

doi: 10.5862/MCE.63.3

Уточнение характеристик турбулентного пристеночного течения в гладком канале с учетом нестационарности вязкого подслоя

Detailed characteristics of the near-wall flow containing unsteady viscous sublayer in smooth channel

Аспирант И.А. Рылова,*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия***I.A. Rylova,***National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia***Ключевые слова:** гладкий канал; вязкий подслой; буферная зона; распределение скоростей; интеграл вероятности**Key words:** smooth channel; viscous sublayer; buffer zone; velocity distribution; error integral

Аннотация. С учетом экспериментальных данных по продольным и нормальным к стенке турбулентным пульсациям скорости и коэффициента корреляции между ними получено выражение для турбулентной и вязкой составляющих трения в пристенной зоне течения. На основе уточненного значения вязкой компоненты трения получена толщина слоя вязкого течения, которая оказалась зависящей от коэффициента гидравлического сопротивления. Рассмотрено нестационарное течение в зоне влияния вязких напряжений на основе модифицированной модели Эйнштейна и Ли, в которую введена изменяющаяся скорость на верхней границе вязкого слоя. С учетом этого условия получено решение динамического уравнения в виде профиля скорости, зависящего от времени и расстояния от твердой границы потока. Данное распределение скоростей справедливо для буферной зоны, в которой осуществляется переход от слоя вязкого течения к слою постоянного турбулентного напряжения. Для профилей скорости в слое постоянного турбулентного напряжения уточнены параметр Кармана и вторая константа турбулентности на основании данных измерений, выполненных в гладком канале с помощью лазерного измерителя скорости. Предложена модель перемежающегося течения в буферной зоне, согласно которой в разные моменты времени вязкое течение разрушается и заменяется турбулентным течением с логарифмическим распределением скоростей. Для расчета скорости течения в буферной зоне предложено использовать коэффициент перемежаемости, который учитывает время существования турбулентного течения, отнесенного к общему времени реализации процесса. Анализ показал, что коэффициент перемежаемости изменяется с расстоянием от твердой границы и количественно близок к интегралу вероятности. Распределение скоростей, полученное на основе предложенных подходов, подтверждается данными измерений ряда авторов.

Abstract. Taking into consideration the experimental data on the longitudinal and the normal to the wall velocity fluctuations and the correlation coefficient between the fluctuations, the turbulent and viscous friction components near the wall were determined. Based on the adjusted value of the components of viscous friction there was obtained thickness of the viscous flow, depending on the drag coefficient. The unsteady flow in the viscous sublayer based on Einstein and Lee's model modified by introducing the changing velocity at the upper boundary of the viscous sublayer was considered. The solution to the dynamic equation in the form of the velocity profile, depending on time and distance from the wall was obtained. This velocity profile may be used for the buffer region, in which a viscous flow is transformed into a turbulent one. Von-Karman's parameter and the profile constant were determined on the basis of LDA measurements in the smooth channel. According to the intermittent flow model for the buffer region, a viscous flow is destroyed and replaced with a turbulent flow with a logarithmic velocity profile. To determine velocity distribution in the buffer region it is proposed to use a gamma intermittency factor, allowing for time of the turbulent flow, divided by the total time of the process. The analysis shows

Rylova I.A. Utochnenie harakteristik turbulentnogo pristenochnogo techeniya v gladkom kanale s uchetom nestacionarnosti vyazkogo podsloya [Detailed characteristics of the near-wall flow containing unsteady viscous sublayer in smooth channel]. *Magazine of Civil Engineering*. 2016. No. 3. Pp. 40–52. doi: 10.5862/MCE.63.3 (rus)

that the intermittency factor varies with the distance from the wall, and it is quantitatively similar to the error integral. The obtained velocity distribution has been confirmed by many authors' measurements.

Введение

Уточненное распределение скоростей в пристенной зоне потока необходимо при решении задач прогнозирования кавитационной эрозии водосбросных сооружений [1, 2], турбинного и насосного оборудования, при обтекании потоком местных сопротивлений [3]. Характеристики течения в пристенной зоне потока также играют важную роль при расчете теплового баланса зданий и сооружений [4], решении задач теплопереноса в атомной и тепловой энергетике [5], ракетной и авиационной технике, при рассмотрении вопросов взвешивания и транспорта наносов в каналах и реках [6–8]. Последние исследования показали, что в пристенной зоне потока вязкий подслой нарастает во времени, разрушается и сменяется турбулентным течением [9–20]. Объектом исследования являются турбулентные течения в широких открытых каналах и пограничных слоях без градиента давления.

Обычно при рассмотрении распределения скоростей в непосредственной близости от твердой границы считается, что течение определяется действием сил вязкого трения. Эта область потока называется вязким подслоем, безразмерная толщина которого имеет порядок $\frac{u_* z}{\nu} = (5 \div 11,5)$. Для расчета распределения скоростей в этой зоне обычно используется закон внутреннего трения Ньютона [21], на основе которого получается линейное распределение скоростей в вязком подслое:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{u_* z}{\nu}, \quad (1)$$

где u – местная скорость в точке z ;

z – расстояние от дна канала или стенки трубы;

ν – кинематическая вязкость;

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \text{ – динамическая скорость,}$$

где ρ – плотность жидкости;

$$\tau_0 = \text{const} = \rho u_*^2 \text{ – полное трение на стенке.}$$

Как отмечалось выше, течение в вязком подслое является нестационарным [9–20]: в отдельные периоды времени течение вблизи твердой границы имеет чисто вязкий характер – в другие в той же точке наблюдения течение жидкости приобретает турбулентный характер. Эти особенности течения влияют на процесс переноса количества движения и импульса силы трения в пределах подслоя и буферной зоны. Попытки расчета течения в нестационарном вязком подслое при отличающихся граничных условиях были предприняты рядом авторов [9, 11, 14]. Первая попытка расчета нестационарного течения в вязком подслое была предпринята Х. Эйнштейном и Х. Ли [9] в предположении нарастания толщины вязкого подслоя в течение некоторого времени с последующим мгновенным разрушением вязкого подслоя и возникновением турбулентного течения в момент разрушения подслоя. Для расчета вязкого течения использовано уравнение Навье – Стокса, записанное для плоского равномерного течения [22], которое для условия горизонтального дна приводится к виду:

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}, \quad (2)$$

где t – время нарастания вязкого подслоя;

u_x – продольная составляющая скорости.

