

On the Possibility of Reducing Friction due to Relaminarization of the Flow in the Pipe

A.I. Reshmin, V.V. Trifonov, V.G. Lushchik, M.S. Makarova

*Institute of Mechanics, Lomonosov Moscow State University,
Moscow, 119192, Russia*

mariia.makarova@gmail.com

Abstract

Using the differential turbulence model, a numerical study of the possibility of relaminarization of the flow in a pipe is carried out for three variants of input devices with different velocity profiles and small-scale turbulence. The most promising is the experimentally investigated option with the organization of a two-zone flow with a slowed flow in the central region of the pipe and accelerated flow in the wall region. In this variant, the Reynolds number of relaminarization Re^* is 16000. It is shown that a further increase in the number of Re^* can be obtained by decreasing the turbulence intensity and turbulence scale at the inlet.

Key words: pipe, input device, relaminarization, differential turbulence model

УДК 532.52

О возможности снижения трения за счет ламинаризации течения в трубе

А.И. Решмин, В.В. Трифонов, В.Г. Лущик, М.С. Макарова

*НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова,
Россия, Москва, 119192, Мичуринский пр., 1
mariia.makarova@gmail.com*

Аннотация

С использованием дифференциальной модели турбулентности проведено численное исследование возможности реламинаризации течения в трубе для трех вариантов входных устройств с различными профилями скорости и мелкомасштабной турбулентностью. Наиболее перспективным оказался экспериментально исследованный вариант с организацией двухзонного течения с замедленным потоком в центральной области трубы и ускоренным в пристеночной области. В этом варианте получено число Рейнольдса реламинаризации $Re^* = 16000$. Показано, что дальнейшее повышение числа Re^* может быть получены при уменьшении интенсивности и масштаба турбулентности на входе.

Ключевые слова: труба, входное устройство, реламинаризация, дифференциальная модель турбулентности

1. Введение

Потери давления из-за трения при турбулентном режиме течения связаны с ростом потребления энергии на прокачку газа или жидкости по трубам и, как следствие, с возрастанием эксплуатационных расходов. В случае ламинаризации (реламинаризации) течения, т.е. при переходе с турбулентного режима течения к ламинарному, потери из-за трения могут быть существенно снижены. Так, например, для течения с числом Рейнольдса 25000 эти потери будут уменьшены на порядок.

В [1] представлен обзор ряда способов реламинаризации турбулентного течения в трубах. В частности, отмечено, что для управления турбулентным потоком использовались сетки и хонейкомбы, при помощи которых уровень турбулентности на входе можно уменьшить, но реламинаризации течения достичь не удалось. Следует отметить, что в [2] упомянуты работы по исследованию перехода к турбулентности в затопленных и спутных струях и в трубе, в которых также использовались хонейкомбы для формирования течений с заданным входным профилем скорости и турбулентностью малой интенсивности и масштаба.

В экспериментах [1] использовались два способа формирования профиля скорости на входе в участок реламинаризации турбулентного потока. Первый состоял в установке в трубу кольцевой вставки с перфорированной решеткой, создающей гидравлическое сопротивление. Проходя через кольцевую вставку с решеткой, поток тормозится относительно спутного потока, проходящего через кольцевой зазор между вставкой и трубой. Второй способ состоял в организации ввода спутного потока с большей скоростью через кольцевой зазор у стенки трубы. В [1] первым способом получена реламинаризация турбулентного течения при числе Рейнольдса $Re^* = 3800$, при втором способе – при $Re^* = 6000$. Увеличение числа Re^* при втором способе управления потоком можно объяснить более низким уровнем турбулентности в центральном потоке по сравнению с уровнем турбулентности, генерируемым решеткой в первом способе. Анализ полученных в [1] результатов позволяет сде-

лать вывод, что для достижения более высокого числа Рейнольдса, при котором наступает реламинаризация, необходимо сформировать поток не только с заданным профилем скорости, но и с низким уровнем турбулентности.

