения в круглой трубе. Для заданного способа формирования течения на входе в трубу определялось такое число  $Re^*$ , при котором происходила смена ламинарного установившегося течения на турбулентное. При уменьшении числа Рейнольдса различие между коэффициентами сопротивления для ламинарного и турбулентного течения уменьшается. При числе Рейнольдса, равном приблизительно 1000, коэффициенты сопротивления, определенные по формуле Гагена-Пуазейля для ламинарного установившегося течения, и по формуле Прандтля для установившегося турбулентного течения, равны. Поэтому можно предположить, что при  $Re < 1000$  установившееся течение в трубе может быть только ламинарным, и говорить о смене режимов для установившегося течения в круглой трубе в этом случае не имеет смысла.

Опубликованные ранее результаты [1–9] показывают, что число Рейнольдса, при котором ламинарное установившееся течение сменяется турбулентным, уменьшается при увеличении интенсивности пульсационного движения на входе в трубу. Однако при самых больших экспериментально реализованных интенсивностях пульсационного движения на входе в трубу турбулентное течение наблюдалось только при числах Рейнольдса больших некоторого значения. Это значение, определенное в различных экспериментах, изменялось в диапазоне 1900–2320 [10]. Несмотря на этот разброс, считалось, что в экспериментах определялось так называемое нижнее критическое число Рейнольдса, под которым подразумевалось такое число Рейнольдса, при значениях, выше которого может наблюдаться турбулентное течение, а при значениях, ниже которого при любых возмущениях на входе можно наблюдать только установившееся ламинарное течение. Значения  $Re^*$ , полученные в данной работе, отличаются от нижнего критического числа Рейнольдса тем, что определялись при заданных (а не при любых) способах формирования потока на входе.

В данной работе экспериментально показано, что значения  $Re^*$  зависят не только от интенсивности пульсационного движения на входе в трубу, но и от структуры пульсационного движения. Этот результат позволяет предположить, что в проводившихся ранее экспериментах определялось значение  $Re^*$ , а разброс этих значений связан с тем, что структура пульсационных движений на входе в трубу была в этих экспериментах различной.

Полученные к настоящему времени экспериментальные данные не позволяют ни определить значение нижнего критического числа Рейнольдса, ни утверждать, что такое число Рейнольдса для трубы вообще существует.

*Ключевые слова:* число Рейнольдса, турбулентное течение, ламинарное течение, переход к турбулентности в трубе, эксперимент.

Течение в круглой трубе является наиболее простым по геометрии границ и наиболее часто встречающимся в технических устройствах. Поэтому это течение привлекает к себе постоянное внимание исследователей [1–9]. Однако существуют серьезные проблемы, которые требуют дальнейших исследований как экспериментальных, так и теоретических. В частности, эти проблемы относятся к течению в трубе при числах Рейнольдса в диапазоне от 1000 до 2300. Значения числа Рейнольдса внутри этого диапазона приводились в литературе [1, 10] как значения нижнего критического числа Рейнольдса, т.е. такого числа Рейнольдса, ниже которого “любые возмущения как бы

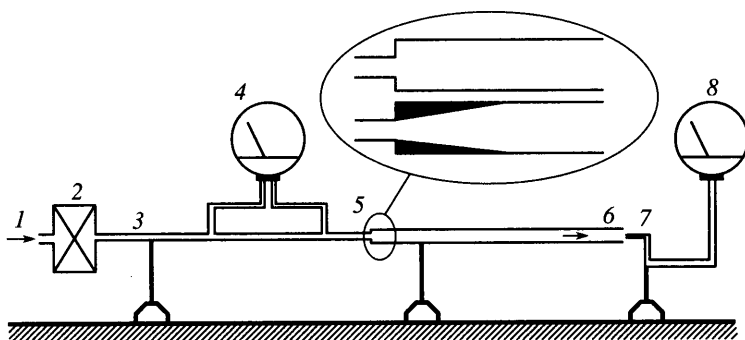
интенсивны они ни были, будут затухать” [10]. В [10] отмечается также, что “в опытах Рейнольдса минимальное критическое число Рейнольдса оказалось равным приблизительно 2300. Близкие значения (лежащие в пределах от 1900 до 2320) были получены всеми последующими исследователями”. В [11] понятие нижнего критического числа Рейнольдса не вводится, а отмечается только, что если условия притечения в разные трубы хорошо совпадают, то совпадают и числа Рейнольдса, при которых ламинарное установившееся течение в трубе меняется на турбулентное течение.