Это уравнение имеет вид уравнения теплопроводности, стандартное решение которого записывается в виде интеграла вероятности (интеграл ошибок):

Рылова И.А. Уточнение характеристик турбулентного пристеночного течения в гладком канале с учетом нестационарности вязкого подслоя // Инженерно-строительный журнал. 2016. № 3(63). С. 40–52.

$$u = \frac{2 \cdot u_0}{\sqrt{\pi}} \int_0^H e^{-n^2} dn, \quad (3)$$

где предел интегрирования H имеет вид $H = \frac{z}{2 \cdot \sqrt{vt}}$;

$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-n^2} dn$ – интеграл вероятности (интеграл ошибок);

n – аргумент подынтегральной функции;

$u_0 = \text{const}$ – скорость за пределами вязкого подслоя.

Полученное упрощенное уравнение (2) не содержит факторов, инициирующих движение, поскольку согласно граничным условиям в начальный момент времени $t=0$ движение уже существует и его скорость во всех точках z равна u_0 . Таким образом, уравнение (3) описывает изменение скорости течения на различном расстоянии z от стенки, в различные моменты времени t . Учитывая сделанные упрощающие допущения, решение (3) следует считать приближенным.

Интегрирование уравнения (2) с учетом изменения скорости u_0 на внешней границе вязкого подслоя с ростом его толщины приобретает значительные математические трудности. В работе [11] получено решение упрощенного уравнения (2) методом интегральных преобразований Лапласа, при котором период роста вязкого подслоя разбивался на малые интервалы, в пределах которых скорость u_0 можно было считать постоянной, но изменяющейся от интервала к интервалу. Это позволяло использовать для каждого интервала времени полученное решение в виде:

$$\frac{u}{u_*} = 5,75 \cdot \lg 335 \sqrt{\frac{t_c}{t_0}} \cdot \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{u_* \cdot z}{27,5 \cdot \nu} \right) \cdot \sqrt{\frac{t_0}{t_c}} - \operatorname{erf} \left(3,5 - \frac{u_* \cdot z}{27,5 \cdot \nu} \sqrt{\frac{t_0}{t_c}} \right) \right], \quad (4)$$

где t_c – период роста вязкого подслоя;

t_0 – доля t_c , в пределах которой скорость u_0 на внешней границе считается мало изменяющейся и определяется по стандартному логарифмическому профилю [23], при толщине вязкого подслоя z_{vi} , соответствующей рассматриваемому времени t_{0i} .

Попытка усовершенствования модели Эйнштейна и Ли была предпринята в работе Ю.В. Брянской [14], в которой рассмотрено перемежающееся вязко-турбулентное течение в каждой точке по толщине вязкого подслоя. Скорость на верхней границе вязкого подслоя считалась изменяющейся и определялась по стандартному логарифмическому профилю:

$$\left(\frac{u}{u_*} \right)_t = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{u_* z}{\nu} + C, \quad (5)$$

где u – осредненная по времени скорость турбулентного течения в точке потока.

Выражение (5) получено при $\tau = \text{const}$ с использованием ряда недостаточно обоснованных гипотез, при этом средние значения κ и C , определенные И. Никурадзе опытным путем для потоков в гладких границах, оказались равными $\kappa = 0,4$ и $C = 5,5$. Однако более поздние исследования обнаружили непостоянство этих параметров [24–26], что требует их дальнейшего изучения.

В работе [14] определение коэффициента гидравлического сопротивления λ с использованием полученного профиля (4) для зоны переходного сопротивления обнаружили расхождение с экспериментальными данными по λ . Для устранения этого расхождения возникла необходимость введения дополнительно времени действия турбулентного течения, которое частично заменяет вязкое течение в рассматриваемой точке.

Результаты, полученные различными авторами [9, 11, 14], основываются на недостаточно обоснованных допущениях и ограниченных экспериментальных данных, что требует дальнейших аналитических и экспериментальных исследований пристенного турбулентного течения в широких каналах и пограничных слоях, которые обладают качественной схожестью.

Исследования и анализ

Распределение скоростей (1) при вязком течении у стенки является приближенным в связи с тем, что касательные напряжения линейно изменяются по глубине потока. С учетом этого можно записать динамическое уравнение в следующем виде:

$$\rho u_*^2 \left(1 - \frac{z}{h}\right) = \mu \frac{du}{dz}, \quad (6)$$

где h – глубина потока;

$\mu = \rho \nu$ – динамическая вязкость.

Разделяя переменные и интегрируя выражение (6), получаем более точное линейно-параболическое распределение скоростей в вязком подслое:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{u_* z}{\nu} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{z}{h}\right) \quad (7)$$

Полученное выражение (7) показывает, что в пристенном слое при $\frac{z}{h} \approx 0,1$ учет изменения полного напряжения трения дает поправку в скорости вязкого течения, не выходящую за пределы 5 %.

Многочисленные измерения [27–31] показывают, что в слоях потока практически вплоть до самой стенки обнаруживается пульсационное движение жидкости как в продольном, так и в вертикальном направлении по нормали к стенке. Это указывает на действие в потоке механизма обмена количеством движения, имеющего в отдельные моменты времени турбулентную природу вплоть до самой стенки. Таким образом, устоявшееся мнение о том, что вязкое трение вблизи твердой границы потока соответствует полному напряжению трения, является неточным.

Для определения доли вязкой компоненты трения выделим из суммарного трения турбулентную составляющую трения τ_t , для расчета которой используем известное выражение для коэффициента взаимной корреляции между пульсациями продольной и вертикальной

компонент вектора скорости $R_{xz} = \frac{\overline{u'_x \cdot u'_z}}{\sqrt{\overline{u_x'^2}} \cdot \sqrt{\overline{u_z'^2}}}$.

Числитель этого выражения согласно Лоренцу [32] связан с турбулентным трением следующим соотношением:

$$\tau_t = \rho \cdot \overline{u'_x \cdot u'_z} \quad (8)$$

Знаменатель этого выражения представляет собой произведение стандартов (среднеквадратичных величин) продольной и вертикальной пульсаций скорости. С учетом этого можно записать:

$$\tau_t / \rho = R_{xz} \cdot \sqrt{\overline{u_x'^2}} \cdot \sqrt{\overline{u_z'^2}} \quad (8)$$

Рылова И.А. Уточнение характеристик турбулентного пристеночного течения в гладком канале с учетом нестационарности вязкого подслоя // Инженерно-строительный журнал. 2016. № 3(63). С. 40–52.

Стандарты продольной и вертикальной пульсационных составляющих скорости были найдены аппроксимацией данных многочисленных измерений [31] в пристеночной зоне, приведенных на рисунке 1.

