

Авиационная и ракетно-космическая техника

УДК 536.242

doi: 10.18698/0536-1044-2019-1-58-71

Верификация моделей для турбулентных тепловых потоков при обтекании прямоугольного выступа на пластине

В.Н. Афанасьев, Дехай Кон, К.С. Егоров

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Verification of Models for Turbulent Heat Fluxes in the Flow over a Rectangular Rib on a Plate

V.N. Afanasiev, Dehai Kong, K.S. Egorov

Bauman Moscow State Technical University

Проведена верификация нескольких моделей для турбулентных тепловых потоков, включаемых в состав простых моделей с нулевым уравнением и сложных моделей (двухпараметрических диссипативных, явных алгебраических и дифференциальной), реализованных в пакете ANSYS Fluent с функцией UDF (User Defined Function) для расчета плоского отрывного турбулентного теплообмена около прямоугольного выступа на пластине. Выполнено сравнение результатов расчета с экспериментально полученными профилями скорости и температуры и их турбулентных характеристик. Численные исследования показали, что модели с нулевым уравнением в условиях постоянного турбулентного числа Прандтля не позволяют воспроизводить характер поля температуры в отрывной зоне, а сложные модели обеспечивают более точный прогноз не только для поля температуры, но и для распределения коэффициента теплоотдачи на поверхности с выступом.

Ключевые слова: численное моделирование, турбулентный тепловой поток, модель с двумя уравнениями, явная алгебраическая модель, прямоугольный выступ, пульсации температуры

In this paper, verification of several turbulent heat flux models for the calculation of the plane turbulent heat transfer near a rectangular rib on a plate is presented. These models are included in simple zero-equation models and in complex models (two-parameter dissipative models, explicit algebraic models and differential model). The simulation is performed using ANSYS Fluent software package with the inclusion of UDF (User Defined Function). The calculation results are compared with the experimental profiles of velocity and temperature, and their turbulent characteristics. The results of numerical studies show that zero-equation models under the condition of the constant turbulent Prandtl number are not able to reproduce the character of the temperature field in the separation zone, and complex models provide more accurate predictions not only for the temperature field but also for the distribution of the heat transfer coefficient on the surface with a rib.

Keywords: numerical simulation, turbulent heat flux, two-equation model, explicit algebraic model, rectangular rib, temperature fluctuation

При решении многих задач аэро-, гидродинамики и конвективного теплообмена часто встречаются отрывные течения, что объясняет интерес исследователей к этому явлению на протяжении многих лет. Точное прогнозирование тепловых характеристик в отрывных зонах, где имеют место неравновесие и анизотропия турбулентного потока, является одним из самых сложных вопросов при решении осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье — Стокса. В отрывных течениях процесс отрыва и присоединения турбулентных потоков может вызывать сильное изменение локальной скорости теплоотдачи, а анизотропия поля скорости — влиять на поведение диффузии теплового потока во всех его областях.

В настоящее время наиболее распространенный подход к численному анализу теплоотдачи заключается в моделировании турбулентного теплового потока (ТТП) по прямой аналогии с приближением Буссинеска и в его предположении линейной пропорциональности градиенту осредненных температур. Коэффициент пропорциональности — турбулентная диффузия α_t — определяется известной вихревой вязкостью ν_t , полученной с помощью модели турбулентности для поля скорости, и турбулентным числом Прандтля Pr_t . Такая модель для ТТП, выраженная в виде соотношения Фурье, является моделью с нулевым уравнением, которая легко реализуется в численной программе и имеет высокую численную устойчивость, а также дает точный прогноз в простых течениях.

Однако во многих работах [1–7] отмечено, что наблюдаемое заметное различие в пристеночной области рециркуляционного течения в производстве кинетической энергии турбулентности и составляющей ТТП приводит к существенному нарушению аналогии Рейнольдса и ставит под сомнение возможность использования постоянного значения числа Pr_t при моделировании процессов теплообмена в рециркуляционных отрывных течениях. Кроме того, эксперимент и прямое численное моделирование (Direct Number Simulation) [8, 9] указывают, что турбулентная тепловая диффузия не является скалярной величиной. Фактически это тензор второго порядка, составляющие которого зависят от направления смешения.