Оставался открытым вопрос о причинах разброса приводимых различными авторами значений так называемого нижнего критического числа Рейнольдса.

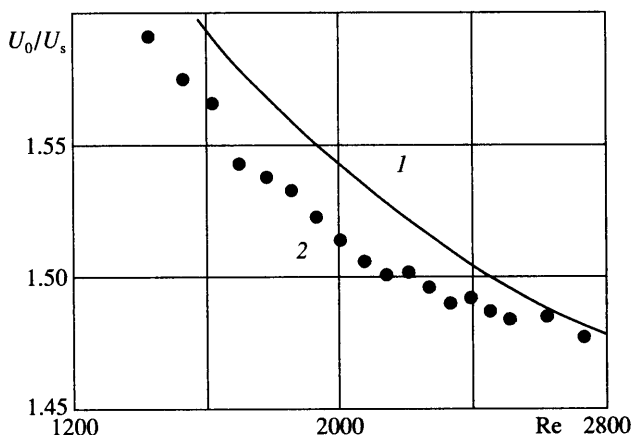
В работах [8, 9] проведено расчетные и экспериментальные исследования с целью определения нижнего значения числа Рейнольдса, при котором для заданных условий на входе профиль скорости вдали от входа отличался от профиля скорости, характерного для установившегося ламинарного течения в трубе, т.е. такого числа Рейнольдса, при котором происходит смена установившегося ламинарного течения на турбулентное ( $Re^*$ ). Подчеркнем, что  $Re^*$  отличается от нижнего критического числа Рейнольдса, так как определяет смену ламинарного установившегося течения на турбулентное течение при заданных, а не при любых условиях на входе. В [9] экспериментальное исследование проводилось при подаче воздуха в трубу через сопло, которое использовалось в тарировочном устройстве термоанемометра фирмы DISA для формирования потока с постоянной скоростью и низким уровнем пульсаций. Диаметр сопла, через которое газ подавался в трубу, можно было менять с помощью установки различных сопловых вставок. Увеличение отношения диаметра исследуемой трубы к диаметру сопла слабо влияло на значение  $Re^*$ . В [9] было также исследовано течение при внезапном расширении на входе в исследуемую трубу, когда поперек потока с профилем Пуазейля устанавливался цилиндрический стержень, диаметр которого был в 10–20 раз меньше диаметра трубы. В этом случае вдали от стержня также формировалось течение с профилем Пуазейля, но при заметно меньшем, чем без стержня, значении  $Re^*$ . В [9] было сделано предположение о зависимости  $Re^*$  от структуры возмущений на входе в исследуемую трубу.

В данной работе были выполнены эксперименты, в которых изменялась структура начальных возмущений в потоке, что позволяло проверить сделанное предположение. В проведенных экспериментах воздух подавался в трубу через соосно расположенную трубку меньшего диаметра, длина которой выбиралась таким образом, чтобы на ее выходе реализовалось установившееся турбулентное течение. За выходным сечением трубки происходило внезапное расширение площади канала. Был также исследован другой способ подачи газа, когда между подводящей трубкой и исследуемой трубой устанавливался безотрывный диффузор. В этом случае характеристики возмущений на входе в исследуемую трубу определялись условиями в выходном сечении диффузора.