В [2] экспериментально и численно исследован новый класс течений с неоднородными (трапецевидным, U-образным и Λ-образным) профилями скорости и мелкомасштабной турбулентностью на входе, сформированными входными устройствами с переменным гидравлическим сопротивлением типа хонейкомбов, размер ячейки которых много меньше толщины слоя с градиентом скорости. Для расчета неравновесных турбулентных течений, представленных в [2], использовалась дифференциальная модель турбулентности [3] с уравнениями переноса для трех параметров: энергии турбулентности $E = 0.5 \sum \langle u_i'^2 \rangle$, напряжения сдвига $\tau = -\langle u'v' \rangle$ и параметра $\omega = E/L^2$, содержащего масштаб турбулентности L . Все константы в уравнениях переноса для характеристик турбулентности были определены из анализа трех эталонных экспериментов, имеющих высокую достоверность: течения за решеткой без градиента скорости, течения за решеткой с постоянным градиентом скорости и развитого турбулентного течения в канале [3]. Анализ этих течений позволил получить значения констант до численного решения уравнений. При расчетах течений, отличных от тех, из анализа которых определялись константы, значения констант не изменялись и эмпирические функции от параметров задачи не вводились.

Численное исследование реламинаризации турбулентного течения в трубе, результаты которого представлены ниже, проведено с использованием уравнений неразрывности и движения в приближении узкого канала и трехпараметрической дифференциальной модели турбулентности [3–5].

2. Результаты численного исследования

2.1. Расчет течений для условий эксперимента [1]

Для расчета турбулентного течения в трубе использованы уравнения неразрывности и движения в приближении узкого канала, где продольный градиент давления определяется в процессе решения из условий сохранения расхода в трубе.

Для определения турбулентного трения $\rho\tau = -\rho\langle u'v' \rangle$, входящего в уравнение движения, использовалась трехпараметрическая дифференциальная модель турбулентности [3].

Граничные условия на стенке трубы диаметром D , на оси симметрии и на входе в трубу

$$u = 0, v = 0, E = \frac{\partial E}{\partial r} = \tau = 0 \quad \left(r = \frac{D}{2} \right)$$

$$\frac{\partial u}{\partial r} = v = 0, \quad \frac{\partial E}{\partial r} = \frac{\partial \omega}{\partial r} = \tau = 0 \quad (r = 0)$$

$$p = \text{const}, u = u(r), E = E(r), L = L(r), \tau = 0 \quad (x = 0)$$

Система уравнений неразрывности, движения и модели турбулентности с граничными условиями, решалась численно методом прогонки с итерациями. Расчеты проводились на неравномерной сетке. Шаг по радиусу трубы вблизи стенки был малым. Шаг по продольной координате был также достаточно мал в сечениях, близких к входному сечению, и увеличивался по мере продвижения вниз по потоку, что позволило проводить расчеты даже при достаточно малом уровне турбулентности на входе в трубу.

Результаты численного исследования реламинаризации турбулентного течения, как будет показано ниже, существенным образом зависят от условий на входе в участок реламинаризации: профиля скорости и характеристик турбулентности.

Расчетная схема представлена на рис. 1. Профиль скорости на входе в участок реламинаризации был принят соответствующим профилю скорости при первом способе формирования потока работы [1]. В трубе внутренним диаметром $D = 2R = 30$ мм было организовано два спутных потока: центральный поток (индекс “2”), выходящий из кольцевой вставки внутренним диаметром $d_2 = 2r_2 = 26$ мм со среднерасходной скоростью U_2 , и кольцевой пристеночный поток (индекс “1”) в зазоре шириной 1 мм между кольцевой вставкой наружным диаметром $d_1 = 2r_1 = 28$ мм и трубой со среднерасходной скоростью U_1 . Отношение скоростей спутных потоков было принято $U_1/U_2 = 1.67$, что соответствует отношению расходов потоков $Q_1/Q_2 \approx 0.3$.

