

УДК 621.396.96.001(07)

А. А. Кишкин, А. А. Зуев, М. Г. Мелкозеров, Е. В. Черненко, А. С. Константинов

## ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРНЫЕ ТОЛЩИНЫ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЗАКОНАХ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ

Проведено исследование степенного и градиентного профиля распределения скорости, получены выражения для относительных характеристик толщины динамического пространственного пограничного слоя. С учетом отношения толщины потери импульса получено выражение для закона трения градиентного профиля распределения скорости.

**Ключевые слова:** пространственно пограничный слой, толщина потери импульса, толщина вытеснения, закон распределения профиля скорости, закон трения.

Существующие на сегодняшний день логарифмические и степенные профили для аппроксимации эпюры скорости в пристеночном пограничном слое (рис. 1) имеют существенные недостатки [1].

При логарифмическом законе распределения при  $\bar{y} \rightarrow 0$ ;  $\bar{u} \rightarrow -\infty$ , что физически нереально, логарифмическая формула не может описывать распределение скоростей турбулентного потока в непосредственной близости от стенки, поскольку существует вязкий подслой, течение в котором характеризуется значительным влиянием сил вязкости и определяется почти линейным законом распределения ( $\tau_0 = \mu \frac{du}{dy} = \text{const}$  и  $\frac{du}{dy} = \text{const}$ ), подобно ламинарному безнапорному течению (течению Куэтта).

Кроме того,  $\frac{\partial u}{\partial y} \neq 0$  на толщине пограничного слоя (на оси трубы) как для степенного, так и для логарифмического профиля. Между тем, естественным условием на оси, подтверждаемым опытными данными, является  $\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_{y=\delta=R} = 0$ . Несмотря на эти недостатки профили (рис. 1) в основной части турбулентного ядра потока со-

гласуются с опытными данными многих исследователей. Согласно Л. Прандтлю [2] установлен теоретический закон распределения скорости в поперечном сечении турбулентного потока в цилиндрической трубе, где  $y$  – расстояние от оси трубы либо от верхней границы пограничного слоя:

$$u = U - \frac{U^*}{\chi} \ln \frac{R}{R-y}, \quad (1)$$

где  $U$  – скорость на оси трубы;  $R$  – радиус трубы или толщина пограничного слоя  $\delta$ ;  $\chi$  – опытный числовой коэффициент;  $U^* = \left(\frac{\tau_0}{\rho}\right)^{0.5}$  – динамическая скорость;  $\tau_0 = \lambda \rho \frac{U_{cp}}{8}$  – напряжение трения;  $U_{cp}$  – средняя скорость.

Приближенно распределение скоростей при турбулентном течении предлагается оценивать вместо формулы (1) выражением

$$\frac{U-u}{U} = \left(\frac{y}{R}\right)^m, \quad (2)$$

при  $y=0$  – точка на оси трубы  $u=U$  – согласуется с теоретическим значением (1). Примем более удобное для нашего случая обозначение  $y$  как расстояние от непод-