Для более точного моделирования ТТП в сложных отрывных течениях предложено много подходов. В статьях [10–12] разработаны модели с двумя дифференциальными уравнениями для поля температуры, аналогичные широко используемым двухпараметрическим диссипативным k - ϵ -моделям турбулентности для поля скоростей. Два дополнительных уравнения переноса необходимо решать для турбулентных пульсаций температур $\overline{T'^2}$ и их скорости диссипации ϵ_t . Затем тепловая вихревая диффузия вычисляется для двух полученных значений в соответствии с концепцией вихревой вязкости. Такие типы моделей способны учитывать пристеночный эффект, так как в них нет необходимости делать предположений о значении турбулентного числа Прандтля. Однако в этих моделях не учтены эффекты, обусловленные анизотропией турбулентности.

С другой стороны, исходя из точных дифференциальных уравнений переноса ТТП, многие авторы [4–7] предлагают применять для ТТП явные алгебраические модели (ЕАНФ), полученные на основе предположения локального равновесия. В отличие от моделей, использующих концепции турбулентной диффузии через заданное постоянное турбулентное число Прандтля, в ЕАНФ-моделях ТТП выражены в явной зависимости не только от градиентов осредненных температур, но и с учетом свойств поля скорости (градиентов осредненных скоростей или поля турбулентности).

Такие модели способны учитывать эффект анизотропии турбулентной тепловой диффузии и кривизну линий тока. Их широко применяют для прогнозирования ТТП в отрывных и присоединенных течениях [13, 14], так как в них нет дополнительных уравнений переноса и они мало влияют на время вычисления по сравнению с другими моделями.

В данной работе численно исследованы средние и пульсационные, динамические и тепловые характеристики отрывного течения при обтекании одиночного прямоугольного выступа (далее выступ) турбулентным пограничным слоем, формирующимся при обтекании потоком воздуха поверхности плоской пластины, обогреваемой по закону $q_{ст} = \text{const}$, где $q_{ст}$ — плотность теплового потока на стенке.

Исследование выполнено с помощью вычислительного программного пакета ANSYS Fluent версии 17.2 [15]. Система исходных дифференциальных уравнений, описывающая процессы переноса количества движения и теплоты, решена конечно-объемным методом в рамках процедуры коррекции давления SIMPLEC [16]. Противопоточная схема второго порядка аппроксимации выбрана для дискретизации конвективных членов уравнений переноса импульса, кинетической энергии турбулентности, скорости турбулентной диссипации, энергии и других зависимых переменных в сложных моделях.

Другая коммерческая программа ANSYS ICEM CFD (версии 17,2) использована для генерации структурированной сетки. Численные прогнозы, полученные решением стационарных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье — Стокса (RANS), и уравнения энергии, замкнутые выбранными моделями турбулентности и несколькими моделями для ТТП, сравнивались с экспериментальными данными [17, 18].

Цель работы — обобщение и сравнение использования моделей для ТТП при расчете плоского отрывного турбулентного теплообмена около прямоугольного выступа на пластине.

Численное исследование. Точность расчета процессов гидродинамики и теплообмена определяется достоверностью данных о коэффициентах переноса. Это особенно важно вследствие интенсивного развития численных методов решения исходной системы уравнений турбулентного пограничного слоя. Поэтому экспериментальные и теоретические исследования процессов в турбулентном пограничном слое остаются одним из основных направлений фундаментальных исследований.

Рассмотрены гидродинамика и теплообмен при двумерном обтекании турбулентным потоком несжимаемой вязкой жидкости выступа,

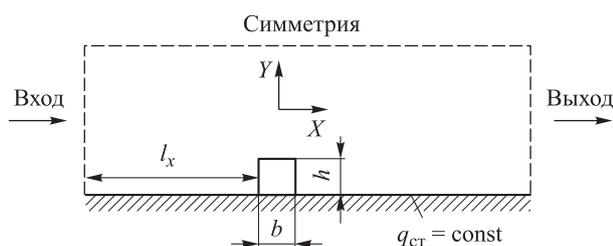


Рис. 1. Схема расчетной области для выступа

расположенного на нижней плоской стенке. Геометрические размеры модели соответствуют размерам экспериментального участка (рис. 1), где h и b — высота и ширина выступа; l_x — расстояние от передней грани установки выступа до входа трубы в эксперименте.