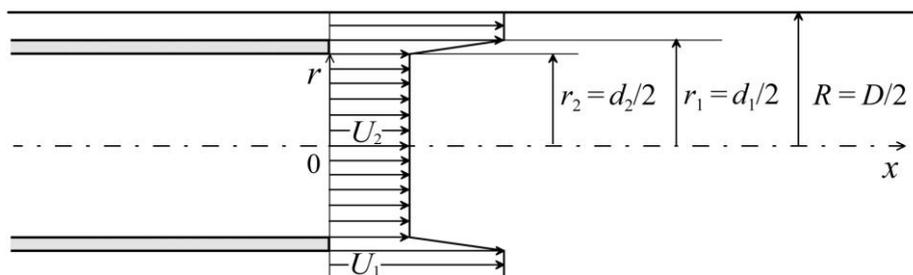


Рис. 1. Расчетная схема

Что касается характеристик турбулентности на входе в участок реламинаризации, то они могут быть установлены лишь приближенно. Так, для центрального потока, где турбулентность генерируется решеткой с отверстиями диаметром $d_3 = 3.3$ мм, интенсивность турбулентности непосредственно за решеткой будет достаточно высокой. Однако на длине вставки $L_t = 200$ мм ($L_t/d_2 \approx 7$) интенсивность турбулентности снизится. В расчетах на входе в участок реламинаризации (индекс “0”) в центральном потоке была принята величина интенсивности турбулентности $e_{02} = \sqrt{E_{02}}/U_2 = 0.05$ ($\sqrt{E_{02}}/U = 0.044$) и на расстоянии $z = x/D = 2$ от входа снизится еще до величины $e_{cl} = \sqrt{E_{cl}}/U = 0.036$ (см. рис. 3) на оси трубы (индекс “cl”), что близко к величине $2u'/U$, полученной на том же расстоянии от входа в эксперименте [1]. Масштаб турбулентности на входе L_{02} в центральном потоке был принят примерно равным диаметру отверстий перфорации решетки, так что относительная величина масштаба составила $l_{02} = L_{02}/R = 0.2$.

Оценки интенсивности и масштаба турбулентности для спутного потока позволили установить следующее. Поскольку поток в зазоре шириной 1 мм между вставкой и трубой близок к ламинарному, то возмущения в нем будут минимальными. Однако наличие кромки кольцевой вставки толщиной 1 мм приводит к турбулизации спутного потока с масштабом турбулентности порядка толщины кромки. В расчетах для спутного потока были приняты следующие входные величины интенсивности $e_{01} = \sqrt{E_{01}}/U_1 = 0.007$ ($\sqrt{E_{01}}/U = 0.01$) и масштаба турбулентности $l_{01} = L_{01}/R = 0.07$.

Напряжение сдвига в обоих потоках на входе было принято $\tau = -\langle u'v' \rangle = 0$. Профиль скорости в спутных потоках на входе был принят однородным с линейным изменением на кромке кольцевой вставки (см. рис. 1).

Расчеты выполнены для чисел Рейнольдса $Re = D \cdot U/\nu$, приведенных в [1], которые определены по диаметру трубы D , среднерасходной скорости потока U и кинематической вязкости воздуха ν .

Результаты численного исследования для чисел Рейнольдса $Re = 3800$ и $Re = 4500$ в первом способе реламинаризации работы [1] представлены на рис. 2–6. На рис. 2. приведено изменение по длине участка реламинаризации $z = x/D$ относительной скорости потока на оси трубы u_{cl}/U . Как видно, реламинаризация, как и в эксперименте [1], достигается на длине $z = x/D = 100$ при числе Рейнольдса $Re = 3800$, что подтверждается величиной $u_{cl}/U = 1.8$, близкой к значению $u_{cl}/U = 2$ для ламинарного режима течения. Изменение

интенсивности турбулентности на оси трубы $e_{cl} = \sqrt{E_{cl}}/U$ (рис. 3), стремящейся к нулю, и коэффициента сопротивления $\xi = (\rho\nu \partial u / \partial r)_w$ (рис. 4), близкого к величине $\xi = 64/Re$ для ламинарного режима течения, также подтверждают достижения реламинаризации при числе Рейнольдса $Re = 3800$. Для числа $Re = 4500$ при тех же входных условиях реламинаризации, как и в эксперименте [1], получено не было (см. рис. 2–4).