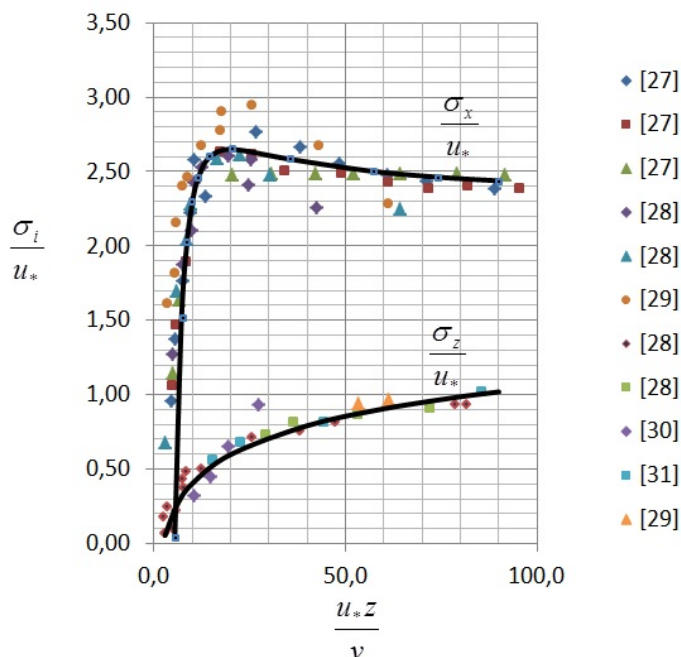


Рисунок 1. Распределение стандартов продольных $\frac{\sigma_x}{u_*}$ и вертикальных $\frac{\sigma_z}{u_*}$ пульсаций скорости вблизи стенки, нормированных динамической скоростью, по данным измерений [31] в пограничном слое на пластине и в каналах

Аппроксимационные зависимости для продольной и поперечной пульсаций скорости для $5,5 \leq \frac{u_* z}{\nu} \leq 100$ подобраны методом наименьших квадратов в виде:

$$\frac{\sigma_x}{u_*} = \frac{\sqrt{u_x'^2}}{u_*} = \frac{2,3 \cdot \left(\frac{u_* z}{\nu}\right)^2 + 14 \cdot \frac{u_* z}{\nu} - 140}{\left(\frac{u_* z}{\nu}\right)^2} \quad (10)$$

$$\frac{\sigma_z}{u_*} = \frac{\sqrt{u_z'^2}}{u_*} = 0,28 \cdot \ln \frac{u_* z}{\nu} - 0,24 \quad (11)$$

Данные измерений показывают, что коэффициент корреляции R_{xz} в пристенной зоне течения изменяется слабо и близок к 0.4 [31]. Согласно некоторым измерениям имеется тенденция к уменьшению R_{xz} с приближением к стенке, однако учет этого требует специального исследования; в настоящей работе коэффициент R_{xz} принимался равным 0.4.

С учетом найденной таким образом турбулентной компоненты касательного напряжения вязкая составляющая полного трения записывается в виде:

$$\tau_v = \rho \cdot u_*^2 \cdot \left(1 - \frac{z}{h}\right) - 0,4 \cdot \rho \cdot \frac{\left(2,3 \cdot \left(\frac{u_* z}{\nu}\right)^2 + 14 \cdot \frac{u_* z}{\nu} - 140\right)}{\left(\frac{u_* z}{\nu}\right)^2} \cdot u_* \cdot \left(0,28 \cdot \ln \frac{u_* z}{\nu} - 0,24\right) \cdot u_* \quad (12)$$

С использованием выражения (12) вязкая составляющая трения в непосредственной близости к границе $5,5 \leq \frac{u_* z}{\nu} \leq 100$ в периоды вязкого течения представлена на рисунке 2.

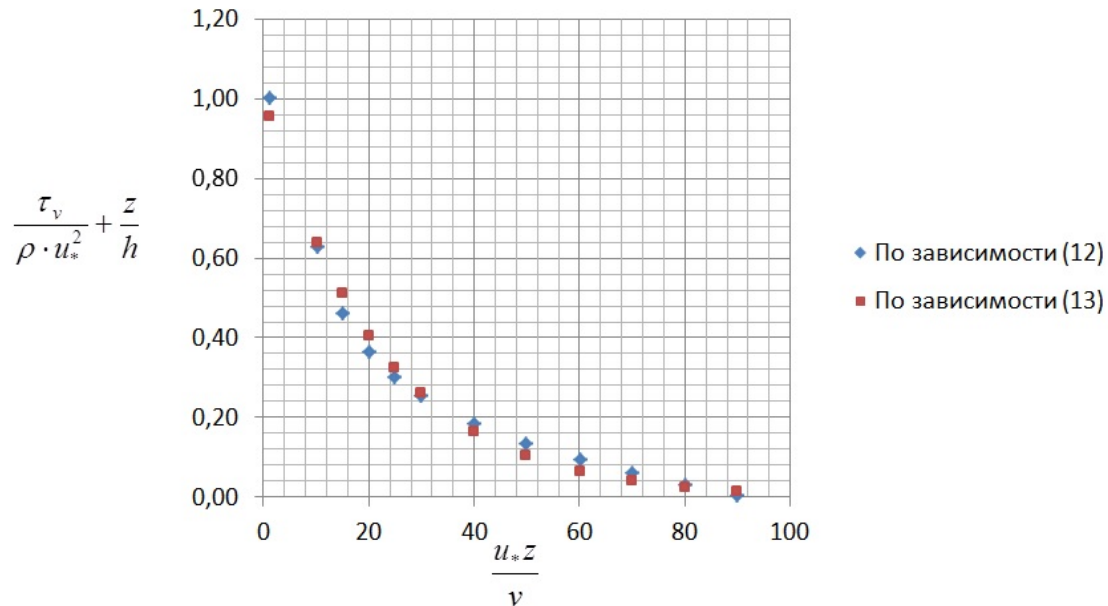


Рисунок 2. Распределение вязкой составляющей трения вблизи твердой границы потока

Расчетные данные (см. рис. 2) показывают, что вязкие напряжения трения остаются заметными до $\frac{u_* z}{\nu} \approx 90$. Полученные данные были аппроксимированы следующей более простой зависимостью:

$$\frac{\tau_v}{\rho \cdot u_*^2} + \frac{z}{h} = \exp^{-0,045 \cdot \frac{u_* z}{\nu}} \quad (13)$$

Приравняв τ_v из (13) к вязкому напряжению Ньютона [21], запишем:

$$\rho \cdot u_*^2 \cdot \left(\exp^{-0,045 \cdot \frac{u_* z}{\nu}} - \frac{z}{h} \right) = \mu \frac{du}{dz} \quad (14)$$

Интегрируя выражение (14), получаем профиль скорости в зоне влияния вязких напряжений, найденных с учетом изменения полного касательного напряжения по глубине потока:

$$\left(\frac{u}{u_*} \right)_v = 22,2 \cdot \left(1 - \exp^{-0,045 \cdot \frac{u_* z}{\nu}} \right) - \frac{1}{2} \cdot \frac{u_* z}{\nu} \cdot \frac{z}{h} \quad (15)$$

Расчетные распределения скоростей в вязком пристеночном течении при различных коэффициентах гидравлического сопротивления представлены на рисунке 3.