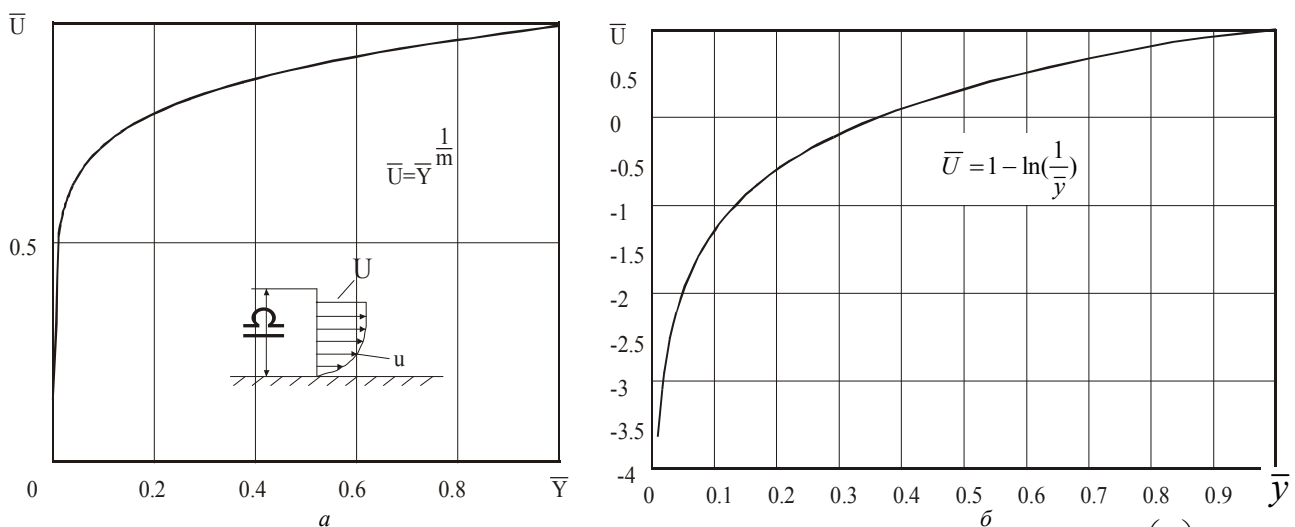


Рис. 1. Степенной (а) и логарифмический (б) профили скоростей в пристеночном пограничном слое:  $\bar{y} = \left(\frac{y}{\delta}\right)$  – относительная координата;  $\delta$  – толщина пограничного слоя;  $\bar{u} = \frac{u}{U}$  – относительная скорость

вижной стенки, тогда формула (2) преобразуется следующим образом:

$$\frac{U-u}{U} = \left( \frac{R-y}{R} \right)^m, \quad (3)$$

или после преобразований с учетом  $\bar{u} = \frac{u}{U}$ ;  $\bar{y} = \frac{y}{R}$  получим уравнение, выразив  $\bar{u}$ :

$$\bar{u} = 1 - (1 - \bar{y})^m. \quad (4)$$

Графически зависимость (4) представлена на рис. 2 совместно с выражением:

$$\bar{u} = \bar{y}^{\frac{1}{m}}. \quad (5)$$

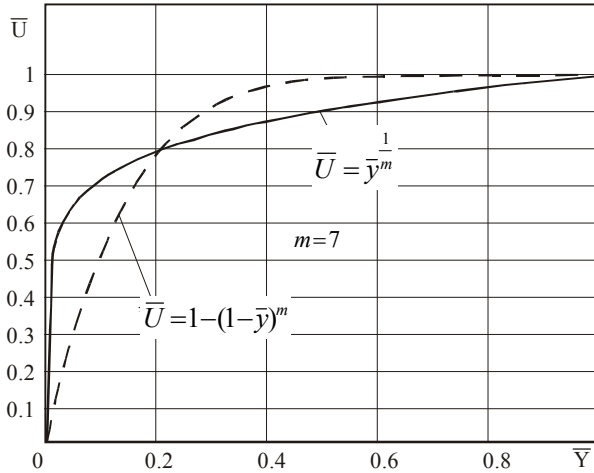


Рис. 2. Распределение профилей скоростей градиентного и степенного закона

Следует отметить, что профиль (2) не имеет недостатков логарифмического (1) и степенного (5) профилей: в центре трубы  $\frac{\partial u}{\partial R} = 0$  и производную на неподвижной стенке:

$$\frac{\partial}{\partial \bar{y}} [1 - (1 - \bar{y})^m] = m(1 - \bar{y})^{m-1}. \quad (6)$$

Основные выражения для характерных толщин ППС степенного закона (5):

– толщина вытеснения

$$\begin{aligned} \delta_{\varphi}^* &= \int_0^{\delta} \left( 1 - \frac{u}{U} \right) dy = \\ &= \int_0^{\delta} \left[ 1 - \left( \frac{y}{\delta} \right)^{\frac{1}{m}} \right] dy = \frac{\delta}{m+1} = \delta^*; \end{aligned} \quad (7)$$