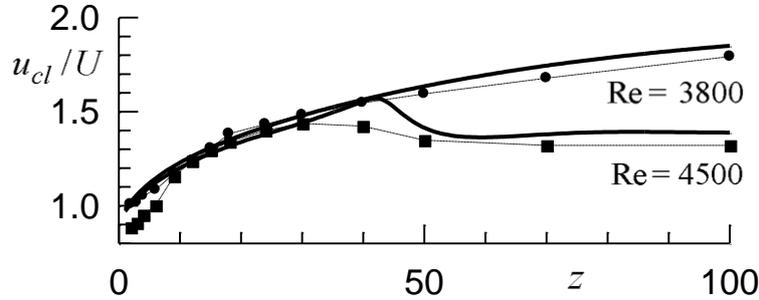


Рис. 2. Изменение по длине участка реламинаризации $z = x/D$ относительной скорости потока на оси трубы u_{cl}/U для двух чисел Рейнольдса: точки – эксперимент [1], линии – расчет

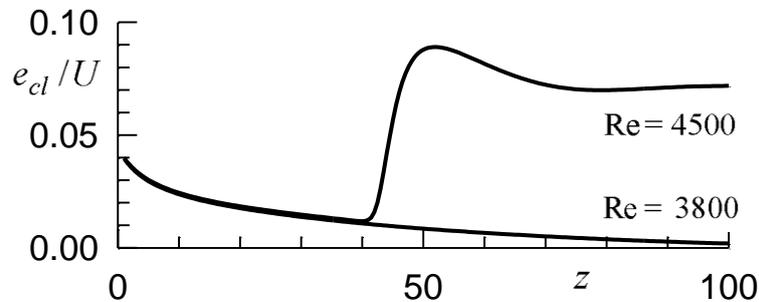


Рис. 3. Изменение интенсивности турбулентности на оси трубы $e_{cl} = \sqrt{E_{cl}}/U$ по длине $z = x/D$ для двух чисел Рейнольдса

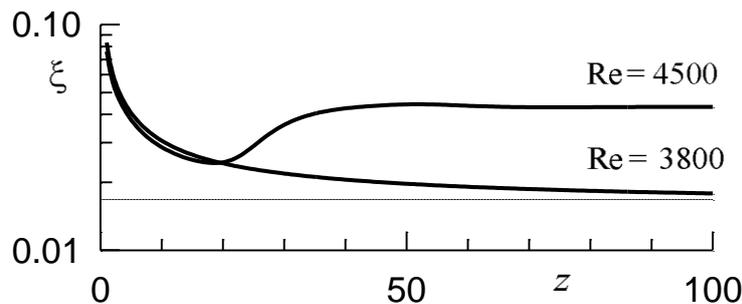


Рис. 4. Изменение по длине $z = x/D$ коэффициента сопротивления $\xi = (\rho\nu \partial u / \partial r)_w$ (штриховая линия $\xi = 64/Re$ для ламинарного режима течения) для двух чисел Рейнольдса

Профиль скорости в случае реламинаризации течения ($Re = 3800$) при $z = 100$ близок к профилю Пуазейля. Для $Re = 4500$, когда реламинаризация не наступает, профиль скорости при $z = 100$ близок к профилю скорости для турбулентного течения. В случае реламинаризации течения ($Re = 3800$) наиболее резкое снижение интенсивности турбулентности, как и в эксперименте [1], имеет место в области вблизи стенки трубы. Согласно [1] это означает подавление генерации турбулентности в пристеночной области, где она в отсутствие реламинаризации максимальна.

На рис. 5 приведены расчетное изменение максимальной величины генерации турбулентности $P_m = -(\rho\tau \partial u / \partial r)_m$ (рис. 5, а) и координата максимума генерации r_m/R (рис. 5, б)

по длине $z = x/D$ для двух чисел Рейнольдса. Полученные результаты свидетельствуют о том, что в случае реламинаризации ($Re = 3800$) генерация турбулентности подавляется и максимум ее смещается от стенки к оси трубы. В случае отсутствия реламинаризации ($Re = 4500$) максимум генерации турбулентности возрастает с выходом на режим развитого турбулентного течения при $z = 100$ и положение максимума генерации r_m/R остается в пристеночной области. Эти результаты подтверждают сделанное в [1] предположение о том, что основополагающий физический механизм реламинаризации связан с ослаблением цикла производства пристеночной турбулентности.