**1. Экспериментальная установка.** Эксперименты по исследованию влияния структуры возмущений на входе в исследуемую трубу проводились на установке, схема которой представлена на фиг. 1. Воздух из магистрали высокого давления 1 поступал через редукционный клапан 2 в подающую трубку 3. В подающей трубке формируется установившееся турбулентное течение и измеряется перепад давления для определения расхода воздуха. В работе использовались подающие трубки диаметром 4 или 6 мм. Число Рейнольдса в подающей трубке превышало число Рейнольдса в исследуемой трубе во столько раз, во сколько диаметр исследуемой трубы превышал диаметр подающей трубки. Если исследование течения в рабочей трубе проводилось при числах Рейнольдса больших 1500, то в подающей трубке диаметром 6 мм число Рейнольдса было больше 2500, что достаточно для реализации установившегося турбулентного режима течения. Длина подающей трубки составляла примерно 250 ее диаметров. При турбулентном режиме течения половины этой длины достаточно для формирования потока с установившимися параметрами. В конце падающей трубки на участке длиной 100 диаметров наклонным манометром 4 измерялся перепад давления. Из подающей



Фиг. 1. Схема экспериментальной установки

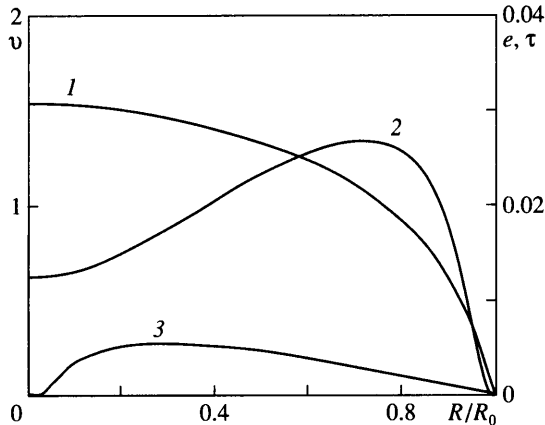


Фиг. 2. Зависимость отношения скорости на оси  $U_0$  к среднерасходной скорости  $U_s$  на выходе из диффузора от числа Рейнольдса  $Re$ : 1 – расчет по трехпараметрической модели; 2 – эксперимент

трубки через переходное устройство 5 воздух поступал в соосно расположенную исследуемую трубу 6 диаметром 10 мм. В центре выходного сечения исследуемой трубы с помощью трубки полного напора 7 и наклонного манометра 8 измерялась скорость воздуха. Исследования проводились при различных длинах исследуемой трубы. Максимальная длина трубы была равна 3 м.

Использовались два типа переходных устройств. В одном случае за подающей трубкой происходило внезапное расширение канала до диаметра исследуемой трубы. В другом случае после подающей трубки устанавливался диффузор длиной 420 мм. Диаметр подающей трубки и входной диаметр диффузора были равны 6 мм. Выходной диаметр диффузора был равен 10 мм. Поскольку на выходе подающей трубки реализуется установившееся турбулентное течение, характеристики которого известны, данные эксперименты могут быть воспроизведены, а для теоретического анализа могут быть сформулированы граничные условия.

**2. Экспериментальные результаты.** На фиг. 2 приведены зависимости скорости на оси в выходном сечении диффузора от числа Рейнольдса, определенные экспериментально и рассчитанные с помощью трехпараметрической модели в приближении пограничного слоя [8]. Удовлетворительное согласие экспериментальных и расчетных ре-

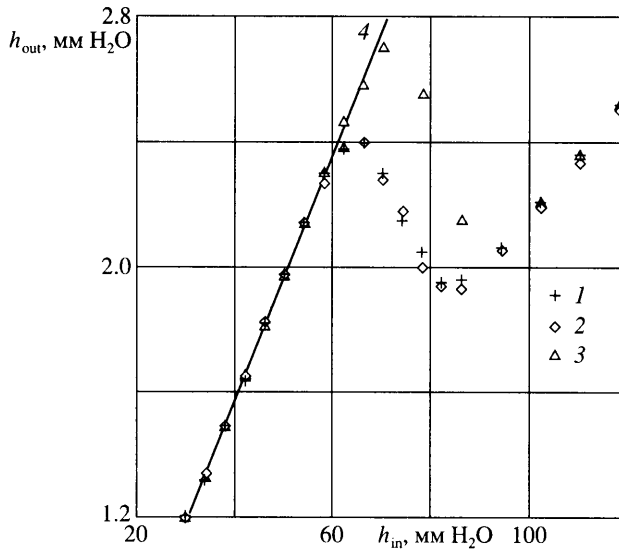


Фиг. 3. Расчетные зависимости скорости  $v = U/U_s$  (1), энергии турбулентности  $e = E/U_s^2$  (2) и турбулентного напряжения сдвига  $\tau = -\overline{u'v'}/U_s^2$  (3) от радиуса  $R/R_0$  на выходе из диффузора,  $R_0$  – радиус диффузора на выходе,  $Re = 2000$