– толщина потери импульса продольного потока

$$\begin{aligned} \delta_{\varphi}^{**} &= \int_0^{\delta} \frac{u}{U} \left( 1 - \frac{u}{U} \right) dy = \int_0^{\delta} \left( \frac{y}{\delta} \right)^{\frac{1}{m}} \times \\ &\times \left[ 1 - \left( \frac{y}{\delta} \right)^{\frac{1}{m}} \right] dy = \frac{m}{(m+1)(m+2)} \delta. \end{aligned} \quad (8)$$

Относительная характерная толщина ( $H$ ) для степенного закона распределения профиля скорости рассчитывается по выражению

$$H = \frac{\delta_{\varphi}^*}{\delta_{\varphi}^{**}} = \frac{\delta}{(m+1)} \frac{(m+1)(m+2)}{\delta m} = \frac{m+2}{m}. \quad (9)$$

Толщина потери импульса продольного потока в поперечном направлении для степенного закона распределения профиля скорости (учтем, что профиль поперечной скорости выбираем по рекомендации) [3]:

$$w = U \varepsilon \frac{u}{U} \left( 1 - \left( \frac{u}{U} \right)^3 \right); \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \delta_{\varphi\psi}^{**} &= \int_0^{\delta} \left( 1 - \frac{u}{U} \right) \frac{w}{U} dy = \int_0^{\delta} \left( 1 - \frac{y}{\delta} \right)^{\frac{1}{m}} \times \\ &\times \varepsilon \left( \frac{y}{\delta} \right)^{\frac{1}{m}} \left[ 1 - \left( \frac{y}{\delta} \right)^{\frac{3}{m}} \right] dy = \\ &= \varepsilon \delta m \left( \frac{1}{m+1} - \frac{1}{m+2} - \frac{1}{m+4} + \frac{1}{m+5} \right) = \\ &= \frac{\varepsilon \delta m (6m+18)}{(m+1)(m+2)(m+3)(m+4)(m+5)}, \end{aligned} \quad (11)$$

где  $\varepsilon$  – тангенс скоса данной линии тока.

Относительная характерная толщина ( $J$ ) для степенного закона распределения профиля скорости с учетом (11), (8) находится по выражению

$$J = \frac{1}{\varepsilon} \frac{\delta_{\varphi\psi}^{**}}{\delta_{\varphi}^{**}} = \frac{6(m+3)}{(m+4)(m+5)}. \quad (12)$$

Толщина потери импульса поперечного потока в продольном направлении для степенного закона распределения профиля скорости:

$$\begin{aligned} \delta_{\varphi\psi}^{**} &= \int_0^{\delta} \frac{w}{U} \frac{u}{U} dy = \int_0^{\delta} \varepsilon \frac{u}{U} \left( 1 - \left( \frac{u}{U} \right)^3 \right) \frac{u}{U} dy = \\ &= \varepsilon \int_0^{\delta} \left[ \left( \frac{y}{\delta} \right)^{\frac{2}{m}} + \left( \frac{y}{\delta} \right)^{\frac{3}{m}} \right] dy = \\ &= \varepsilon \delta m \left( \frac{1}{m+2} - \frac{1}{m+5} \right) = \varepsilon \delta \frac{3m}{(m+2)(m+5)}. \end{aligned} \quad (13)$$

Относительная характерная величина ( $M$ ) для степенного закона распределения профиля скорости с учетом (13), (8) имеет вид

$$M = \frac{1}{\varepsilon} \frac{\delta_{\varphi\psi}^{**}}{\delta_{\varphi}^{**}} = \frac{3(m+1)}{m+5}. \quad (14)$$

Толщина вытеснения поперечного потока рассчитывается по формуле

$$\delta_{\psi}^* = \int_0^{\delta} \frac{w}{U} dy = \int_0^{\delta} \varepsilon \frac{u}{U} \left( 1 - \left( \frac{u}{U} \right)^3 \right) dy = \varepsilon \delta \frac{3m}{(m+1)(m+4)}. \quad (15)$$