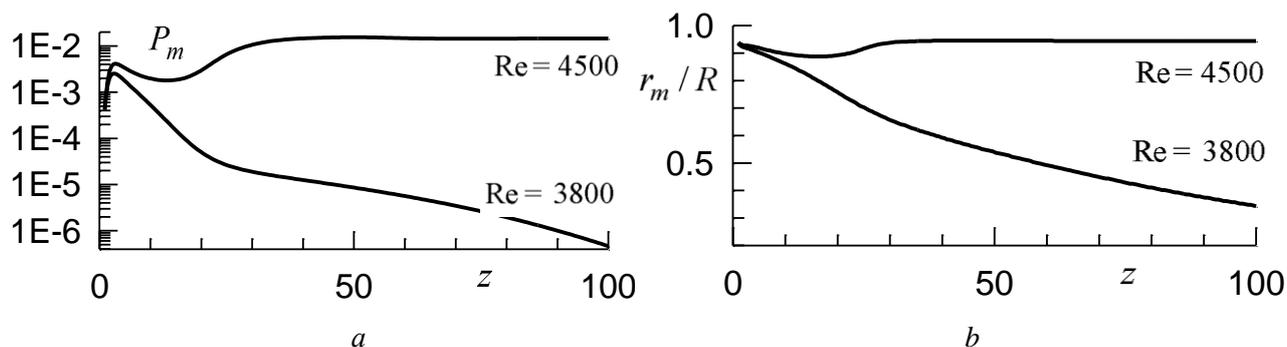


Рис. 5. Изменение максимальной величины генерации турбулентности $P_m = -(\rho\tau\partial u/\partial r)_m$ (а) и координата максимума генерации r_m/R (б) по длине $z = x/D$ для двух чисел Рейнольдса

Таким образом, приведенные на рис. 2–5 результаты численного исследования, в частности профили скорости и интенсивности турбулентности, ввиду недостаточной информации по характеристикам турбулентности на входе в участок реламинаризации, лишь качественно соответствуют экспериментальным данным [1]. Тем не менее полученные результаты подтверждают возможность реламинаризации течения с замедленным потоком в центральной области трубы и ускоренным – в пристеночной области. Полученное в расчете число Рейнольдса реламинаризации $Re = 3800$ соответствует экспериментальному значению, полученному в [1].

Такое невысокое значение числа Рейнольдса реламинаризации объясняется достаточно высокой интенсивностью турбулентности в центральной области, обусловленной постановкой турбулизирующей решетки для организации замедленного потока.

Уменьшение интенсивности турбулентности на входе в центральной области при отсутствии турбулизирующей решетки во втором способе организации течения в работе [1] позволило повысить число Рейнольдса реламинаризации течения до величины $Re = 6000$.

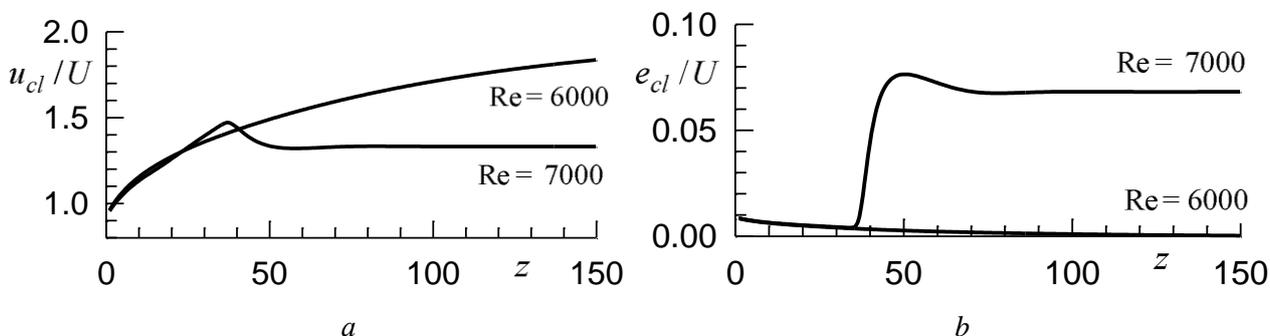


Рис. 6. Изменение по длине участка реламинаризации $z = x/D$ относительной скорости потока u_{cl}/U (а) и интенсивности турбулентности $e_{cl} = \sqrt{E_{cl}}/U$ (б) на оси трубы для двух чисел Рейнольдса

Численное исследование было проведено при двух числах Рейнольдса: $Re = 6000$ и $Re = 7000$ для следующих входных условий: $U_1/U_2 = 1.67$, $e_{02} = \sqrt{E_{02}}/U = 0.01$, $L_{02}/R = 0.2$,

$e_{01} = \sqrt{E_{01}}/U = 0.01$, $L_{01}/R = 0.1$. При числе $Re = 6000$, как и в эксперименте [1], получена реламинаризация течения, при $Re = 7000$ реламинаризация на длине $z = 100$ достигнута не была.