ультатов показывает, что в диффузоре реализуется безотрывное течение и расчет адекватно описывает течение в диффузоре. Результаты проводимых по этой методике расчетов течений как с отрицательным, так и с положительным градиентом давления согласуются с экспериментом [12] и с результатами прямого численного моделирования [13]. Результаты расчетов, приведенные на фиг. 3, показывают, что на выходе из диффузора и соответственно на входе в трубу максимальная интенсивность пульсаций скорости ( $E^{0.5}/U_s$ ) равна приблизительно 0.15, а напряжения сдвига отличны от нуля. Можно предположить, что при внезапном расширении интенсивность пульсаций скорости на входе в трубу значительно выше, чем в случае использования диффузора. Это предположение связано с тем, что при внезапном расширении максимальная скорость на входе в трубу в несколько раз превышает среднерасходную скорость.

Зависимости полного напора на оси в выходном сечении исследуемой трубы от перепада давления в подающей трубке (фиг. 4), получены как при внезапном расширении, так и при установке диффузора на входе в трубу. На графиках можно выделить три характерных участка, которые соответствуют установившимся ламинарному и турбулентному режимам течения, а также переходному между ними режиму. Последний характеризуется наличием перемежаемости и зависит от длины трубы. Показания манометра трубки полного напора в области перехода колеблются и на фиг. 4 на переходном участке приведены средние значения измеряемого давления. На ламинарном и турбулентном участках эти колебания отсутствуют. При длинах исследуемой трубы 2 и 3 м значения перепада давления, при которых значения скорости на оси исследуемой трубы отклоняются от величин, характерных для установившегося ламинарного течения, не различаются между собой. Поэтому трубы большей длины не использовались.

Данные, приведенные на фиг. 4, показывают, что отклонение от установившегося ламинарного течения при установке на входе диффузора происходит при меньших числах Рейнольдса, чем при внезапном расширении канала на входе. Этот результат виден непосредственно из результатов эксперимента и не зависит от способа определения параметров, при которых происходит отклонение. От этого способа могут зависеть только численные значения параметров, при которых такое отклонение происходит.



Фиг. 4. Зависимость полного напора  $h_{out}$  от перепада давления в подающей трубке  $h_{in}$ : 1, 2 – диффузор,  $L = 2, 3$  м; 3 – внезапное расширение,  $L = 2$  м; 4 – аппроксимирующая функция

Зависимость  $h_{out}$  от  $h_{in}$  на ламинарном участке может быть аппроксимирована линейной функцией.

$$h_{out} = ch_{in} \quad (2.1)$$

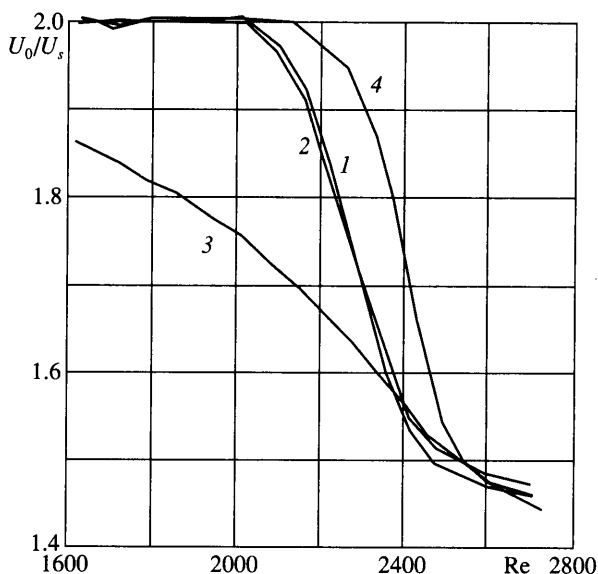
Здесь  $c$  – экспериментальная константа, определяемая при условиях, в которых проводился эксперимент. Эта функция также приведена на фиг. 4. Величина среднеквадратичного отклонения экспериментальных точек от аппроксимирующей линейной функции составляет 0.7%. Аппроксимирующая функция использовалась для оценки средней скорости в исследуемой трубе при заданном перепаде давления в подающей трубке.

