

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕПЛООБМЕНА В НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПОГРАНИЧНЫХ СЛОЯХ

АННОТАЦИЯ

Для исследования динамических и тепловых характеристик нестационарных пристеночных пограничных слоев представлен вариант двухпараметрической модели турбулентности, позволяющий непрерывным образом рассчитывать всю область течения от ламинарного до турбулентного режимов, включая переход, в условиях высокой интенсивности турбулентности набегающего потока. Показана возможность теоретического описания свойств перехода квазистационарной моделью турбулентности при периодических распределениях во времени скорости набегающего потока. Характеристики динамического и теплового переходов изучены детально при различных граничных условиях на поверхности и продольном градиенте давления. Численные результаты сопоставлены с экспериментальными и теоретическими данными.

1. ВВЕДЕНИЕ

Развивается основанный на модификации существующих усложненных моделей турбулентности подход для определения влияния интенсивности и масштаба турбулентности набегающего потока, их изменений вдоль внешней границы пограничного слоя, так же как совместного воздействия интенсивности турбулентности и продольного градиента давления при обтекании лопаточных профилей на теплообмен и характеристики турбулентности. Это исследование основано на анализе экспериментальных данных [1-4] для слабо сжимаемых потоков в условиях высокой интенсивности турбулентности. Определяющая роль значительного отрицательного продольного градиента давления в изменении структуры пристеночной области развитого турбулентного потока и подавлении интенсивности турбулентности отражается на снижении теплообмена на стенке [1,2]. Для турбулизированных пристеночных течений введение дополнительных эмпирических функций в коэффициенты модельных уравнений позволило получить согласованные численные результаты с экспериментальными данными [3, 4] для описания переходной структуры теплообмена в пограничном слое.

Возможность применения модифицированной квазистационарной модели турбулентности при высокой интенсивности турбулентности и гармонических колебаний внешней скорости для расчета характеристик течения и теплопереноса в нестационарном пограничном слое на плоской пластине показана в [5, 6].

В настоящем исследовании на основе модифицированной $K-\varepsilon$ -модели изучается влияние параметров турбулентности набегающего потока на развитие динамических и тепловых переходных процессов в нестационарных пограничных слоях. Для турбулизированного набегающего потока численные решения стационарной задачи сопоставляются с экспериментальными данными и служат начальными условиями для расчета характеристик нестационарного пограничного слоя. Дается анализ совместного влияния параметров гармонических колебаний во времени скорости внешнего невязкого потока и турбулентности набегающего потока в условиях продольного градиента давления на нестационарные характеристики течения и теплопереноса.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Постановка задачи основывается на системе уравнений для осредненных характеристик нестационарного двумерного турбулентного пограничного слоя в сжимаемом однородном потоке совершенного газа в системе криволинейных координат совместно с начальными и граничными условиями. [5, 6].

Для замыкания системы уравнений применяются концепция турбулентной вязкости и гипотезы о градиентном механизме переноса и Колмогорова-Прандтля. Квазистационарные модели турбулентности содержат эмпирические функции и константы, основывающиеся на экспериментальных данных, полученных для установившихся условий течения. При апробации моделей путем сопоставления с экспериментальными данными возникает необходимость в точной информации о параметрах задачи, граничных и начальных условиях, адекватной условиям эксперимента. Модифицированные варианты моделей турбулентности позволяют непрерывно рассчитывать всю область течения от ламинарного до турбулентного режима при гармоническом распределении во времени внешней скорости высокотурбулентного набегающего потока

$$u_e(t, \xi) = u_0(\xi)(1 + A_0 \cos \omega t)$$

Эффективные коэффициенты переноса определяются соотношениями $\mu_{\Sigma} = \mu + \mu_t$, $\lambda_{\Sigma} = \lambda + \lambda_t$. Введение ламинарного и турбулентного чисел Прандтля $Pr = \mu c_p / \lambda$, $Pr_t = \mu_t c_p / \lambda_t$ в уравнение притока тепла дает возможность выразить отношения коэффициентов λ/c_p и λ_t/c_p .