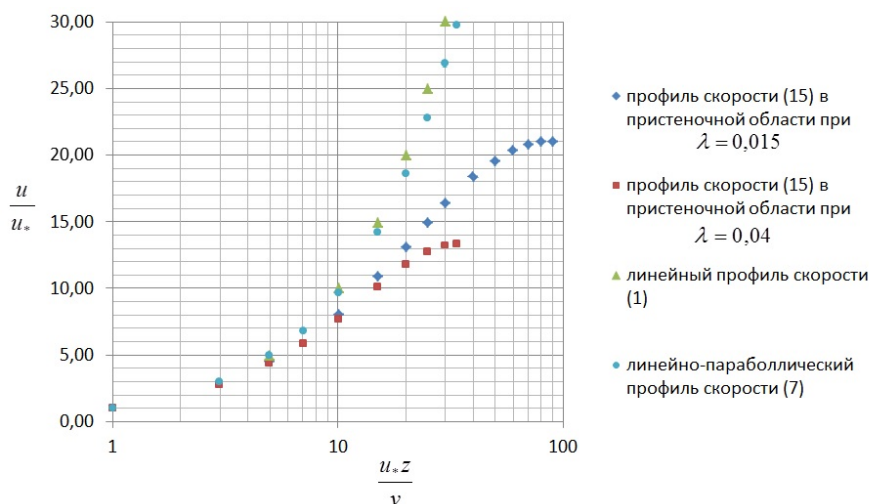


Рисунок 3. Профили скорости (1), (7) и (15) при коэффициентах гидродинамического сопротивления 0.015 и 0.04

Сопоставление полученного «вязкого» профиля (15) с известным линейным (1), а также линейно-параболическим распределением скоростей (7) показывает, что в периоды вязкого течения, рассчитанные скорости (15) заметно меньше тех, которые определяются как по линейному, так и по линейно-параболическому профилю скорости.

Полученные выражения для вязкой компоненты трения позволяют также определить безразмерную толщину слоя $\frac{u_* l_{p1}}{\nu}$, в котором проявляется действие вязкой компоненты трения

(при $z \rightarrow l_{p1}$ вязкая составляющая напряжения $\tau_v \rightarrow 0$). Величина $\frac{u_* l_{p1}}{\nu}$, найденная из условия $\tau_v = 0$, приводится к виду:

$$\frac{u_* l_{p1}}{\nu} = \frac{1,35}{\lambda} - 10 \tag{16}$$

Полученное выражение показывает, что безразмерная толщина слоя, в пределах которого проявляется действие вязких напряжений, зависит от коэффициента гидравлического сопротивления, и в диапазоне реальных значений λ от 0.015 до 0.04 (в котором обычно работают гладкие водоводы) изменяется $\frac{u_* l_{p1}}{\nu}$ от 35 до 90, что близко к безразмерной толщине буферной зоны [33].

Учитывая определенную сложность использования полученного ранее решения (4) для буферной зоны предлагается феноменологическая модель перемежающегося течения, согласно которой в каждой точке $\frac{u_*z}{\nu}$ этой зоны развивающееся вязкое течение сменяется течением турбулентным. Вводится понятие коэффициента перемежаемости γ как отношение времени действия турбулентного течения к общему времени цикла развития и разрушения вязкого подслоя.

С учетом этого скорость течения в буферной зоне можно представить как осредненную величину вязкого и турбулентного течений с учетом времени их действия:

$$\left(\frac{u}{u_*} \right) = \left(\frac{u}{u_*} \right)_v \cdot (1 - \gamma) + \left(\frac{u}{u_*} \right)_t \cdot \gamma, \tag{17}$$

Rylova I.A. Utochnenie karakteristik turbulentnogo pristenochnogo techeniya v gladkom kanale s uchetom nestacionarnosti vyazkogo podsloya [Detailed characteristics of the near-wall flow containing unsteady viscous sublayer in smooth channel]. *Magazine of Civil Engineering*. 2016. No. 3. Pp. 40–52. doi: 10.5862/MCE.63.3 (rus)

где $\left(\frac{u}{u_*}\right)_v$ – вязкая составляющая профиля скорости, определенная по зависимости (15);

$\left(\frac{u}{u_*}\right)_t$ – турбулентная составляющая профиля скорости, полученная по стандартному

логарифмическому профилю с реальными значениями параметра Кармана K и C ;

$\gamma = \frac{t_t}{T}$ – коэффициент перемежаемости, характеризующий суммарное время существования

турбулентного течения t_t , отнесенное к периоду наблюдения T .

Согласно предлагаемой модели перемежающегося течения скорость течения в любой точке буферной зоны находится осреднением двух состояний вязкого и турбулентного с учетом времени (вероятности) их действия. С приближением к стенке время (вероятность) вязкого состояния возрастает, с удалением от стенки возрастает вероятность (время) турбулентного состояния течения.

Перемежающееся вязко-турбулентное течение в пределах буферной зоны распространяется на максимальное расстояние от стенки, равное $\frac{u_* l_{p1}}{\nu}$. Если считать перемежающийся процесс изменения скорости в буферной зоне Гауссовским, максимальное расстояние принимается равным утроенному стандарту:

$$\frac{u_* l_{p1}}{\nu} = 3\sigma \quad (18)$$

Очевидно, что с увеличением расстояния от стенки вклад в профиль скорости вязкой составляющей уменьшается и второе слагаемое в выражении (17) приближается к единице. Сравнивая решение (3) с полученным выражением (17) вблизи верхней границы буферной зоны $u = u_t \cdot \gamma$ при $u_0 = u_t$, находим, что $\gamma \approx \text{erf}(x) = \Phi(x\sqrt{2})$, связанный с интегралом вероятности Гаусса $\Phi(x)$, который табулирован [34]:

$$\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt, \quad (19)$$

где t – текущее значение аргумента x ;

x – предел интегрирования для рассматриваемой точки, который определялся как:

$$x = \frac{u_* z}{\nu} / \sigma \quad (20)$$

Для Гауссовского процесса значение $\Phi(x) = 0$ при $x = 0$ и $\Phi(x) \approx 1$ при $x = 3$.

В моменты разрушения вязкого течения массы жидкости из вышележащих слоев, движущихся турбулентно, могут проникать вплоть до твердой границы [19–20], при этом скорость

этих масс $\left(\frac{u}{u_*}\right)_t$, входящая в выражение (17), может быть найдена по логарифмическому профилю Л. Прандтля [35].