Система уравнений Навье — Стокса и энергии для описания стационарного турбулентного движения и теплоты вязкой несжимаемой ньютоновской жидкости при отсутствии массовых сил может быть представлена в скалярно-тензорной форме [16]:

- уравнение неразрывности

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0;$$

- уравнение движения

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (U_i U_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \overline{u'_i u'_j} \right];$$

- уравнение энергии

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (U_j T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\nu}{Pr} \frac{\partial T}{\partial x_j} - \overline{u'_j T'} \right],$$

где U_i , U_j — декартовы составляющие осредненных скоростей в направлении соответствующих осей; x_i , x_j — направления декартовой системы координат (где $i = 1, 2; j = 1, 2$); p и T — осредненные давление и температура; ρ — плотность жидкости; ν — коэффициент кинематической вязкости; u'_i , u'_j — декартовы пульсационные составляющие скоростей в направлении соответствующих осей; T' — пульсации температуры; Pr — молекулярное число Прандтля. Здесь и далее черта над параметрами означает осредненную во времени величину, а знак «'» — пульсационную.

Модель турбулентности. Согласно работе [19], модели турбулентности для поля скорости в целом влияют больше на качество прогноза характеристик теплообмена, чем тепловые модели для уравнения энергии. Таким образом, для расчета поведения отрывных течений были выбраны низкорейнольдсовая кубическая нелинейная модель (LRN-LCL) [20, 21] и дифференциальная модель рейнольдсовых напряжений с линеаризованным представлением корреляций давление — деформации и низкорейнольдсовой модификацией Лаундера — Шима (LRN-GL) [22, 23]. Как отмечено в работах [13, 20–23], эти модели обеспечивают приемлемую для

практики точность расчета динамических характеристик отрывного течения.

Модель для ТТП. Дифференциальное уравнение переноса ТТП в стационарном режиме имеет вид [7, 13]

$$\frac{\partial(U_j \overline{u_i' T'})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} (D_{ij}^T) + P_{ij}^T + R_{ij}^T - \varepsilon_{ij}^T.$$

Здесь

$$D_{ij}^T = -\overline{u_i' u_j' T'} - \frac{\overline{p' T'}}{\rho} \delta_{ij} + \alpha \overline{u_i' \frac{\partial T'}{\partial x_j}} + \nu T' \frac{\partial u_i'}{\partial x_j};$$

$$P_{ij}^T = -\left(\overline{u_i' u_j' \frac{\partial T}{\partial x_j}} + \overline{u_j' T' \frac{\partial U_i}{\partial x_j}} \right); \quad R_{ij}^T = \frac{\overline{p' \frac{\partial T'}{\partial x_j}}}{\rho};$$

$$\varepsilon_{ij}^T = (\alpha + \nu) \frac{\overline{\frac{\partial T'}{\partial x_j} \frac{\partial u_i'}{\partial x_j}}}{\partial x_j},$$

где δ_{ij} — единичный тензор; α — коэффициент молекулярной диффузии; p' — пульсация давления.

В этом уравнении все члены, за исключением члена генерации ТТП P_{ij}^T , должны быть представлены в виде модельных аналогов, так как содержат ковариации пульсационных величин. Наиболее сложным для моделирования является перераспределяющий член R_{ij}^T , представляющий собой ковариацию между пульсациями давления и температуры. Диффузионный член D_{ij}^T обычно моделируют в форме градиентного переноса. Диссипативный член ε_{ij}^T мал и равен нулю в случае изотропной турбулентности.

Аналогия Буссинеска (модель с нулевым уравнением). По прямой аналогии с турбулентным переносом количества движения понятие турбулентной диффузии предполагает следующее соотношение между переносом массы или тепла и градиентом переносимой субстанции [15, 16]:

$$-\overline{u_j' T'} = \frac{\nu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_j},$$

где ν_t — турбулентная вязкость; Pr_t — турбулентное число Прандтля, обычно принимаемое равным 0,85 для потока пограничного слоя.

Модель с двумя уравнениями для теплообмена. Модель теплообмена с двумя уравнениями является мощным инструментом улучшения

точности предсказания теплообмена в сложных турбулентных течениях. Проведено сравнение трех таких моделей — высокорейнольдсовой (AKN) [10], низкорейнольдсовой (SSZ) [11] и VCD [12].

Явная алгебраическая модель ТТП (ЕАНФМ). В общем виде для описания ТТП можно использовать выражение [24]

$$-\overline{u_j' T'} = \mathbf{D}_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j},$$

где \mathbf{D}_{ij} — тензор турбулентной тепловой диффузии.

Для замыкания осредненного по Рейнольдсу уравнения энергии выбраны три разные явные алгебраические модели ТТП: модель Рхея и Сунга (RS) [4], модификационная модель Абэ и Суга (MAS) [5, 6] и низкорейнольдсовая модель (LRN-YSC) [7].