Обратим внимание, что  $\delta_{\varphi\psi}^{**} = \delta_{\psi}^* - \delta_{\varphi\psi}^{**}$  [3], тогда с учетом (15) и (11) получаем выражение, тождественное (13):

$$\begin{aligned} \delta_{\varphi\psi}^{**} &= \delta_{\psi}^* - \delta_{\varphi\psi}^{**} = \varepsilon \delta \frac{3m}{(m+1)(m+4)} - \\ &- \varepsilon \delta \frac{m(6m+18)}{(m+1)(m+2)(m+4)(m+5)} = \\ &= \frac{\varepsilon \delta m}{(m+1)(m+4)} \left( \frac{3m^2 + 15m + 12}{(m+2)(m+5)} \right) = \\ &= \varepsilon \delta \frac{3m}{(m+2)(m+5)}. \end{aligned}$$

Толщина потери импульса поперечного потока степенного закона распределения профиля скорости имеет вид

$$\begin{aligned} \delta_{\psi}^{**} &= \int_0^{\delta} \frac{\omega^2}{U^2} dy = \int_0^{\delta} \varepsilon^2 \left( \frac{u}{U} \right)^2 \left( 1 - \left( \frac{u}{U} \right)^3 \right)^2 dy = \\ &= \int_0^{\delta} \varepsilon^2 \left( \frac{u}{U} - \left( \frac{u}{U} \right)^4 \right)^2 dy = \\ \varepsilon^2 &= \int_0^{\delta} \left( \left( \frac{y}{\delta} \right)^{\frac{2}{m}} - 2 \left( \frac{y}{\delta} \right)^{\frac{5}{m}} + \left( \frac{y}{\delta} \right)^{\frac{8}{m}} \right) dy = \\ &= \varepsilon^2 \delta m \left( \frac{(1-m)(m+8) + (m+2)(m+5)}{(m+2)(m+5)(m+8)} \right) = \\ &= \varepsilon^2 \delta \frac{18m}{(m+2)(m+5)(m+8)} = \delta_{\psi}^{**}. \end{aligned} \quad (16)$$

Относительная характерная толщина ( $L$ ) для степенного закона распределения профиля скорости с учетом (16) и (8) равна

$$L = \frac{1}{\varepsilon^2} \frac{\delta_{\psi}^{**}}{\delta_{\phi}^{**}} = \frac{18(m+1)}{(m+5)(m+8)}. \quad (17)$$

Относительная характерная толщина ( $F$ ) связана с другими [3] и имеет вид

$$F = \frac{L}{JM}. \quad (18)$$

Относительная (существенно положительная) характерная величина ( $K$ ) для степенного закона распределения профиля скорости находится по уравнению

$$\begin{aligned} K &= M + J = \frac{1}{\varepsilon} \frac{\delta_{\psi\phi}^{**}}{\delta_{\phi}^{**}} + \frac{1}{\varepsilon} \frac{\delta_{\phi\psi}^{**}}{\delta_{\phi}^{**}} = \\ &= \frac{484m^4 + 367m^3 + 115m^2 + 17m + 1}{(3m+1)^2(4m+1)(5m+1)}. \end{aligned}$$

Рассмотрим аналогичные толщины ППС для закона профиля (4),  $\bar{u} = 1 - (1 - \bar{y})^m$ , толщина вытеснения ( $\delta_{\phi}^*$ ) выглядит следующим образом:

$$\delta_{\phi}^* = \int_0^{\delta} \left( 1 - \frac{u}{U} \right) dy = \int_0^{\delta} \left( 1 - \left( 1 - \frac{y}{\delta} \right)^m \right) dy.$$

Произведя замену переменных  $z = 1 - \frac{y}{\delta}$ ;  $dz = -\frac{dy}{\delta}$ , получим выражение

$$\delta_{\phi}^* = \frac{\delta}{m+1}. \quad (19)$$

Толщина потери импульса продольного потока составит

$$\delta_{\phi}^{**} = \int_0^{\delta} \frac{u}{U} \left( 1 - \frac{u}{U} \right) dy = \int_0^{\delta} \left( 1 - \left( 1 - \frac{y}{\delta} \right)^m \right) \left( 1 - \frac{y}{\delta} \right)^m dy.$$