Основные результаты и обсуждение

Как отмечалось выше, параметры K и C логарифмического профиля скорости (5) не являются постоянными. Для их анализа использовались опытные данные разных авторов, а также измерения профилей скорости, выполненные с использованием ЛДИС (лазерный доплеровский измеритель скорости) в прямоугольном безнапорном гладком канале НИУ МГСУ шириной 31 см при различных уклонах ($i = 0,00046 \div 0,007$) и наполнениях ($h = 1,3 \div 7,6$ см) в диапазоне чисел Рейнольдса $Re = \frac{4 \cdot V \cdot h}{\nu} = (20500 \div 485000)$. Измерения показали, что параметры K и C непостоянны и обнаруживают зависимость от коэффициента гидравлического сопротивления λ .

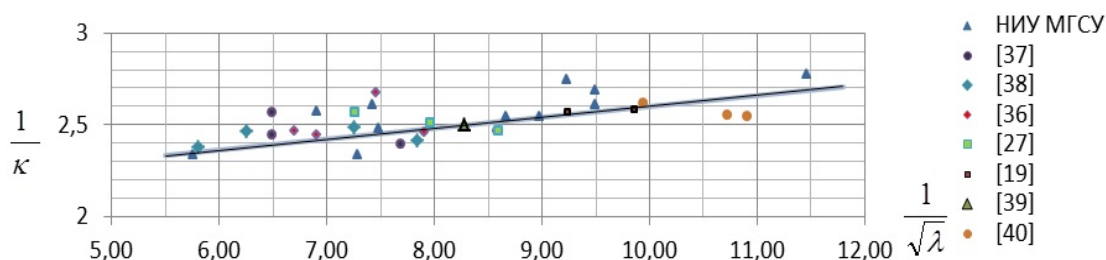


Рисунок 4. График изменения параметра Кармана K в зависимости от коэффициента гидравлического сопротивления λ по экспериментальным данным НИУ МГСУ, [19], [27], [36–40] в гладких каналах и пограничных слоях

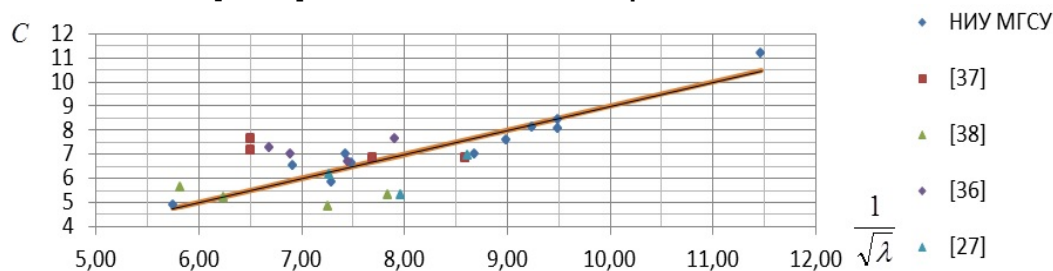


Рисунок 5. График изменения параметра C в зависимости от коэффициента гидравлического сопротивления λ по экспериментальным данным НИУ МГСУ и [27], [36–38] в гладких каналах

На основе экспериментальных данных получены следующие аппроксимационные зависимости для K и C при турбулентном течении в гладких широких каналах:

$$\frac{1}{K} = \frac{0,06}{\sqrt{\lambda}} + 2 \tag{21}$$

$$C = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} - 1 \tag{22}$$

Использование полученных данных по распределению скоростей в непосредственной близости от стенки и логарифмического профиля скорости за пределами буферной зоны, а также доказанной адекватности между коэффициентом перемежаемости \mathcal{U} и интегралом вероятности позволили рассчитать распределение скоростей в буферной зоне для различных значений коэффициента сопротивления λ .

Проверочные расчеты производились для условий опытов Лауфера [36], Конт-Белло [27], Хабахпашевой [41] и измерений, выполненных в гладком канале МГСУ. Порядок расчета для гладких каналов был следующим.

Rylova I.A. Utochnenie karakteristik turbulentnogo pristenochnogo techeniya v gladkom kanale s uchetom nestacionarnosti vyzkogo podsloya [Detailed characteristics of the near-wall flow containing unsteady viscous sublayer in smooth channel]. *Magazine of Civil Engineering*. 2016. No. 3. Pp. 40–52. doi: 10.5862/MCE.63.3 (rus)

При известных размерах поперечного сечения канала в зоне стабилизированного течения по измеренному профилю скорости определялась средняя профильная скорость течения V . Динамическая скорость u_* находилась по линейной части измеренного профиля в непосредственной близости от дна. По известному соотношению между динамической и средней скоростью находилась коэффициент гидравлического сопротивления λ . Динамическое число Рейнольдса, записанное в виде $\frac{u_* h}{\nu}$, использовалось для пересчета безразмерного соотношения $\frac{u_* z}{\nu}$ в координату $\frac{z}{h}$ там, где это было необходимо. Верхняя граница буферной зоны $\frac{u_* l_{p1}}{\nu}$ определялась по зависимости (16). Для обрабатываемых данных значения K и C принимались равными опытными значениям, найденным по измерениям в пределах слоя Прандтля, толщина которого оказалась близкой к толщине вытеснения пограничного слоя [42]:

$$\frac{l_{p2}}{h} = \frac{1,35\sqrt{\lambda}}{1 + 1,35\sqrt{\lambda}} \quad (23)$$

Коэффициент перемежаемости определялся по предложенной методике через интеграл вероятности (19), аргумент которого x принимался равным (20), при этом предполагалось, что $\sigma = \frac{1}{3} \frac{u_* l_{p1}}{\nu}$. Значение скорости в пределах буферной зоны находилось по зависимости (17) с использованием профилей (5) и (15) и найденного значения $\gamma = \Phi(x)$ для каждого значения x .

Результаты сравнения расчетных и опытных данных для буферной зоны течения приведены на рисунке 6.

Сопоставление результатов расчета по разработанной методике как в слое вязкого течения, так и в буферной зоне обнаруживают хорошую сходимость расчетных данных с результатами измерений автора и других авторитетных исследователей.

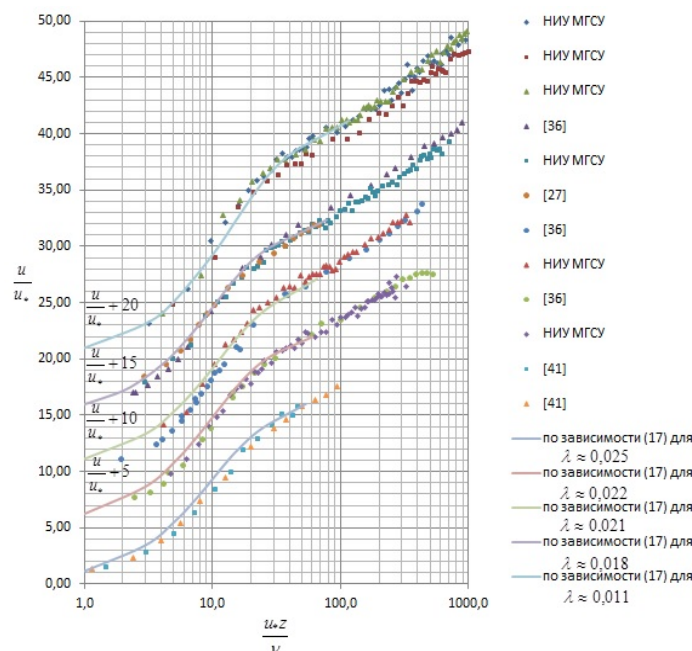


Рисунок 6. Сопоставление экспериментальных данных, выполненных в гладком канале НИУ МГСУ, а также [27], [36], [41] с расчетными данными по зависимости (17)

Заклучение

1. По данным разных авторов получены аппроксимационные зависимости, описывающие изменения стандартов продольных и вертикальных пульсаций скорости в пристенной зоне широких гладких каналов, нормированные динамической скоростью.