Дифференциальная модель для тепловых потоков. В модели SL [1–3] члены перераспределения R_{ij}^T и диссипации ε_{ij}^T для пристеночных и однородных течений можно записать как

$$R_{ij}^T - \varepsilon_{ij}^T = C_{T1} \frac{\varepsilon}{k} \overline{u_j' T'} \left(1 + \frac{B_T}{R_t} \right),$$

где $C_{T1} = 4,8$; ε — скорость диссипации; k — кинетическая энергия турбулентности; $B_T = 65$; $R_t = k^2 / (\varepsilon \nu)$.

Таким образом, модельное уравнение для нормальной составляющей ТТП имеет следующий вид [1]:

$$\frac{\partial(U_j \overline{v' T'})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_T} \right) \frac{\partial v' T'}{\partial x_j} \right] - \left(\overline{u_j' v'} \frac{\partial T}{\partial x_j} + \overline{u_j' T'} \frac{\partial V}{\partial x_j} \right) - C_{T1} \frac{\varepsilon}{k} \overline{v' T'} \left(1 + \frac{B_T}{R_t} \right),$$

где v' — вертикальная пульсация скорости; $\sigma_T = 0,8$.

Для продольной составляющей ТТП использовано алгебраическое соотношение, в котором применена модель Гибсона — Лаундера [22] для членов перераспределения и диссипации турбулентного потока, аналогичная модели для рейнольдсовых напряжений.

Граничные условия. Теплофизические свойства потока приняты постоянными. На входе в

расчетную область (Inlet) заданы постоянными скоростью и температура: $U_\infty = 15,3$ м/с и $T_\infty = 297,15$ К. Пульсации температуры соответствуют экспериментальным данным. Профили кинетической энергии турбулентности и скорости диссипации определены из следующих соотношений [2]:

$$k = \frac{3}{2}(U_\infty I_0)^2; \quad \varepsilon = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{l},$$

где I_0 — интенсивность турбулентности в невозмущенном потоке, $I_0 = 1\%$; C_μ — эмпирическая константа турбулентной модели, $C_\mu = 0,09$; l — турбулентный масштаб длины.

На выходе из расчетной области (Outlet) заданы условия продолжения решения (Outflow — граничные условия), на нижней стенке и поверхности выступа — условия прилипания и постоянства теплового потока $U = V = 0$ (где U , V — продольная и вертикальная составляющие средней скорости), $q_{ст} = 350$ Вт/м², а на верхней стенке — условие симметрии.

Моделирование выполнено с использованием процессора Intel i7 2,4 ГГц. Для модели с нулевым уравнением время расчета составило

около 1 ч, для двухпараметрических диссипативных моделей — 3...4 ч, для явных алгебраических моделей — 1...2 ч, для дифференциальной модели — 7...8 ч.

Расчет гидродинамических параметров течения. Структура безградиентного турбулентного пограничного слоя экспериментально исследована в одиннадцати сечениях [17] как перед прямоугольным выступом, так и за ним в диапазоне взаимного расположения выступа и сечений замера — $11,94 < x/h < 20,88$.

Экспериментально полученные и численно определенные безразмерные профили средних скоростей U/U_∞ и продольных пульсаций u'/U_∞ скорости в выбранных сечениях показаны на рис. 2 и 3, где y/h — безразмерная вертикальная координата. Как видно из рисунков, результаты расчетов основных динамических характеристик, выполненных с помощью низкорейнольдсовой кубической нелинейной модели (LRN-LCL) и дифференциальной модели рейнольдсовых напряжений (LRN-GL), хорошо совпадают с экспериментальными данными [17].