Произведя аналогичную (19) замену переменных, получим формулу

$$\delta_{\phi}^{**} = \frac{\delta m}{(m+1)(2m+1)}. \quad (20)$$

Относительная характерная толщина ( $H$ ) для градиентного закона распределения профиля скорости имеет вид

$$H = \frac{\delta_{\phi}^*}{\delta_{\phi}^{**}} = \frac{\delta}{(m+1)} \frac{(m+1)(2m+1)}{\delta m} = \frac{2m+1}{m}. \quad (21)$$

Учтем, что профиль поперечной скорости [4] определяется выражением (10), толщина потери импульса продольного потока в поперечном направлении выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} \delta_{\phi\psi}^{**} &= \int_0^{\delta} \left( 1 - \frac{u}{U} \right) \frac{w}{U} dy = \int_0^{\delta} \left( 1 - \frac{y}{\delta} \right)^m \varepsilon \times \\ &\times \left( 1 - \left( 1 - \frac{y}{\delta} \right)^m \right) \left[ 1 - \left( 1 - \left( 1 - \frac{y}{\delta} \right)^m \right)^3 \right] dy, \end{aligned}$$

сделав подстановку (19), после достаточно громоздких преобразований получим выражение

$$\delta_{\phi\psi}^{**} = \varepsilon \delta \left( \frac{3}{2m+1} - \frac{6}{3m+1} + \frac{4}{4m+1} - \frac{1}{5m+1} \right),$$

или в другом виде

$$\delta_{\phi\psi}^{**} = \frac{\varepsilon \delta m (36m^2 + 11m + 1)}{(2m+1)(2m+1)(4m+1)(5m+1)}. \quad (22)$$

Относительная характерная толщина ( $J$ ) для закона профиля (4) с учетом (20) и (22):

$$J = \frac{1}{\varepsilon} \frac{\delta_{\phi\psi}^{**}}{\delta_{\phi}^{**}} = \frac{(m+1)(36m^2 + 11m + 1)}{(3m+1)(4m+1)(5m+1)}. \quad (23)$$

Толщина потери импульса поперечного потока в продольном направлении для закона профиля (4) рассчитывается по выражению

$$\begin{aligned} \delta_{\psi\phi}^{**} &= \int_0^{\delta} \frac{w}{U} \frac{u}{U} dy = \varepsilon \int_0^{\delta} \frac{u}{U} \left( 1 - \left( \frac{u}{U} \right)^3 \right) \frac{u}{U} dy = \\ &= \varepsilon \int_0^{\delta} \left[ \left( 1 - \left( 1 - \frac{y}{\delta} \right)^m \right)^2 - \left( 1 - \left( 1 - \frac{y}{\delta} \right)^m \right)^5 \right] dy. \end{aligned}$$

Произведя замену переменных (19), после интегрирования имеем

$$\delta_{\psi\phi}^{**} = \varepsilon \delta \left( \frac{3}{m+1} - \frac{9}{2m+1} + \frac{10}{3m+1} - \frac{5}{4m+1} + \frac{1}{5m+1} \right),$$

или в другом виде

$$\delta_{\psi\phi}^{**} = \frac{2\varepsilon \delta m^2 (47m^2 + 12m + 1)}{(m+1)(2m+1)(3m+1)(4m+1)(5m+1)}. \quad (24)$$

Относительная характерная величина ( $M$ ) для градиентного закона распределения профиля скорости с учетом (24) и (20):

$$\begin{aligned} M &= \frac{1}{\varepsilon} \frac{\delta_{\psi\phi}^{**}}{\delta_{\phi}^{**}} = \\ &= \frac{1}{\varepsilon} \frac{\varepsilon \delta 2m^2 (47m^2 + 12m + 1)}{(m+1)(2m+1)(3m+1)(4m+1)(5m+1)} \times \\ &\times \frac{(m+1)(2m+1)}{\delta m} = \frac{2m(47m^2 + 12m + 1)}{(3m+1)(3m+1)(5m+1)}. \end{aligned} \quad (25)$$