На рис. 6 в качестве иллюстрации сказанного для двух чисел Рейнольдса $Re = 6000$ и $Re = 7000$ представлено изменение по длине участка реламинаризации $z = x/D$ относительной скорости потока u_{cl}/U (а) и интенсивности турбулентности $e_{cl} = \sqrt{E_{cl}}/U$ (б) на оси трубы.

2.2. Влияние профиля скорости на реламинаризацию при низком уровне входных возмущений

Как отмечено во введении, анализ полученных в [1] результатов экспериментального исследования позволяет сделать вывод, что для достижения более высокого числа Рейнольдса реламинаризации, необходимо сформировать поток не только с заданным профилем скорости, но и с низким уровнем турбулентности. В этой связи представляет интерес исследовать как влияет входной профиль скорости на возможность реламинаризации при низком уровне характеристик турбулентности, генерируемым входным устройством.

При проведении численного исследования рассмотрено три варианта входных устройств [6]:

- вариант 1 с U -образным профилем скорости (см. рис. 1), аналогичным рассмотренному в эксперименте [1], с параметрами $r_1/R = 0.9$, $r_2/R = 0.87$, $U_1/U_2 = 1.5$;
- вариант 2 с Λ -образным профилем скорости, с параметрами $r_1/R = 0.9$, $r_2/R = 0.87$, $U_1/U_2 = 0.6$;
- вариант 3 с параболическим профилем скорости.

Во всех трех вариантах характеристики турбулентности на входе были одинаковыми и приняты следующими: интенсивность турбулентности, определенная по местной скорости u , $e_0 = \sqrt{E_0}/u = 0.01$, масштаб турбулентности $L_0/R = 0.05$.

Отметим, что выбор варианта 3 входного устройства с параболическим профилем скорости на входе, реализованный с использованием хонейкомба в работе [7], обусловлен тем обстоятельством, что профиль скорости при достижении реламинаризации будет стремиться к параболическому, т.е. остается близким к входному профилю скорости. При этом коэффициент сопротивления ξ на всей длине для варианта 3 наименьший из величин ξ для трех рассмотренных вариантов входных устройств и близок к ламинарному значению $\xi = 64/Re$.

На рис. 7 представлены зависимости от числа Рейнольдса $Re = DU/\nu$ величин $e_{cl} = \sqrt{E_{cl}}/U$ (а) и ξ (б) для трех вариантов входных устройств.