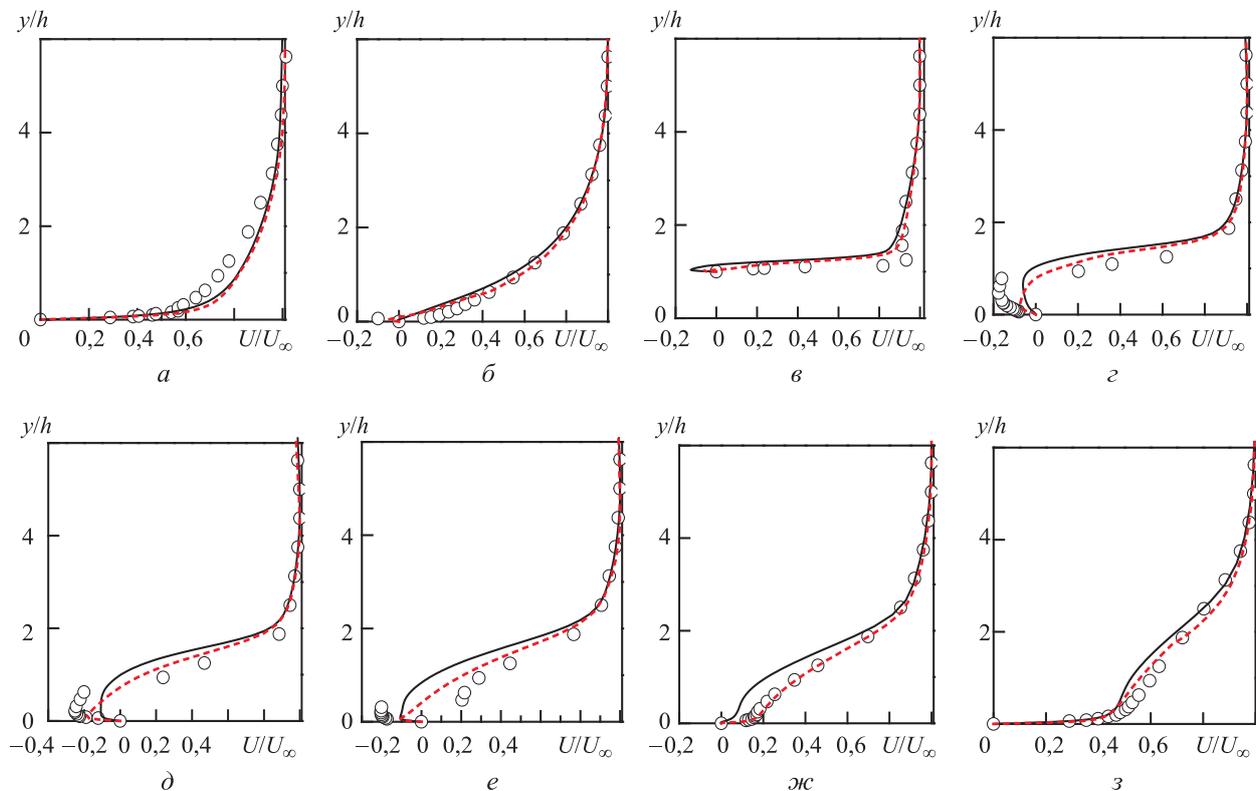


Рис. 2. Распределение средней скорости в сечениях $x/h = -11,94$ (а), $-1,94$ (б), $-0,50$ (в), $0,56$ (г), $2,13$ (д), $5,25$ (е), $8,38$ (ж) и $20,88$ (з) при обтекании потоком выступа:
 — LRN-GL; - - - LRN-LCL; ○ — экспериментальные данные