Толщина вытеснения поперечного потока имеет вид

$$\begin{aligned} \delta_{\psi}^* &= \int_0^{\delta} \frac{w}{U} dy = \int_0^{\delta} \varepsilon \frac{u}{U} \left( 1 - \left( \frac{u}{U} \right)^3 \right) dy = \\ &= \varepsilon \int_0^{\delta} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{y}{\delta} \right)^m - \left( 1 - \left( 1 - \frac{y}{\delta} \right)^m \right)^4 \right] dy, \end{aligned}$$

После замены переменных (19) и интегрирования получаем выражение:

$$\delta_{\psi}^* = \varepsilon \delta \left( \frac{3}{m+1} - \frac{6}{2m+1} + \frac{4}{3m+1} - \frac{1}{4m+1} \right),$$

или

$$\delta_{\psi}^* = \frac{\varepsilon \delta (26m^3 + 9m^2 + m)}{(m+1)(2m+1)(3m+1)(4m+1)}. \quad (26)$$

Отметим, что проверка по выражению

$$\begin{aligned} \delta_{\psi\varphi}^{**} &= \delta_{\psi}^* - \delta_{\varphi\psi}^{**} = \frac{\varepsilon \delta (26m^3 + 9m^2 + m)}{(m+1)(2m+1)(3m+1)(4m+1)} - \\ &= \frac{\varepsilon \delta (36m^3 + 11m^2 + m)}{(2m+1)(3m+1)(4m+1)(5m+1)} = \\ &= \frac{2\varepsilon \delta m^2 (47m^2 + 12m + 1)}{(m+1)(2m+1)(3m+1)(4m+1)(5m+1)} \end{aligned}$$

дает результат, аналогичный уравнению (24).

Толщина потери импульса поперечного потока для закона профиля (4):

$$\begin{aligned} \delta_{\psi}^{**} &= \int_0^{\delta} \frac{w^2}{U^2} dy = \varepsilon^2 \int_0^{\delta} \left( \frac{u}{U} - \left( \frac{u}{U} \right)^4 \right)^2 dy = \\ &= \varepsilon^2 \int_0^{\delta} \left[ \left( 1 - \left( 1 - \frac{y}{\delta} \right)^m \right)^2 - 2 \left( 1 - \left( 1 - \frac{y}{\delta} \right)^m \right)^5 + \right. \\ &\quad \left. + \left( 1 - \left( 1 - \frac{y}{\delta} \right)^m \right)^8 \right] dy. \end{aligned}$$

После замены переменных (19), интегрирования и достаточно громоздких преобразований получим выражение

$$\delta_{\psi}^{**} = \varepsilon^2 \delta \left( \frac{9}{2m+1} - \frac{36}{3m+1} + \frac{60}{4m+1} - \frac{54}{5m+1} + \frac{28}{6m+1} - \frac{8}{7m+1} + \frac{1}{8m+1} \right),$$

или

$$\delta_{\psi}^{**} = \frac{2\varepsilon^2 \delta m^2 (7032m^4 + 2602m^3 + 413m^2 + 32m + 1)}{(2m+1)(3m+1)(4m+1) \times (5m+1)(6m+1)(7m+1)(8m+1)}. \quad (27)$$

Относительная характерная толщина ( $L$ ) для градиентного закона распределения профиля скорости с учетом (27) и (20):

$$L = \frac{1}{\varepsilon^2} \frac{\delta_{\psi}^{**}}{\delta_{\varphi}^{**}} =$$

$$\frac{2m(m+1)(7032m^4 + 2602m^3 + 413m^2 + 32m + 1)}{(3m+1)(4m+1)(5m+1) \times (6m+1)(7m+1)(8m+1)}. \quad (28)$$

Относительная (существенно положительная) характерная величина ( $K$ ) для степенного закона распределения профиля скорости:

$$\begin{aligned} K = M + J &= \frac{1}{\varepsilon} \frac{\delta_{\psi\varphi}^{**}}{\delta_{\varphi}^{**}} + \frac{1}{\varepsilon} \frac{\delta_{\varphi\psi}^{**}}{\delta_{\varphi}^{**}} = \\ &= \frac{m(3m+19) + 22}{(m+4)(m+5)}. \end{aligned}$$