Для замыкания системы уравнений используются $K-\varepsilon$ -модели турбулентности. При этом задаются два параметра турбулентности - степень Tu_∞ и масштаб L_∞ (или $\varepsilon'_\infty = \varepsilon_\infty D / V_\infty^3$) турбулентности в набегающем потоке. Модель турбулентности содержит уравнения для кинетической энергии турбулентности K и изотропной части скорости ее диссипации ε [5, 6]. Модификация этой модели предполагает замену постоянной c_3 , входящей в демпфирующий множитель f_{μ} функциональной зависимостью $c_3^* = C_0' / \eta_*^\alpha$, где $c_3 = \text{const}$, $C_0' = c_3 \eta_*^\alpha$ и $\alpha = \text{const}$. Величина C_3^* связана с толщиной вязкого подслоя η_* , заданной выражением от локального числа Re_0 и двух параметров A_0' , B_0' , определяемых параметрами набегающего потока и его турбулентности. Здесь введено эмпирическое соотношение A_0' от степени турбулентности Tu_∞ , полученное для опытных данных с высокой интенсивностью турбулентности.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Для расчета характеристик течения и теплообмена двумерного нестационарного пограничного слоя применяется численный метод, основанный на неявной схеме четвертого порядка точности по нормальной к поверхности координате. Метод развит для решения задач двумерного нестационарного пограничного слоя в колеблющихся потоках с периодически распределенной во времени внешней невязкой скоростью; для широкого диапазона амплитуд колебаний он позволяет изучить свойства основного и возвратного потоков.

Для набегающего осциллирующего потока с высокой интенсивностью $Tu_\infty = 3$ и 6% и $\varepsilon'_\infty = 0.184 \cdot 10^{-2} - 0.184$ при обтекании плоской пластины анализ численных результатов и их сопоставление с экспериментальными данными показали применимость этой модели для расчетов характеристик во всей области течения, включая ламинарно-турбулентный переход; численные решения для фазового угла φ коэффициента поверхностного трения от приведенной частоты $\omega' = \omega \xi / u_0$ при ламинарном режиме течения находятся в соответствии с известными теоретическими решениями (аналитическими [7] и численными [8]).

Для турбулентного режима рассчитанные распределения качественно согласуются с экспериментальными [9] и численными данными [8] для частот колебаний $f = \omega / 2\pi = 0.33$ и 1 Гц и умеренных амплитуд колебаний из диапазона $A_0 = 0.147 - 0.352$.

Для турбулентного пограничного слоя с ламинарно-турбулентным переходом расчетные распределения фазового угла $\varphi(\omega')$ для $Tu_\infty = 3\%$ и $\varepsilon'_\infty = 0.184 \cdot 10^{-2}$ показали, что с увеличением амплитуды A_0 значения φ возрастают как в

переходной, так и в турбулентной областях, причем в турбулентной области угол φ минимален.

Определено, что для умеренных амплитуд колебаний усредненный профиль по периоду времени $\langle u \rangle$ имеет наилучшее соответствие с экспериментальным при $A_0 = 0.352$ для $f = 0.33$. Эти профили $\langle u \rangle$ в целом точно описывают изменения экспериментальных данных в пограничном слое.

Значения параметров турбулентности в набегающем осциллирующем потоке с заданной частотой влияют на распределения этих функций во времени на внешней границе пограничного слоя. Наибольшие амплитуды колебаний отмечены в начальной области течения и убывают вниз по потоку, что отражается на результатах в областях развитого турбулентного режима и перехода.

Представлено влияние амплитуды и частоты установленного колебания внешней скорости на интегральные пространственно-временные характеристики коэффициента трения C_f , формпараметра H и числа Рейнольдса Re_0 . Распределения C_f во времени расслаиваются с ростом амплитуды A_0 в каждой области течения - наиболее заметны качественные изменения в переходной и турбулентной областях (рис. 1).