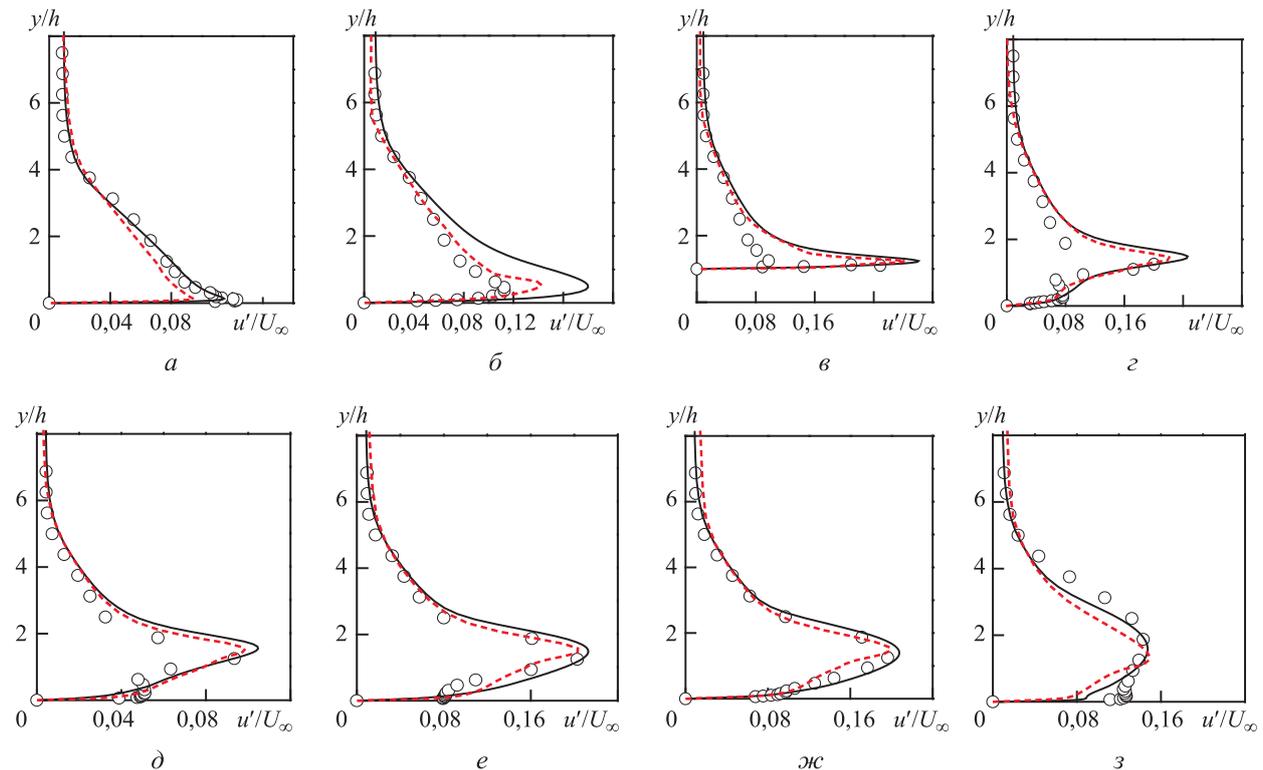


Рис. 3. Распределение продольных пульсаций скорости в сечениях $x/h = -11,94$ (а), $-1,94$ (б), $-0,50$ (в), $0,56$ (г), $2,13$ (д), $5,25$ (е), $8,38$ (ж) и $20,88$ (з) при обтекании потоком выступа:
 — LRN-GL; - - - LRN-LCL; \circ — экспериментальные данные

Расчет тепловых параметров. На рис. 4 показаны безразмерные профили средней температуры $\Delta T/\Delta T_\infty$ ($\Delta T = T_{ст} - T$, $\Delta T_\infty = T_{ст} - T_\infty$, где $T_{ст}$ — температура стенки) в выбранных сечениях, полученные путем эксперимента [17] и расчета с помощью модели с нулевым уравнением в условиях постоянного турбулентного числа Прандтля ($Pr_t = 0,85$). Видно, что экспериментальные профили средней температуры за выступом в зоне смешения на границе между основным потоком и пристеночным течением (в зоне рециркуляции) имеют явно выраженный излом.

Также на рис. 4 приведены аналогичные результаты, полученные с помощью двухпараметрических линейных и нелинейных моделей турбулентности: стандартной $k-\epsilon$ -модели с модификацией Kato — Launder (SKE-KL), Realizable $k-\epsilon$ -модели (RKE) и низкорейнольдсовой кубической нелинейной модели вихревой вязкости (LRN-LCL). В целом наблюдается приемлемое согласие для всех рассмотренных моделей турбулентности при использовании модели с нулевым уравнением для ТТП.

Однако непосредственно за выступом в отрывной зоне (в сечениях $x/h = 0,56$ и $x/h = 2,13$)

наблюдается заметное отклонение между экспериментальными и расчетными профилями средней температуры для всех моделей. Как было отмечено ранее, простая градиентная диффузионная модель не способна предсказать теплообмен в отрывных зонах.

На рис. 5 показаны безразмерные профили средней температуры, полученные путем эксперимента и расчета с помощью сложных моделей (двухпараметрической, явной алгебраической и дифференциальной) для ТТП в выбранных сечениях. В целом наблюдается неплохое совпадение профилей (не только качественное, но и количественное) при использовании всех моделей, хотя и существует небольшое рассогласование даже в областях на плоской пластине перед выступом и в релаксационной зоне за выступом. Это рассогласование может быть связано с применением равномерных граничных условий для восходящего потока (постоянные скорости и температуры), в которых считается естественным развивать пограничный слой. В то время как в других работах [5–7] использованы заданные профили скоростей и температур потока, соответствующие экспериментальным данным в исследованных сечениях.