2. С использованием выражения для коэффициента взаимной корреляции продольной и вертикальной компоненты пульсационной скорости и найденных аппроксимаций для стандартов $\sqrt{u_x'^2}$ и $\sqrt{u_z'^2}$ получены турбулентная и вязкая составляющие трения в пристеночной зоне течения.

3. Определена толщина слоя, в пределах которого вязкая составляющая трения отлична от нуля.

4. Обработкой данных выполненных измерений определены значения параметров K и C для профилей скорости в гладких каналах.

5. Разработана модель перемежающегося течения и методика расчета распределения скоростей в буферной зоне с учетом уточненного профиля скорости в периоды вязкого течения и реальных значений K и C в логарифмическом профиле скорости, использование которой дает результаты расчета, согласующиеся с данными измерений в гладких каналах.

Литература

References

- | | |
|--|---|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Воробьев Г.А. Защита гидротехнических сооружений от кавитации. М.: Энергоатомиздат, 1990. 248 с. 2. Гидравлические расчеты водосбросных гидротехнических сооружений. Справочное пособие / под ред. А.Б. Векслера. М.: Энергоатомиздат, 1988. 624 с. 3. Киселев П.Г. Гидравлика. Основы механики жидкости. М.: Энергия, 1980. 360 с. 4. Петриченко М.Р., Харьков Н.С., Немова Д.В. Гидравлическая версия модели Буссинеска свободноконвективного движения в вертикальных щелях // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2014. № 4(207). С. 26-39. 5. Гиргидов А.Д. Гидравлика. Механика. Энергетика: избранные труды/ А.Д. Гиргидов. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. 458 с. 6. Россинский К.И., Дебольский В.К. Речные наносы. М.: Наука, 1980. 214 с. 7. Фидман Б.А. Турбулентность водных потоков. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 238 с. 8. Боровков В.С., Остякова А.В. Сальтационное движение частиц в потоке малой мутности // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2005. № 39. С. 33-37. 9. Einstein H.A., Li H. The viscous sublayer along a smooth boundary // Proc. Am. Soc. Civil Engrs. Paper. 1956. Vol. 82. paper No.945 10. Schubauer G.B., Klebanoff P.S. Contribution on the mechanics of boundary layer transition // NACA Rep. 1289. 1956. Pp. 853-863. 11. Богомолов А.И., Боровков В.С., Майрановский Ф.Г. Высокоскоростные потоки со свободной поверхностью. М.: Стройиздат, 1979. 344 с. 12. Emmons H.W., Bryson A. E. The laminar-turbulent transition in a boundary layer // Part I: JAS. 1951. No.18. Pp. 490-498; Part II: Proc. First US National Congress Appl. Mech. 1952. Pp. 859-868. 13. Dryden H.L. Recent investigation of the problem of transition // ZFW. 1956. No.4. Pp. 89-95. 14. Боровков В.С., Брянская Ю.В. Расчет сопротивления в переходной области с учетом перемежаемости течения в вязком подслое // Гидротехническое строительство. 2001. №7. С. 20-22. 15. Hutchins N., Marusic I. Evidence of very long meandering | <ol style="list-style-type: none"> 1. Vorobyev G.A. <i>Zashchita gidrotekhnicheskikh sooruzheniy ot kavitatsii</i> [Protection from cavitation damage of hydraulic structures]. Moscow: Energoatomizdat, 1990. 248 p. (rus) 2. <i>Gidravlicheskiye raschety vodosbrosnykh gidrotekhnicheskikh sooruzheniy</i>. [Calculations spillways and hydraulic structures]. Spravochnoe posobie / pod red. A.B. Vekslera. Moscow: Energoatomizdat, 1988. 624 p. (rus) 3. Kiselev P.G. <i>Gidravlika. Osnovy mekhaniki zhidkosti</i> [Hydraulics. Foundation of fluid mechanics.] Moscow: Energiya, 1980. 360 p. (rus) 4. Petrichenko M.R., Kharkov N.S., Nemova D.V. <i>Gidravlicheskaya versiya modeli Bussineska svobodno-konvektivnogo dvizheniya v vertikalnykh shchelyakh</i> [Hydraulic version of the Boussinesq model of free convective motion in vertical slits]. <i>Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU</i>. 2014. No. 4(207). Pp. 26-39. (rus) 5. Girgidov A.D. <i>Gidravlika. Mekhanika. Energetika: izbrannyye trudy</i> [Hydraulics. Mechanics. Energy: Selected Papers]. Sankt-Petersburg: Izd-vo Politehn. un-ta, 2014. 458 p. (rus) 6. Rossinskij K.I., Debol'skij V.K. <i>Rechnye nanosy</i> [River sediments]. Moscow: Science, 1980. 214 p. (rus) 7. Fidman B.A. <i>Turbulentnost vodnykh potokov</i> [Turbulence of water flows]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1991. 238 p. (rus) 8. Borovkov V.S., Ostyakova A.V. <i>Saltatsionnoye dvizheniye chastiits v potoke maloy mutnosti</i> [Saltation of solid particles in flows of low turbidity]. <i>Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU</i>. 2005. № 39. Pp. 33-37. (rus) 9. Einstein H.A., Li H. The viscous sublayer along a smooth boundary. <i>Proc. Am. Soc. Civil Engrs. Paper</i>. 1956. vol. 82. paper No. 945. 10. Schubauer G.B., Klebanoff P.S. Contribution on the mechanics of boundary layer transition. <i>NACA Rep. 1289</i>. 1956. Pp. 853-863. 11. Bogomolov A.I., Borovkov V.S., Mayranovskiy F.G. <i>Vysokoskorostnyye potoki so svobodnoy poverkhnostyu</i> [Highspeedy flows with free surface]. Moscow: Build. Publ. 1979. 344 p. (rus) 12. Emmons H.W., Bryson A. E. The laminar-turbulent transition in a boundary layer. Part I: JAS. 1951. No.18. Pp. 490-498; Part II: <i>Proc. First US National Congress Appl. Mech.</i> 1952. Pp. 859-868. |
|--|---|