Очевидно, что использование градиентного закона распределения профиля скорости требует изменения всех относительных характерных толщин в уравнениях импульсов ППС и изменения закона трения, поскольку отношение толщин потери импульса степенного (5) и градиентного (4) закона распределения профиля скорости отличается от единицы:

$$\frac{2m+1}{m+2} \neq 1. \quad (29)$$

Для степенного закона распределения профиля скорости  $m = 7$  имеем согласно [3]:

$$\frac{\tau_{0\alpha}}{\rho U^2} = 0,01256 \left( \frac{U \delta_{\varphi}^{**}}{v} \right)^{-0,25}. \quad (30)$$

Для градиентного закона распределения профиля скорости  $m = 7$  получаем с учетом (29):

$$\frac{\tau_{0\alpha}}{\rho U^2} = 0,0111 \left( \frac{U \delta_{\varphi}^{**}}{v} \right)^{-0,25}, \quad (31)$$

где  $\delta_{\varphi}^{**}$  для уравнения (30) вычисляется по (8);  $\delta_{\varphi}^{**}$  для выражения (31) вычисляется по (20).

Для удобства относительные характерные толщины для законов (5) и (4) при различных значениях  $m$  сведены в таблицу.

### Библиографический список

1. Емцов, Б. Т. Техническая гидродинамика : учеб. для вузов по спец. «Гидравлические машины и средства ав-

Значения характерных относительных толщин для различных законов распределения скорости по толщине ППС

$m$	$H$	$J$	$M$	$L$	$F$	$K$	
1	3	0,8	1	0,66(6)	0,8334	1,4667	Для закона $\bar{u} = \frac{1}{y^m}$
2	2	0,7143	1,2857	0,7714	0,8399	1,7143	
7	1,2857	0,45(45)	2	0,8	0,8801	2,2879	
9	1,2(2)	0,3956	2,1429	0,7563	0,8921	2,3956	
11	1,(18)	0,35	2,25	0,7105	0,9022	2,475	
1	3	0,8	1,25	0,66(6)	0,66(6)	2,05	для закона $\bar{u} = 1 - (1 - \bar{y})^m$
2	2,5	0,7229	1,5807	0,7054	0,6173	2,3036	
7	2,1429	0,6416	1,9187	0,7081	0,5752	2,5603	
9	2,11(1)	0,6329	1,9545	0,7065	0,5711	2,5874	
11	2,09(09)	0,6272	1,9779	0,7053	0,5685	2,6051	

томатики» / Б. Т. Емцов. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Машиностроение, 1987.

2. Осипова, В. А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена : учеб. пособие для вузов / В. А. Осипова. 3-е изд., перераб. и доп. М. : Энергия, 1979.

3. Степанов, Г. Ю. Гидродинамика решеток турбомашин / Г. Ю. Степанов. М. : Физматгиз, 1962.

4. Сперроу, Е. М. Влияние предшествующих процессов на гидродинамическое развитие течения в канале / Е. М. Сперроу, С. Е. Андерсон // Тр. Американского общества инженеров-механиков. 1977. № 3. С. 222–228.

A. A. Kishkin, A. A. Zuev, M. G. Melkozerov, E. V. Chernenko, A. S. Konstantinov

**RELATIVE CHARACTERISTIC THICKNESSES  
OF THE DYNAMIC THREE-DIMENSIONAL BOUNDARY LAYER  
AT VARIOUS LAWS OF VELOCITY DISTRIBUTION**

*The degree and gradient profile of distribution of velocity investigation is conducted. The expressions for relative characteristics of the dynamic three-dimensional boundary layer thickness are received. Taking into account the relation of loss of an impulse expression thickness for the friction law gradient profile of speed distribution is received.*

*Keywords: three-dimensional boundary layer, thickness of impulse loss, thickness of replacement, law of distribution of velocity profile, friction law.*

© Кишкин А. А., Зуев А. А., Мелкозеров М. Г., Черненко Е. В., Константинов А. С., 2009