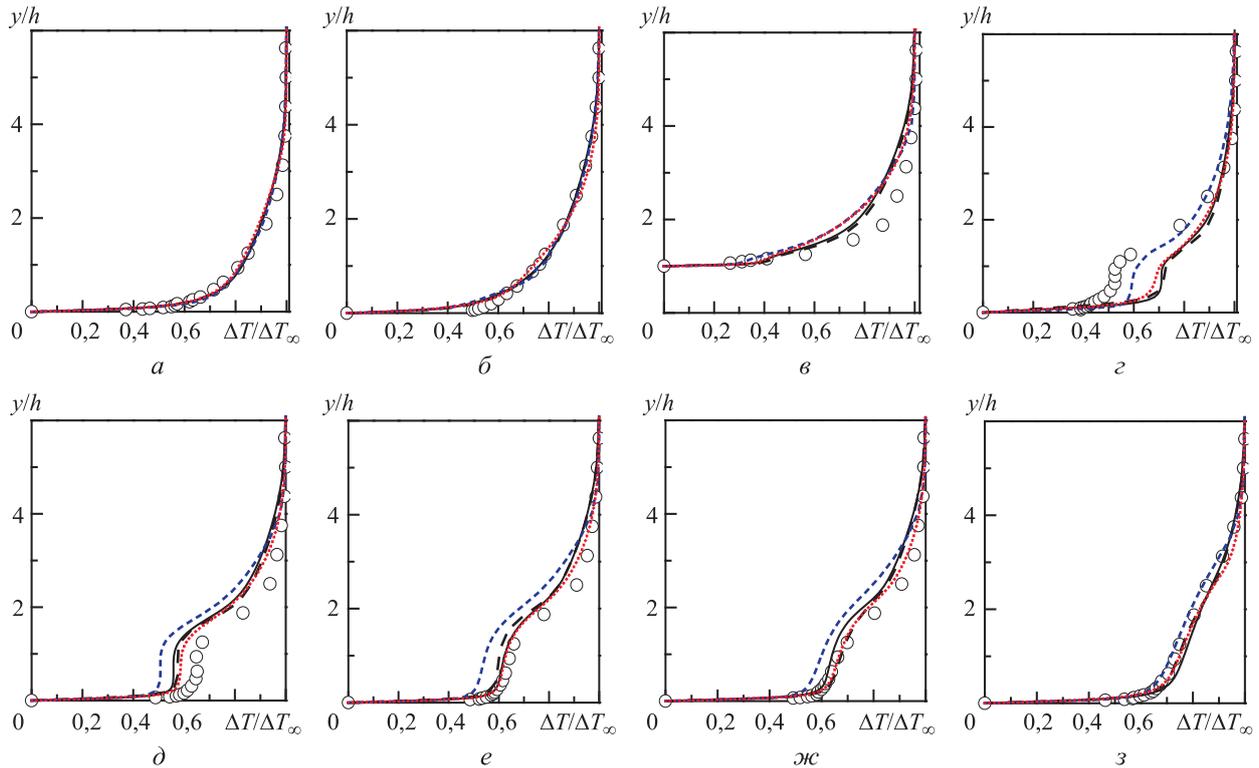


Рис. 4. Распределение средней температуры в сечениях $x/h = -11,94$ (а), $-1,94$ (б), $-0,50$ (в), $0,56$ (г), $2,13$ (д), $5,25$ (е), $8,38$ (ж) и $20,88$ (з) в условиях постоянного турбулентного числа Прандтля при обтекании потоком выступа:
 — SKE-KL; - - RKE; - · - LRN-LCL; · · · LRN-GL; ○ — экспериментальные данные