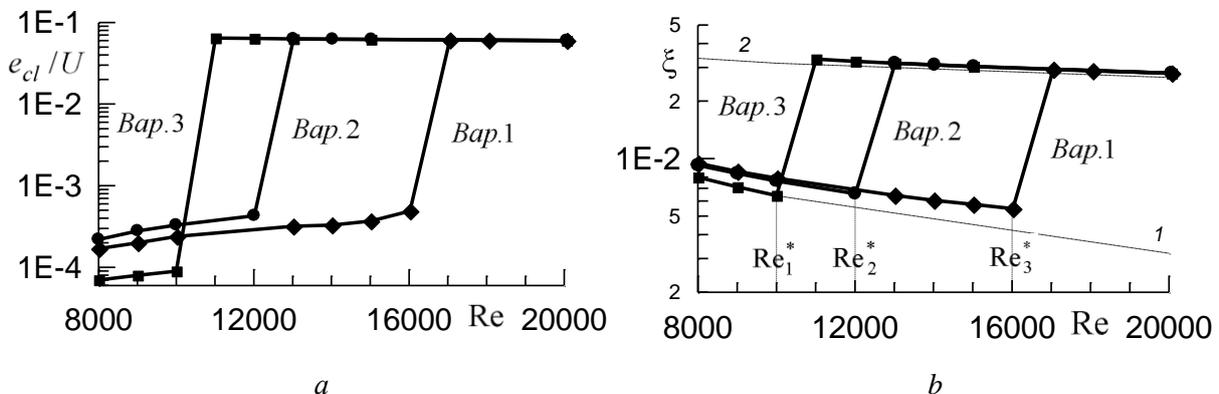


Рис. 7. Зависимости от числа Рейнольдса $Re = DU/\nu$ величин интенсивности турбулентности $e_{cl} = \sqrt{E_{cl}}/U$ (а) на оси трубы и коэффициента сопротивления ξ (б) для трех вариантов входных устройств (Var. 1, Var. 2, Var. 3 – линии и точки); линия 1 на рис. 7, б – $\xi = 64/Re$; линия 2 на рис. 7, б – $\xi = 0.316/Re^{1/4}$

Достижение режима реламинаризации в расчетах определялось, как и в [1], по изменению по длине трубы интенсивности турбулентности $e_{cl} = \sqrt{E_{cl}}/U$ (рис. 7, а) на оси трубы, а также по изменению коэффициента сопротивления ξ (рис. 7, б).

В расчетах, проведенных с шагом по числу Рейнольдса $dRe = 1000$, получено, что реламинаризация наступает для варианта входного устройства 1 в диапазоне чисел Рейнольдса $Re = (16 \div 17) \times 10^3$, для варианта 2 – в диапазоне чисел Рейнольдса $Re = (12 \div 13) \times 10^3$, для варианта 3 – в диапазоне чисел Рейнольдса $Re = (10 \div 11) \times 10^3$.

Во всех трех вариантах, как указано выше, характеристики турбулентности на входе были одинаковыми ($e_0 = \sqrt{E_0}/u = 0.01$, $L_0/R = 0.05$). Для вариантов расчета 1 и 2 с двухзонной организацией течения представляет интерес исследовать влияние различных входных условий в пристенном потоке на число Рейнольдса реламинаризации течения.

На рис. 8 представлены зависимости числа Рейнольдса реламинаризации Re^* от входных величин интенсивности турбулентности $e_{02} = \sqrt{E_{02}}/U_2$ ($L_{02}/R = 0.05$) (а) и относительного масштаба турбулентности $l_{02} = L_{02}/R$ ($e_{02} = \sqrt{E_{02}}/U_2 = 0.01$) (б) в пристеночном потоке для вариантов 1 и 2 входных устройств.

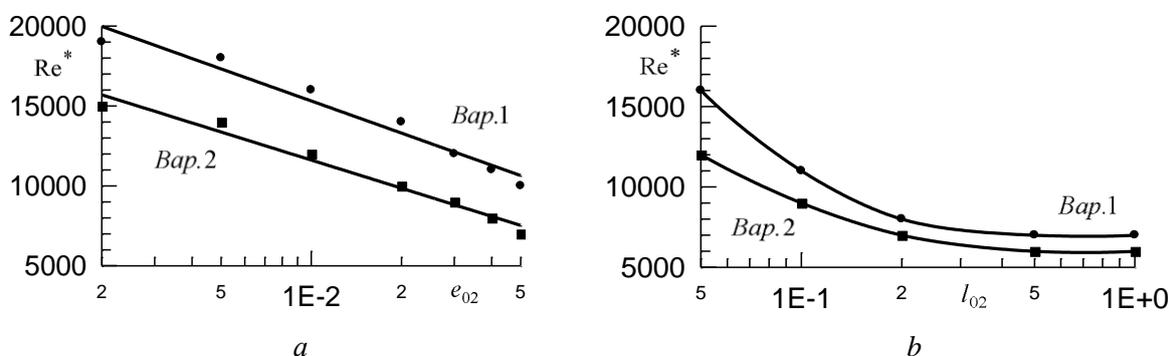


Рис. 8. Зависимость числа Рейнольдса реламинаризации Re^* от интенсивности турбулентности $e_{02} = \sqrt{E_{02}}/U_2$ (а) и масштаба турбулентности $l_{02} = L_{02}/R$ (б) в пристеночном потоке для двух вариантов входных устройств (Var. 1, Var. 2 – линии и точки)

Как видно из рис. 8, а, снижение входной интенсивности турбулентности e_{02} в пристенном потоке существенно повышает число Рейнольдса реламинаризации Re^* . Это повышение величины Re^* в большей степени относится к варианту 1 с увеличенной скоростью пристеночного потока. Что касается влияния входного масштаба турбулентности l_{02} (рис. 8, б), то влияние его на величину Re^* существенно для малых масштабов ($l_{02} < 0.2$). Для крупномасштабной входной турбулентности величина Re^* практически не зависит от l_{02} .