Перепад давления, при котором экспериментальная зависимость полного напора от перепада давления в подающей трубке отклоняется от (2.1), определяет число Рейнольдса, ниже которого при заданных условиях на входе в трубе реализуется установившееся ламинарное течение. При более высоких числах Рейнольдса в трубе появляются турбулентные пробки, развитие которых по длине приводит к реализации в трубе установившегося турбулентного течения. Диапазон чисел Рейнольдса, в котором на выходе из трубы наблюдается переходный режим течения, уменьшается при увеличении длины трубы.

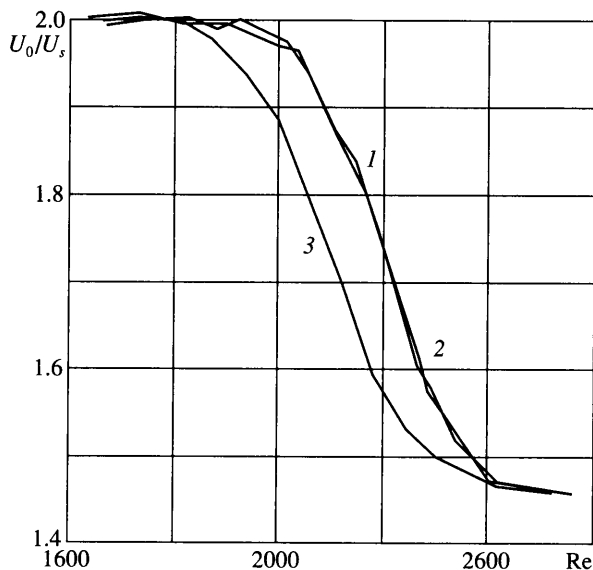
В данной работе за число Рейнольдса, определяющее смену режимов установившегося течения, принимается число Рейнольдса  $Re^*$ , при котором отношение скорости на оси к среднерасходной скорости отклоняется от значения, характерного для установившегося ламинарного течения и равного двум.

Средняя скорость в исследуемой трубе и соответственно число Рейнольдса определялись с помощью аппроксимирующей функции (2.1), которая позволяет при заданном перепаде давления в подающей трубке определить скорость на оси исследуемой трубы.

При использовании аппроксимирующей функции (2.1) как средства измерения расхода по перепаду давления можно представить результаты экспериментов в виде зависимости отношения скорости на оси к среднерасходной скорости ( $U_0/U_s$ ) от числа Рей-



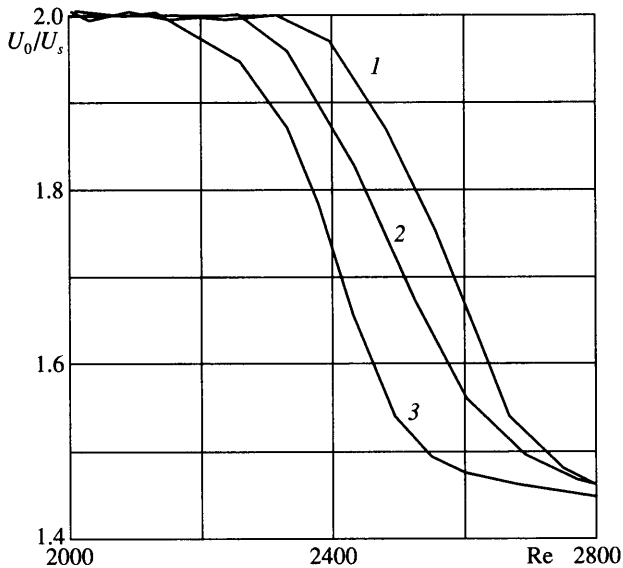
Фиг. 5. Зависимость  $U_0/U_s$  от  $Re$ : 1–3 – диффузор,  $L = 3, 2, 0,6$  м; 4 – внезапное расширение  $L = 2$  м



Фиг. 6. Зависимость  $U_0/U_s$  от  $Re$  при различных условиях на входе в трубу  $D = 10$  мм,  $L = 2$  м: 1, 2 – внезапное расширение,  $d = 4, 6$  мм; 3 – диффузор,  $d = 6$  мм

нольдса, построенного по диаметру трубы и среднерасходной скорости ( $Re$ ). Такие зависимости при различных условиях проведения экспериментов приведены на фиг. 5 и 6.