Rylova I.A. Utochnenie harakteristik turbulentnogo pristenochnogo techeniya v gladkom kanale s uchetom nestacionarnosti vyazkogo podsloya [Detailed characteristics of the near-wall flow containing unsteady viscous sublayer in smooth channel]. *Magazine of Civil Engineering*. 2016. No. 3. Pp. 40–52. doi: 10.5862/MCE.63.3 (rus)

- features in the logarithmic region of turbulent boundary layers // *J. Fluid Mech.* 2007. vol. 579. Pp. 1–28.
16. Mikhailov M.D., Freire A. P. S. Feasible domain of Walker's unsteady wall-layer model for the velocity profile in turbulent flows // *Annals of the Brazilian Academy of Sciences.* 2014. No. 86 (4). Pp. 2121-2135.
 17. Mazzuoli M., Vittori G., Blondeaux P. Turbulent spots in a Stokes boundary layer // *Journal of Physics: Conference Series.* 2011. vol. 318 (032032). Pp. 1-10.
 18. Chauhan K., Philip J., de Silva Ch. M., Hutchins N., Marusic I. The turbulent/non-turbulent interface and entrainment in a boundary layer // *J. Fluid Mech.* 2014. vol. 742. Pp. 119-151.
 19. de Silva C. M., Gnanamanickam E. P., Atkinson C., Buchmann N. A., Hutchins N., Soria J., Marusic I. High spatial range velocity measurements in a high Reynolds number turbulent boundary layer // *Physics of fluids.* 2014. No.26 (025117). Pp.1-19.
 20. de Silva Ch. M., Hutchins N., Marusic I. Uniform momentum zones in turbulent boundary layers // *J. Fluid Mech.* 2016. vol. 786. Pp. 309-331.
 21. Ньютон И. Математические начала натуральной философии/ Перевод с латинского и примечания А.Н. Крылова. М.: Наука, 1989. 688 с.
 22. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1987. 840 с.
 23. Nikuradse I. Gesetzmässigkeiten der turbulenten Stroemung in glatten Rohren // *Forschungs-heft (Forschungs auf dem Gebiete des Ingenieur-wesens).* 1932. No. 356. Pp.1-36.
 24. Buschmann M.H., Gad-el-Hak M. Turbulent boundary layers: reality and myth. // *IJCSM.* 2007. vol. 1. Issue 2-4. Pp. 159-176.
 25. Knopp T., Schanz D., Schröder A., Dumitra M., Cierpka C., Hain R., Kähler C.J. Experimental investigation of the log-law for an adverse pressure gradient turbulent boundary layer flow at $Re_\theta = 10000$. // *Flow, Turbulence and Combustion.* 2014. Vol. 92. Pp. 451-471.
 26. George W.K. Is there a universal log law for turbulent wall-bounded flows? // *Phil. Trans. R. Soc. A.* 2007. No. 365. Pp.789-806.
 27. Конт-Белло Ж. Турбулентное течение в канале с параллельными стенками/ Пер. с франц. М.: Мир, 1968. 174 с.
 28. Laufer, J. The structure of turbulence in fully developed pipe flow // *NACA Rep.* 1174. 1954. P. 1-18
 29. Klebanoff P. S. Characteristics of turbulence in boundary layer with zero pressure gradient // *NACA Rep.* 1247. 1955. Pp. 1-19.
 30. Хабахпашева Е.М. Некоторые данные о структуре течения в вязком подслое// Проблемы теплофизики и физической гидродинамики. Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1974. С. 223-235.
 31. Ибрагимов М.Х., Субботин В.И., Бобков В.П., Сабелев Г.И., Таранов Г.С. Структура турбулентного потока и механизм теплообмена в каналах. Москва: Атомиздат, 1978. 296 с.
 32. Карман Т. Некоторые вопросы теории турбулентности// Проблемы турбулентности. М-Л.: Изд-во ОНТИ НКТП, 1936. С. 35-74.
 33. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1969. 742 с.
 34. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗов. Изд.9. М.: Гос. Изд. Физико-математической литературы, 1962. 608 с.
 35. Прандтль Л. Результаты работ последнего времени по изучению турбулентности // Проблемы турбулентности. М-Л.: Изд-во ОНТИ НКТП, 1936. С. 9-35.
 36. Laufer J. Investigation of turbulent flow in a two-dimensional
 13. Dryden H.L. Recent investigation of the problem of transition. *ZFW.* 1956. No.4. Pp. 89-95.
 14. Borovkov V.S., Bryanskaya Yu.V. Raschet soprotivleniya v perekhodnoy oblasti s uchetom peremeshayemosti techeniya v vyazkom podslome podslome [Transitional Resistance Calculation in the Transitional Zone with Account for the Flow Intermittency inside the Viscous Sublayer]. *Gidrotehnicheskoe stroitel'stvo.* 2001. No 7. Pp. 20-22. (rus)
 15. Hutchins N., Marusic I. Evidence of very long meandering features in the logarithmic region of turbulent boundary layers. *J. Fluid Mech.* 2007. vol. 579. Pp. 1–28.
 16. Mikhailov M.D., Freire A. P. S. Feasible domain of Walker's unsteady wall-layer model for the velocity profile in turbulent flows. *Annals of the Brazilian Academy of Sciences.* 2014. No. 86 (4). Pp. 2121-2135.
 17. Mazzuoli M., Vittori G., Blondeaux P. Turbulent spots in a Stokes boundary layer. *Journal of Physics: Conference Series.* 2011. vol. 318 (032032). Pp. 1-10.
 18. Chauhan K., Philip J., de Silva Ch. M., Hutchins N., Marusic I. The turbulent/non-turbulent interface and entrainment in a boundary layer. *J. Fluid Mech.* 2014. vol. 742. Pp. 119-151.
 19. de Silva C. M., Gnanamanickam E. P., Atkinson C., Buchmann N. A., Hutchins N., Soria J., Marusic I. High spatial range velocity measurements in a high Reynolds number turbulent boundary layer. *Physics of fluids.* 2014. No.26 (025117). Pp.1-19.
 20. de Silva Ch. M., Hutchins N., Marusic I. Uniform momentum zones in turbulent boundary layers. *J. Fluid Mech.* 2016. vol. 786. Pp. 309-331.
 21. Nyuton I. *Matematicheskiye nachala naturalnoy filosofii* [Mathematical Principles of Natural Philosophy. Translated from the Latin and notes AN Krylov.] Moscow: Science, 1989. 688 p. (rus)
 22. Loytsyanskiy L.G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Fluid Mechanics]. Moscow: Science, 1987. 840 p. (rus)
 23. Nikuradse I. Gesetzmässigkeiten der turbulenten Stroemung in glatten Rohren. *Forschungs-heft (Forschungs auf dem Gebiete des Ingenieur-wesens).* 1932. No. 356. Pp.1-36.
 24. Buschmann M.H., Gad-el-Hak M. Turbulent boundary layers: reality and myth. *IJCSM.* 2007. vol. 1. Issue 2-4. Pp. 159-176.
 25. Knopp T., Schanz D., Schröder A., Dumitra M., Cierpka C., Hain R., Kähler C.J. Experimental investigation of the log-law for an adverse pressure gradient turbulent boundary layer flow at $Re_\theta = 10000$. *Flow, Turbulence and Combustion.* 2014. Vol. 92. Pp. 451-471.
 26. George W.K. Is there a universal log law for turbulent wall-bounded flows? *Phil. Trans. R. Soc. A.* 2007. No. 365. Pp.789-806.
 27. Kont-Bello Zh. *Turbulentnoye techeniye v kanale s parallelnymi stenkami* [Turbulent flow in a channel with parallel walls]. Moscow: Mir, 1968. 174 p. (rus)
 28. Laufer, J. The structure of turbulence in fully developed pipe flow. *NACA Rep.* 1174. 1954. Pp. 1-18
 29. Klebanoff P. S. Characteristics of turbulence in boundary layer with zero pressure gradient. *NACA Rep.* 1247. 1955. Pp. 1-19.
 30. Khabakhpasheva Ye.M. Nekotoryye dannyye o strukture techeniya v vyazkom podslomepodslome [Some data on the structure of the flow in the viscous sublayer]. *Problemy teplofiziki i fizicheskoy gidrodinamiki.* Novosibirsk: Izd-vo SO AN SSSR, 1974. Pp. 223-235. (rus)
 31. Ibragimov M.Kh., Subbotin V.I., Bobkov V.P., Sabelev G.I., Taranov G.S. *Struktura turbulentnogo potoka i mekhanizm teploobmena v kanalakh* [Structure of turbulent flow and mechanism of heat exchange in channels]. Moscow: Atomizdat, 1978. 296 p. (rus)