По полученным зависимостям формпараметра $H(t; Re)$ и интегральных толщин пограничного слоя выделяются области с характерными режимами течения и дается анализ влияния на них параметров колебаний и турбулентности

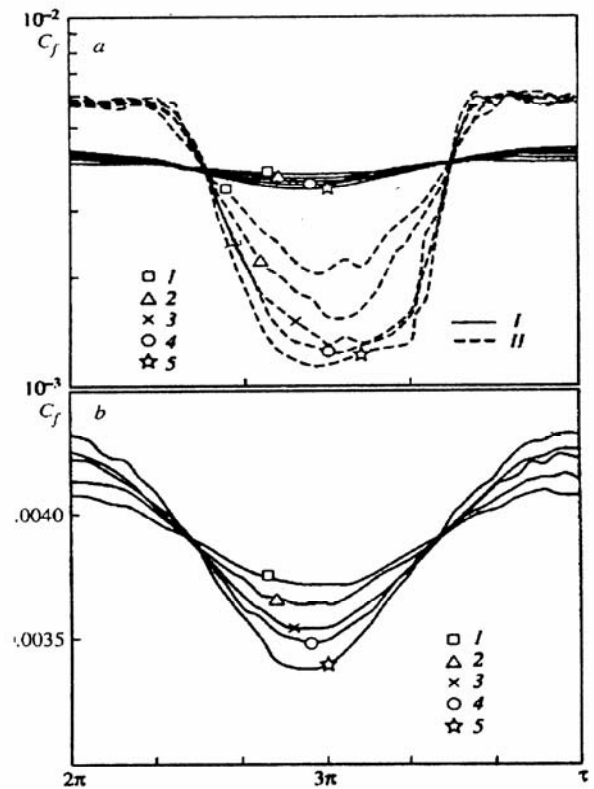


Рис. 1. Распределения коэффициента трения C_f от $\tau = \omega t$ в ламинарной (I), переходной (II) (а) и турбулентной (б) областях: 1-5- $A_0 = 0.147; 0.202; 0.264; 0.292; 0.352$

набегающего потока.

Для нахождения совместного влияния параметров гармонических колебаний внешней скорости и турбулентности набегающего потока на осредненные и пульсационные характеристики течения в пограничном слое на плоской пластине в качестве начальных условий по времени выбраны расчетные результаты стационарной задачи в соответствии с экспериментальными данными [3] для слабосжимаемого потока с высокой интенсивностью турбулентности $Tu_\infty = 4.86\%$.

Значения параметров турбулентности набегающего потока влияют на временные распределения этих параметров на внешней границе пограничного слоя наибольшим образом - в начальной области течения. Рост интенсивности турбулентности смещает вверх по потоку переходную область. Увеличение амплитуды колебаний внешней скорости приводит к количественному росту амплитуд колебаний всех расчетных характеристик вниз по потоку, наиболее интенсивных в турбулентной области, при этом в области перехода отмечаются их качественные изменения. Проанализировано воздействие параметров турбулентности на интегральные динамические характеристики во времени и по продольной координате.

Предлагаемый подход развит для определения совместного влияния параметров гармонических колебаний внешней скорости и турбулентности набегающего потока на интенсивность теплопереноса в потоке на плоской пластине с различными вариантами граничных условий для энтальпии. При наличии гармонических колебаний

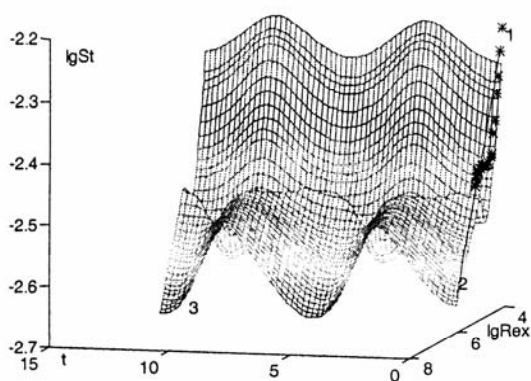


Рис. 2. Поверхность пространственно-временного распределения числа Стантона: 1,2-экспериментальные данные и турбулентная эмпирическая зависимость при $t=0$, 3 – поверхность числа St в зависимости от t и $\lg Re_x$ при амплитуде колебаний $A_0 = 0.352$

