

УДК 532.526.3

ВЛИЯНИЕ УРОВНЯ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НАБЕГАЮЩЕГО ПОТОКА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕЧЕНИЯ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ НА ПЛАСТИНЕ

© 2011 г.

В.Г. Луцки, М.С. Макарова, А.Е. Якубенко

НИИ механики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

lukas@newmail.ru

Поступила в редакцию 16.05.2011

С использованием трехпараметрической дифференциальной модели турбулентности проведено численное исследование характеристик течения и теплообмена пограничного слоя на пластине в диапазоне изменения уровня интенсивности турбулентности набегающего потока 1.5–9%. Полученное возрастание локальных величин коэффициента сопротивления и числа Стантона согласуется с наиболее представительными экспериментальными данными.

Ключевые слова: модель турбулентности, пограничный слой, уровень турбулентности набегающего потока, коэффициент сопротивления, число Стантона.

Влияние уровня интенсивности турбулентности набегающего потока на сопротивление и теплообмен в развитом турбулентном пограничном слое на пластине рассматривалось в многочисленных экспериментальных, аналитических и численных исследованиях, результаты которых имеют противоречивый характер. Обзор этих работ, приведенный в [1, 2], показал, что в большей части работ отмечено возрастание трения и теплоотдачи с ростом уровня интенсивности турбулентности набегающего потока, хотя имеется ряд работ, в которых это влияние было пренебрежимо мало.

В [1] приведены наиболее представительные экспериментальные данные по влиянию турбулентности набегающего потока на сопротивление и теплоотдачу в турбулентном пограничном слое. С ними проведено сравнение результатов расчета, полученных с использованием трехпараметрической дифференциальной модели турбулентности [3], обобщенной на течение с теплообменом [4]. В этой модели уравнения переноса записаны для напряжения сдвига $\tau = -\rho \langle u'v' \rangle$, энергии турбулентности $E = 0.5 \times \sum \langle u_i'^2 \rangle$ параметра $\omega = E/L^2$, имеющего физический смысл завихренности турбулентности и содержащего поперечный интегральный масштаб турбулентности L .

Расчеты проведены для условий, близких к экспериментальным [1]: в качестве газа потока использован воздух при атмосферном давлении и температуре $T_e = 293$ К; скорость набегающего потока $u_e = 30$ м/с; разность температур в пограничном слое $T_w - T_e = 20$ К. Началь-

ный масштаб турбулентности L_0 принимался таким ($Re_L = L_0(\rho u/\eta)_e = 2 \cdot 10^5$), чтобы уменьшение интенсивности $\epsilon = \sqrt{E}/u_e$ вследствие вырождения турбулентности набегающего потока на расчетной длине не очень отличалось от начальной величины $\epsilon_0 = \sqrt{E_0}/u_e$, которая варьировалась в пределах 1.5–9% ($Re_t = \sqrt{E_0}(\rho u/\eta)_e = (0.3 - 1.8) \cdot 10^4$).

Расчетная зависимость числа Стантона $St = q_w/(\rho u)_e c_p (T_w - T_e)$, где $q_w = -(\lambda \partial T/\partial y)_w$ – тепловой поток в стенку, от числа Рейнольдса по длине пластины $Re_x = x(\rho u/\eta)_e$ для ряда значений интенсивности турбулентности набегающего потока представлена на рис. 1. Анализ данных на рисунке показывает, что точка перехода пограничного слоя от ламинарного режима течения к турбулентному, как и в эксперименте [1], смещается вверх по потоку с ростом интенсивности турбулентности набегающего потока ϵ_0 .

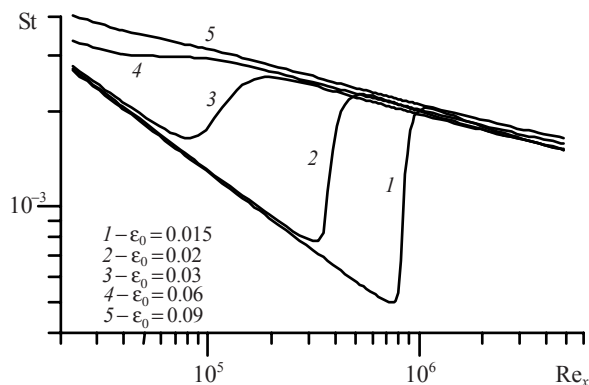


Рис. 1

Приведенные на рис. 1 результаты свидетельствуют, как и в [1], о пренебрежимо малом влия-

нии величины ϵ_0 на теплоотдачу (число Стантона) от стенки с ламинарным пограничным слоем. Однако при полностью развитом турбулентном пограничном слое ($Re_x \geq 10^6$) наблюдается, как и в эксперименте [1], возрастание величины числа Стантона с увеличением интенсивности турбулентности набегающего потока ϵ_0 . Для сведения к минимуму влияния фактора, обусловленного различным положением точки перехода от ламинарного режима течения к турбулентному в зависимости от интенсивности турбулентности набегающего потока, целесообразно использовать число Рейнольдса $Re_\theta = \theta(\rho u/\eta)_e$, определенное по толщине потери импульса θ . На рис. 2 представлено сравнение результатов расчета с экспериментальными данными [1] по изменению локальных величин коэффициента поверхностного трения $C_f = 2(\eta du/dy)_{w,x} \times \times /(\rho u^2)_e$ и числа Стантона St в зависимости от Re_θ (линии 1–4 – результаты расчета, заштрихованная область – экспериментальные данные [1] при $\epsilon_0 = 0.003–0.075$).