На фиг. 7 приведены зависимости  $U_0/U_s$  от  $Re$  при подаче воздуха в исследуемую трубу через сопловую вставку с диаметром отверстия меньше диаметра рабочей трубы [9]. Отношения диаметра исследуемой трубы к диаметру сопла, через которые газ подавал-



Фиг. 7. Зависимость  $U_0/U_s$  от  $Re$  при внезапном расширении на входе и различных способах формирования потока перед внезапным расширением: 1, 2 – сопловая вставка,  $(D/d_c)^2 = 5.2, 26.2$ ,  $d_c$  – диаметр сопла; 3 – падающая трубка,  $(D/d)^2 = 2.8$

ся в трубу, равны 2.3 и 5.12. На этой же фигуре представлена полученная в данной работе зависимость  $U_0/U_s$  от  $Re$  при подаче воздуха через подающую трубку с установившимся турбулентным течением и внезапным расширением на входе. Отношение диаметров исследуемой трубы и подающей трубки равнялось 1.67. Длина исследуемых труб равнялась двумстам диаметрам. Условия экспериментов различались характеристиками потока в отверстии, через которое газ подавался в исследуемую трубу. Если в работе [9] скорость в отверстии была постоянной по радиусу, а интенсивность пульсаций низкой, то в данной работе характеристики потока соответствовали установившемуся турбулентному течению в трубе.

**3. Обсуждение результатов.** Полученные в данной работе экспериментальные данные показывают, что независимые от длины исследуемой трубы числа Рейнольдса ( $Re^*$ ), при которых характеристики потока отклоняются от значений, характерных для установившегося ламинарного течения в трубе, зависят от условий формирования потока на входе в трубу. При формировании потока на входе в трубу с помощью безотрывного диффузора  $Re^*$  оказалось меньше, чем при внезапном расширении канала. При внезапном расширении пульсационное движение на входе в исследуемую трубу формируется при истечении из подводящей трубки струи со скоростью в несколько раз большей, чем среднерасходная скорость в исследуемой трубе. При наличии диффузора скорость на выходе из диффузора близка к среднерасходной скорости в исследуемой трубе, а пульсационное движение определяется градиентом скорости и турбулентными напряжениями сдвига. Интенсивность пульсаций на входе в исследуемую трубу при наличии диффузора меньше, чем при внезапном расширении, а структуры пульсационных движений в этих случаях сильно различаются.

Так как уменьшение интенсивности пульсаций на входе обычно приводит к увеличению  $Re^*$ , то можно утверждать, что в данном случае на величину  $Re^*$  влияет не только интенсивность пульсаций, но и их структура. Это согласуется с приведенными на фиг. 7 результатами экспериментов при внезапном расширении, но различных характери-

ках потока в отверстии, через которое газ подается в исследуемую трубу. При использовании сопловой вставки, формирующей поток с постоянной скоростью и низким уровнем пульсаций, значение  $Re^*$  оказалось больше, чем при подаче газа через подводящую трубку с установившимся турбулентным движением в ней. При этом отношение диаметра подводящей трубки к диаметру исследуемой трубы было больше, чем отношение диаметра сопла к диаметру исследуемой трубы.

Численные значения  $Re^*$ , полученные в данной работе, находятся в диапазоне значений, который называется в литературе. При этом обычно подразумевается, что определено не значение  $Re^*$ , а нижнее критическое число Рейнольдса, при значениях ниже которого установившееся течение может быть только ламинарным при “любых” возмущениях на входе. Обнаруженная в данной работе зависимость  $Re^*$  не только от амплитуды, но и от структуры возмущений на входе может объяснить разброс приводимых в литературе значений  $Re^*$ , но оставляет открытым вопрос о том, что подразумевается под словом “любых”. В связи с этим вопросом остается открытым и вопрос о существовании нижнего критического числа Рейнольдса. В данном случае следует учитывать, что речь идет не об условиях возникновения турбулентного движения, а об условиях вырождения сформированного на входе турбулентного движения, т.е. в некотором смысле, устойчивости турбулентного движения [9].