3. Заключение

С использованием трехпараметрической дифференциальной модели турбулентности проведен расчет течений, для которых получены экспериментальные данные [1] по реламинаризации турбулентного течения в трубе. Получено удовлетворительное согласие результатов расчета с экспериментальными данными по профилям скорости, интенсивности турбулентности и числам Рейнольдса реламинаризации, что свидетельствует об адекватности используемой в расчетах модели турбулентности. Полученные результаты расчета подтвердили возможность реламинаризации течения с замедленным потоком в центральной области трубы и ускоренным в пристеночной области.

Проведенное численное исследование для трех вариантов входных устройств с неоднородным профилем скорости и мелкомасштабной турбулентностью на входе показало возможность достижения реламинаризации течения в трубах при числах Рейнольдса $Re > 10000$. Во всех трех вариантах характеристики турбулентности на входе были одинаково-

выми и приняты следующими: интенсивность турбулентности, определенная по местной скорости u , $e_0 = \sqrt{E_0}/u = 0.01$, масштаб турбулентности $L_0/R = 0.05$.

Из трех рассмотренных вариантов входных устройств наиболее перспективным оказался вариант 1, экспериментально исследованный в работе [1] с организацией двухзонного течения с замедленным потоком в центральной области трубы и ускоренным в пристеночной области. В этом варианте получено число Рейнольдса реламинаризации $Re^* = 16000$. Для варианта 2 с ускоренным потоком в центральной области трубы и замедленным в пристеночной области получено меньшее число Рейнольдса реламинаризации $Re^* = 12000$. Для варианта 3 с параболическим профилем скорости на входе получено наименьшее из тех вариантов число Рейнольдса реламинаризации $Re^* = 10000$.

Показано, что дальнейшее повышение числа Рейнольдса реламинаризации может быть получено при уменьшении интенсивности и масштаба турбулентности на входе. Так, например, для варианта 1 входного устройства снижение входной интенсивности турбулентности с $e_0 = 1\%$ до $e_0 = 0.5\%$ при величине масштаба турбулентности $l_0 = 0.05$ повышает величину Re^* с 16000 до 18000.

Работа выполнена в рамках исследований, частично финансируемых гос. бюджетом (АААА-А16-116021110203-6, АААА-А16-116021110200-5), РФФИ (№ 17-08-00115) и Советом по грантам Президента РФ (№ СП-3993.2018.1).

Литература

1. Kuhn J., Scarselli D., Schaner M., Hof B. Relaminarization by Steady Modification of the Streamwise Velocity Profile in a Pipe // Flow Turbulence Combust. 2018. No 100. Pp. 919–943.
2. Луцник В.Г., Павельев А.А., Якубенко А.Е. Итоги науки и техники. Сер. Механика жидкости и газа. М.: ВИНТИ. 1988. Т. 22. С. 3–61.
3. Луцник В.Г., Павельев А.А., Якубенко А.Е. Трехпараметрическая модель сдвиговой турбулентности // Изв. АН СССР. МЖГ. 1978. № 3. С. 13–25.
4. Луцник В.Г., Макарова М.С., Решмин А.И. Ламинаризация потока при течении в плоском канале с конфузуром // Изв. РАН. МЖГ, 2019. №1. С. 68–77.
5. Макарова М.С., Луцник В.Г., Решмин А.И. Исследование условий возникновения полной реламинаризации течения в плоских конфузурных каналах. В сб.: Современные проблемы механики и математики // Научные слушания, посвященные 110-летию со дня рождения С.А. Христиановича. Сборник материалов. 2018. С. 66–68.
6. Луцник В.Г., Макарова М.С., Решмин А.И. Способы управления турбулентным потоком при ламинаризации течения в трубе // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Аннотации докладов Изд-во: РИЦ БашГУ Уфа, 2019. С. 102.
7. 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. 166–169.

Статья поступила в редакцию 17 октября 2019 г.