скорости набегающего потока во времени уровень интенсивности турбулентности в нем оказывает доминирующее влияние на развитие теплообмена в нестационарном пограничном слое. Для умеренных значений амплитуды A_0 и частоты f колебаний в

условиях высокой интенсивности турбулентности распределения коэффициента теплопередачи и температурного фактора, соответствующие в начальный момент времени стационарным экспериментальным параметрам потока, быстро перестраиваются во всех областях течения, особенно в переходной, сохраняя при этом гармонический характер.

Амплитуды колебаний числа Стантона и температурного фактора в переходной и турбулентной областях превосходят амплитуды ламинарного режима (рис. 2).

Температурный фактор увеличивается вниз по потоку за исключением области перехода, где его изменения по продольной координате немонотонны (рис. 3). При ламинарном режиме темп роста температурного фактора больше, чем в развитом турбулентном течении.

Для умеренных амплитуд колебаний внешней скорости в условиях высокой интенсивности турбулентности распределения коэффициента теплопередачи и температурного фактора перестраиваются во времени от начальных данных во всех областях течения, особенно в переходной, с сохранением гармонического характера и нарастанием амплитуд колебаний в переходной и турбулентной областях относительно амплитуд ламинарного режима. Влияние параметров турбулентности набегающего потока на их временные распределения на внешней границе пограничного слоя максимально в начальной области течения и ослабевает вниз по потоку. Рост интенсивности турбулентности смещает вверх по

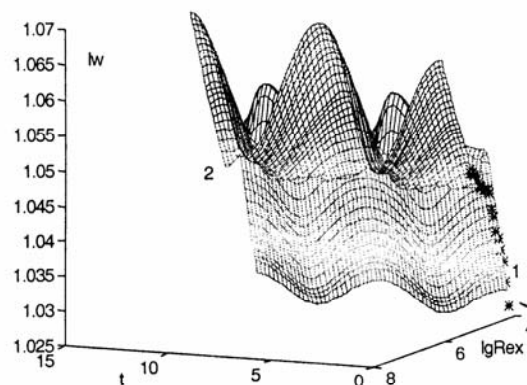


Рис. 3. Поверхность пространственно-временного распределения температурного фактора: 1 - экспериментальные данные при $t=0$, 2 – поверхность температурного фактора i_w в зависимости от t и $\lg Re_x$ при амплитуде колебаний $A_0 = 0.352$

течению переходную область. Увеличение амплитуды колебаний внешней скорости A_0 приводит к нарастанию амплитуд колебаний всех расчетных характеристик вниз по потоку, наиболее интенсивных в турбулентной области, и качественно отражается на процессах перехода. Изменения

значений скорости диссипации ε'_∞ в набегающем потоке оказывают малое воздействие на распределения температурного фактора i_w по сравнению с влиянием параметра интенсивности турбулентности.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Найденные характерные свойства внутренней структуры пограничного слоя при переходе от ламинарного к турбулентному режиму в основном отражают закономерности изменений характеристик течения и теплообмена, установленных в экспериментах. Модификация моделей турбулентности позволила сделать более точным согласование численных решений с базисными экспериментальными данными не только по динамическому, но и по тепловому переходу в условиях высокой интенсивности турбулентности набегающего потока. Расчетные результаты показали их соответствие экспериментальным данным по профилям скорости и интенсивности турбулентности, интегральным характеристикам. Изменение профилей приведенной температуры в пограничном слое с ростом продольной координаты аналогично их перестройке в экспериментах.

Анализ численных результатов и их сопоставление с экспериментальными данными при воздействии параметров гармонических колебаний скорости набегающего потока на характеристики течения показали применимость квазистационарной двухпараметрической модели для их расчета во всей области течения, включая переход. Найденны закономерности влияния параметров турбулентности набегающего потока и колебаний внешней скорости на их распределения во времени на внешней границе пограничного слоя и, как следствие, на процессы ламинарно-турбулентного перехода, локальные и интегральные характеристики течения и теплообмена.