**Заключение.** Получены экспериментальные результаты по влиянию структуры начальных возмущений на режим установившегося течения в круглой трубе. Экспериментально определены нижние значения числа Рейнольдса, при которых при заданных условиях на входе изменялся профиль скорости, характерный для установившегося ламинарного течения в трубе. Полученное в данных экспериментах наименьшее значение  $Re^*$  наблюдалось в том случае, когда возмущения на входе в трубу определялись условиями на выходе из безотрывного диффузора.

Экспериментальные результаты показывают, что различие в структуре начальных возмущений может служить причиной разброса приводимых различными авторами значений нижнего критического числа Рейнольдса, под которым обычно подразумевается такое число Рейнольдса, при значениях ниже которого установившееся течение в трубе при “любых условиях” на входе может быть только ламинарным. Однако зависимость  $Re^*$  от структуры, а не только от интенсивности начальных возмущений оставляет открытым вопрос о значении словосочетания “любые условия” и соответственно о существовании нижнего критического числа Рейнольдса.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (№ 05-01-00081, 04-01-00365).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рейнольдс О. Динамическая теория движения несжимаемой вязкой жидкости и определение критерия // Проблемы турбулентности. М.; Л.: ОНТИ, 1936. С. 185–227.
2. Коляда В.В., Павельев А.А. О переходе к турбулентности на начальном участке круглой трубы // Изв. АН СССР. МЖГ. 1985. № 4. С. 52–56.
3. Darbyshire A.G., Mullin T. Transition to turbulence in constant-mass-flux pipe flow // J. Fluid Mech. 1995. V. 289. P.83–114.
4. Draad A.A., Kuiken G.D.C., Nieuwstadt F.T.M. Laminar-turbulent transition in pipe flow for Newtonian and non-Newtonian fluid // J. Fluid Mech. 1998. V. 377. P.267–312.
5. Eliahou S., Tumin A., Wygnanski I. Laminar-turbulent transition in Poiseuille pipe flow subjected to periodic perturbation emanating from the wall // J. Fluid Mech. 1998. V. 361. P. 333–349.
6. Луцкич В.Г., Павельев А.А., Якубенко А.Е. Исследование перехода к турбулентности в пограничном слое при большой интенсивности внешних возмущений с помощью трехпараметрической модели // Проблемы современной механики. Ч. 1. М.: Изд-во МГУ. 1983. С. 127–138.



7. Никитин Н.В. Численное исследование ламинарно-турбулентного перехода в круглой трубе под действием периодических входных возмущений // Изв. РАН. МЖГ. 2001. № 2. С. 42–55.
8. Павельев А.А., Решмин А.И. Переход к турбулентности на начальном участке круглой трубы // Изв. РАН. МЖГ. 2001. № 4. С. 113–121.
9. Павельев А.А., Решмин А.И., Тепловодский С.Х., Федосеев С.Г. О нижнем критическом числе Рейнольдса для течения в круглой трубе // Изв. РАН. МЖГ. 2003. № 4. С. 47–55.
10. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. Механика турбулентности. Ч. 1. М.: Наука, 1965. 639 с.
11. Прандтль Л. Гидроаэромеханика. М.: Изд-во иностр. лит., 1951. С. 576.
12. Saniel A.E., Joubert P.N. A boundary layer developing in an increasingly adverse pressure gradient // J. Fluid Mech. 1974. V 66. P. 3. P. 481–505.
13. Никитин Н.В., Павельев А.А. Турбулентные течения в канале с проницаемыми стенками. Результаты прямого численного моделирования и трехпараметрической модели // Изв. РАН. МЖГ. 1998. № 6. С. 18–26.

Москва

Поступила в редакцию  
28.IV.2006