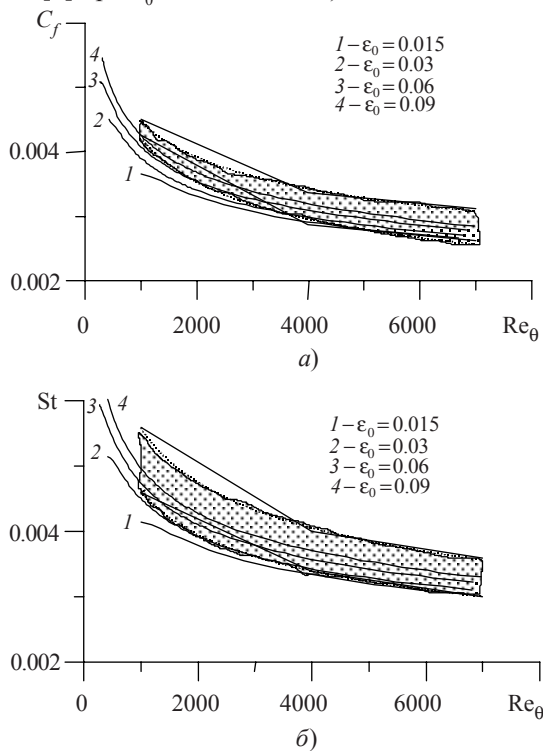


Рис. 2

Как и в эксперименте [1], в расчетах величины C_f и St возрастают с увеличением интенсивности турбулентности набегающего потока ϵ_0 . Так, при $Re_\theta = 4000$ с увеличением ϵ_0 с 0.015 до 0.09 возрастание C_f составляет $\sim 10\%$, число St возрастает на $\sim 12\%$, а при $Re_\theta = 2000$ возрастание числа St составляет $\sim 13\%$. Полученные в расчете величины роста C_f и числа St согласуются с экспериментальными данными [1] при $Re_\theta = 4000$, где они составляют соответственно $\sim 13\%$ и $\sim 16\%$ при увеличении ϵ_0 с 0.003 до 0.075.

В инженерной практике для расчета теплоотдачи по результатам измерений коэффициента сопротивления используется отношение $2St/C_f$, обычно называемое параметром аналогии Рейнольдса. Полученная в расчетах зависимость параметра аналогии Рейнольдса от числа Re_θ для ряда значений интенсивности турбулентности внешнего потока ϵ_0 показала, что с ростом ϵ_0 величина $2St/C_f$ возрастает, хотя и не в такой степени, как каждая из величин St и C_f . Так, при $Re_\theta = 4000$ параметр $2St/C_f$ возрастает примерно на 2% при увеличении ϵ_0 с 0.015 до 0.09.

В заключение отметим, что в расчетах подтверждено полученное в наиболее представительных экспериментах [1, 2] заметное возрастание локальных величин коэффициента сопротивления и числа Стантона.

Работа поддержана РФФИ (проект 10-08-00001).

Список литературы

1. Blair M.F. Influence of free-stream turbulence on turbulent boundary layer heat transfer and mean profile development, Part I – Experimental data. Part II – Analysis of results // Transaction of the ASME, Ser. C. Journal of Heat Transfer. 1983. V. 105, No 1. P. 33–47.
2. Репик Е.У., Соседко Ю.П. Управление уровнем турбулентности потока. М.: Физматлит, 2002. 244 с.
3. Луцик В.Г., Павельев А.А., Якубенко А.Е. Трехпараметрическая модель сдвиговой турбулентности // Изв. АН СССР. МЖГ. 1978. №3. С. 13–25.
4. Луцик В.Г., Павельев А.А., Якубенко А.Е. Трехпараметрическая модель турбулентности: расчет теплообмена // Изв. АН СССР. МЖГ. 1986. №2. С. 40–52.

**INFLUENCE OF A FREE-STREAM TURBULENCE ON CHARACTERISTICS
OF THE FLOW OF THE BOUNDARY LAYER ON A PLATE**

V.G. Lushchik, M.S. Makarova, A.E. Yakubenko

The three-parameter differential model of turbulence is used to perform a numerical investigation of characteristics of the flow and heat transfer of the boundary layer on a plate within the range of 1.5–9% of the free-stream turbulence intensities. The calculated increase of the local skin friction coefficient and Stanton number is in agreement with the most representative experimental data.

Keywords: model of turbulence, boundary layer, intensity of free-stream turbulence, skin friction coefficient, Stanton number.