В условиях высокой интенсивности турбулентности распределения коэффициента теплопередачи и температурного фактора перестраиваются во времени от начальных данных, сохраняя гармонический характер, при этом выделяется нарастание амплитуд колебаний в переходной и турбулентной областях относительно амплитуд ламинарного режима. Увеличение амплитуды осцилляций внешней скорости усиливает временные колебания всех расчетных характеристик вниз по потоку, максимально в турбулентной области, и качественно изменяет их в переходе. Температурный фактор возрастает по продольной координате за исключением области перехода, где его изменения немонотонны, с наибольшим темпом при ламинарном режиме.

Исследование выполнено при поддержке грантов НШ N 1899-2003 и РФФИ N 05-083384-а.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ξ, ζ - координаты, направленные вдоль и по нормали к поверхности
 V_∞ - скорость в набегающем потоке
 K, ε - кинетическая энергия турбулентности и скорость ее диссипации
 h, H_0 - статическая и полная энтальпии
 A_0, f, ω, ω' - амплитуда и частоты колебаний
 i_w - температурный фактор ($i_w = h_w/H_0$)
 St - число Стантона
 C_f, H - коэффициент трения и формпараметр
 Pr - число Прандтля
 $Re_x, Re_\theta, Re_\varepsilon$ - числа Рейнольдса, $Re_\varepsilon = V_\infty D/\nu_\infty$
 $Tu_\infty, L_\infty, \varepsilon'_\infty$ - степень, масштаб турбулентности и скорость диссипации в набегающем потоке
 D - длина пластины
 t, τ - время, $\tau = \omega t$
 μ, λ - коэффициенты вязкости и теплопроводности
 c_p - теплоемкость при постоянном давлении
 Индексы:
 t, Σ - турбулентные и полные значения;
 $0, w, e, \alpha$ - начальные значения, на стенке и внешней границе, в набегающем потоке

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Moretti P.M., Kays W.M. Heat transfer to a turbulent boundary-layer with varying freestream velocity and varying surface temperature, an experimental study// Int. J. Heat Mass Transfer. 1965. Vol. 8. N 9, P. 1187-1202.
2. Леонтьев А.И., Шишов Е.В., Афанасьев В.Н., Заболоцкий В.П. Исследование пульсационной структуры теплового турбулентного пограничного слоя в условиях ламинаризации потока// Тр. 6-й Всес. конф. Теплообмен -IV. Минск. 1980. Т. 1. Ч. 2. С. 136-146.
3. Transition modelling for turbomachinery II: An Updated Summ. of ERCOFTAC Trans. SIG Progr. 2nd WORKSHOP. Ed. A.M. Savill. Univ. Press: Cambridge. 1994. 226 p.
4. Epik E.Ya. Heat transfer effects in transitions// Proc.-On Turbulent Heat Transfer, Engineering Foundation Conferences. San Diego. California. New York. 1996. P. 1-47.
5. Алексин В.А., Казейкин С.Н. Моделирование влияния параметров турбулентности набегающего потока на течение в нестационарном пограничном слое// МЖГ. 2000. N 6. С. 64-77.
6. Алексин В.А. Моделирование влияния параметров турбулентности набегающего потока на теплообмен нестационарного пограничного слоя// МЖГ. 2003. N 2. С. 82-96.
7. Lighthill M.J. The response of laminar skin friction and heat transfer to fluctuations in the stream velocity// Proc. R. Soc. London. 1954. Ser. A: Vol. 224, N. 1156. P. 1-23.
8. Cebeci T. Calculation of unsteady two-dimensional laminar and turbulent boundary layers with fluctuations in external velocity// Proc. Roy. Soc. London. 1977. Ser. A. Vol. 355. N 1681. P. 225-238.
9. Karlsson S.K.F. An unsteady turbulent boundary layer// J. Fluid Mech. 1959. Vol. 5. Pt 4. P. 622-636.