Рылова И.А. Уточнение характеристик турбулентного пристеночного течения в гладком канале с учетом нестационарности вязкого подслоя // *Инженерно-строительный журнал.* 2016. № 3(63). С. 40–52.

- channel // NACA Rep. 1053. 1951. Pp. 1-20.
37. Wei T., Schmidt R., McMurtry P. Comment on the Clauser chart method for determining the friction velocity // *Experiments in Fluids*. 2005. No. 38: Pp. 695–699.
 38. Rona, A., Monti, M., Airiau, C. On the generation of the mean velocity profile for turbulent boundary layers with pressure gradient under equilibrium conditions // *The Aeronautical Journal*. 2012. Vol. 116. No. 1180.
 39. Harun Z., Monty J.P., Mathis R., Marusic I. Pressure gradient effects on the large-scale structure of turbulent boundary layers // *J. Fluid Mech.* 2013. vol. 715. Pp. 477-498.
 40. Marusic I., Monty J.P., Hultmark M., Smits A.J. On the logarithmic region in wall turbulence // *J. Fluid Mech.* 2013. vol. 716, R3. Pp. 1-11.
 41. Кутателадзе С.С., Миронов Б.П., Накоряков В.Е., Хабахпашева Е.М. Экспериментальное исследование пристенных турбулентных течений. Новосибирск: Наука, 1975. 166 с.
 42. Боровков В.С., Волшаник В.В., Рылова И.А. Характерные особенности распределения скоростей в турбулентном потоке // *Вестник МГСУ*. 2015. №6. С.103-109.
 32. Karman T. Nekotoryye voprosy teorii turbulentnosti // *Problemy turbulentnosti*. M-L.: Izd-vo ONTI NKTP, 1936. Pp. 35-74. (rus)
 33. Shlikhting G. Teoriya pogranchnogo sloya. M.: Nauka, 1969. 742 p. (rus)
 34. Bronshteyn I.N., Semendyayev K.A. *Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya VTUZov. Izd.9* [Handbook of mathematics for engineers and technical colleges students]. Moscow: Gos. Izd. Fiziko-matematicheskoy literatury, 1962. 608 p. (rus)
 35. Prandtl L. Rezultaty robot poslednego vremeni po izucheniyu turbulentnosti [The results of recent work on the study of turbulence] // *Problemy turbulentnosti* [Problems of turbulence] Publ. Moscow-Leningrad: ONTI NKTP, 1936. Pp. 9-35. (rus)
 36. Laufer J. Investigation of turbulent flow in a two-dimensional channel. *NACA Rep. 1053*. 1951. Pp. 1-20.
 37. Wei T., Schmidt R., McMurtry P. Comment on the Clauser chart method for determining the friction velocity. *Experiments in Fluids*. 2005. No. 38. Pp. 695–699.
 38. Rona, A., Monti, M., Airiau, C. On the generation of the mean velocity profile for turbulent boundary layers with pressure gradient under equilibrium conditions. *The Aeronautical Journal*. 2012. Vol. 116. No. 1180.
 39. Harun Z., Monty J.P., Mathis R., Marusic I. Pressure gradient effects on the large-scale structure of turbulent boundary layers. *J. Fluid Mech.* 2013. vol. 715. Pp. 477-498.
 40. Marusic I., Monty J.P., Hultmark M., Smits A.J. On the logarithmic region in wall turbulence. *J. Fluid Mech.* 2013. vol. 716, R3. Pp. 1-11.
 41. Kutateladze S.S., Mironov B.P., Nakoryakov V.Ye., Khabakhpasheva Ye.M. *Eksperimentalnoye issledovaniye pristennykh turbulentnykh techeniy* [Experimental investigation of near-wall turbulent flows]. Novosibirsk: Science. 1975. 166 p. (rus)
 42. Borovkov V.S., Volshaniк V.V., Rylova I.A. *Kharakternyye osobennosti raspredeleniya skorostey v turbulentnom potoke* [Features of the velocity distribution in a turbulent flow]. *Vestnik MGSU*. 2015. No 6. Pp.103-109. (rus)

Ирина Александровна Рылова,
+7(926)2215937; эл. почта:
mariposa516@yandex.ru

Irina Rylova,
+7(926)2215937; mariposa516@yandex.ru

© Рылова И.А., 2016

Rylova I.A. Utochnenie harakteristik turbulentnogo pristenochnogo techeniya v gladkom kanale s uchedom nestacionarnosti vyazkogo podsloya [Detailed characteristics of the near-wall flow containing unsteady viscous sublayer in smooth channel]. *Magazine of Civil Engineering*. 2016. No. 3. Pp. 40–52. doi: 10.5862/MCE.63.3 (rus)