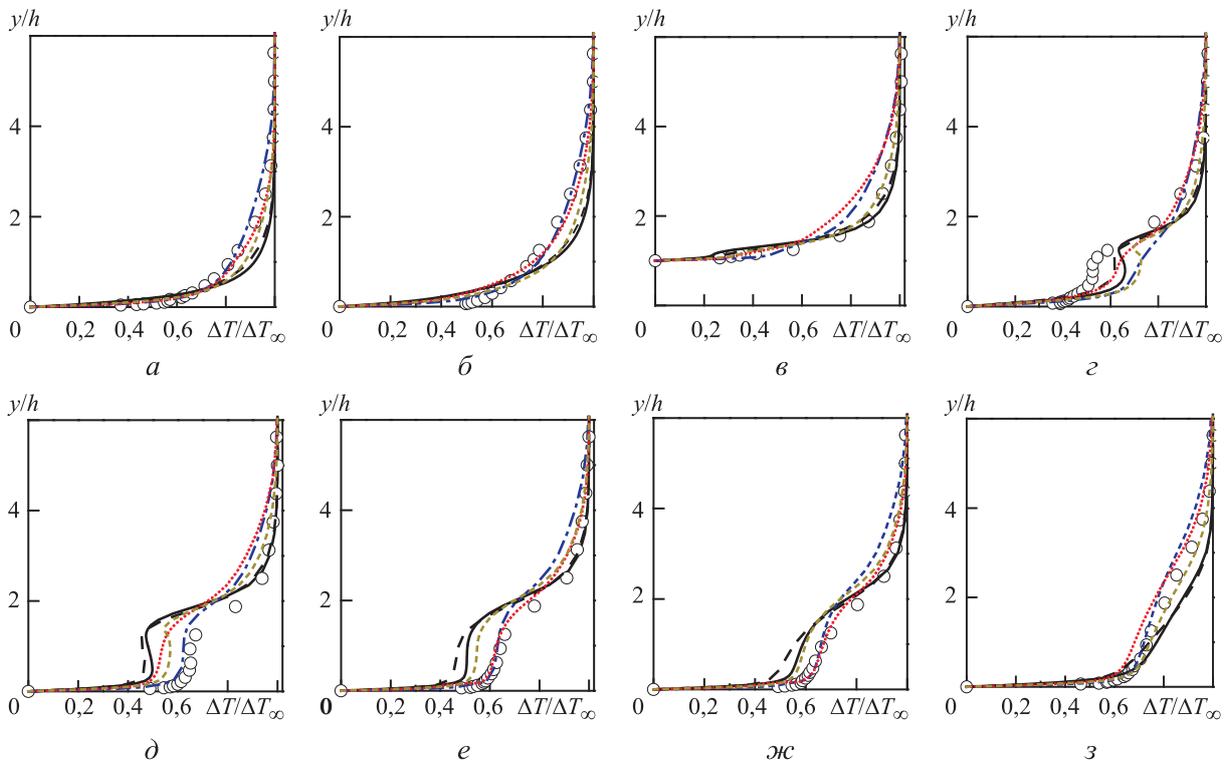


Рис. 5. Распределение средней температуры в сечениях $x/h = -11,94$ (а), $-1,94$ (б), $-0,50$ (в), $0,56$ (г), $2,13$ (д), $5,25$ (е), $8,38$ (ж) и $20,88$ (з) с использованием разных моделей для теплообмена при обтекании потоком выступа:
 — BCD; - - RS; - · - LRN-YSC; - · · MAS; · · · SL; ○ — экспериментальные данные

Этот метод, конечно, полезен для верификации модели, но не дает ее точной оценки для практического применения, когда такая детальная информация недоступна. Следует отметить, что указанные модели обеспечивают лучшее соответствие эксперименту, чем простые модели с нулевым уравнением в отрывных зонах, где профили скорости и температуры испытывают существенные изменения и сильно усложняют структуру течения и теплообмена.

На рис. 6 приведены расчетные и экспериментальные [17] профили пульсаций температуры $T'/\Delta T_\infty$ в выбранных сечениях. Видно, что численные прогнозы, полученные с помощью моделей BCD для ТТП, хорошо согласуются с экспериментальными данными. Высокореинольдсовая модель (AKN) дает более высокие значения пульсаций температуры во всех выбранных сечениях у стенки и в зоне смешения, а низкорейнольдсовая модель (SSZ) предсказывает существенно более низкие пульсации температуры в зоне смешения до и после выступа по сравнению с экспериментальными данными.

На рис. 7 показаны расчетные профили продольной составляющей ТТП $\rho C_p u' T' / q_{ст}$ в выбранных сечениях (C_p — удельная теплоемкость

воздуха при постоянном давлении). При подходе к выступу модифицированная явная алгебраическая модель (MAS) предсказывает существенно более высокие продольные ТТП по сравнению с другими моделями. Однако в застойных зонах возле выступа (в сечении $x/h = -1,94$) прогнозируемые с помощью трех явных алгебраических моделей продольные ТТП сливаются друг с другом и превосходят тепловые потоки, оцененные дифференциальной моделью SL и моделью с двумя уравнениями.

За выступом в отрывных зонах (в сечениях $2,13 \leq x/h \leq 8,38$) модель LRN-YSC дает существенно более низкие значения продольных ТТП, чем другие явные алгебраические модели (RS, MAS) и дифференциальная модель (SL), и дальше ее прогнозы аналогичны предсказанным по ним результатам.

Следует отметить, что модель с двумя уравнениями (BCD) показывает очень низкие значения продольных ТТП в областях на плоской пластине перед выступом и в релаксационной зоне за выступом и предсказывает в противоположном направлении по сравнению с другими сложными моделями в отрывных зонах (сечения $x/h = 5,25$ и $x/h = 8,38$). Модель с нулевым

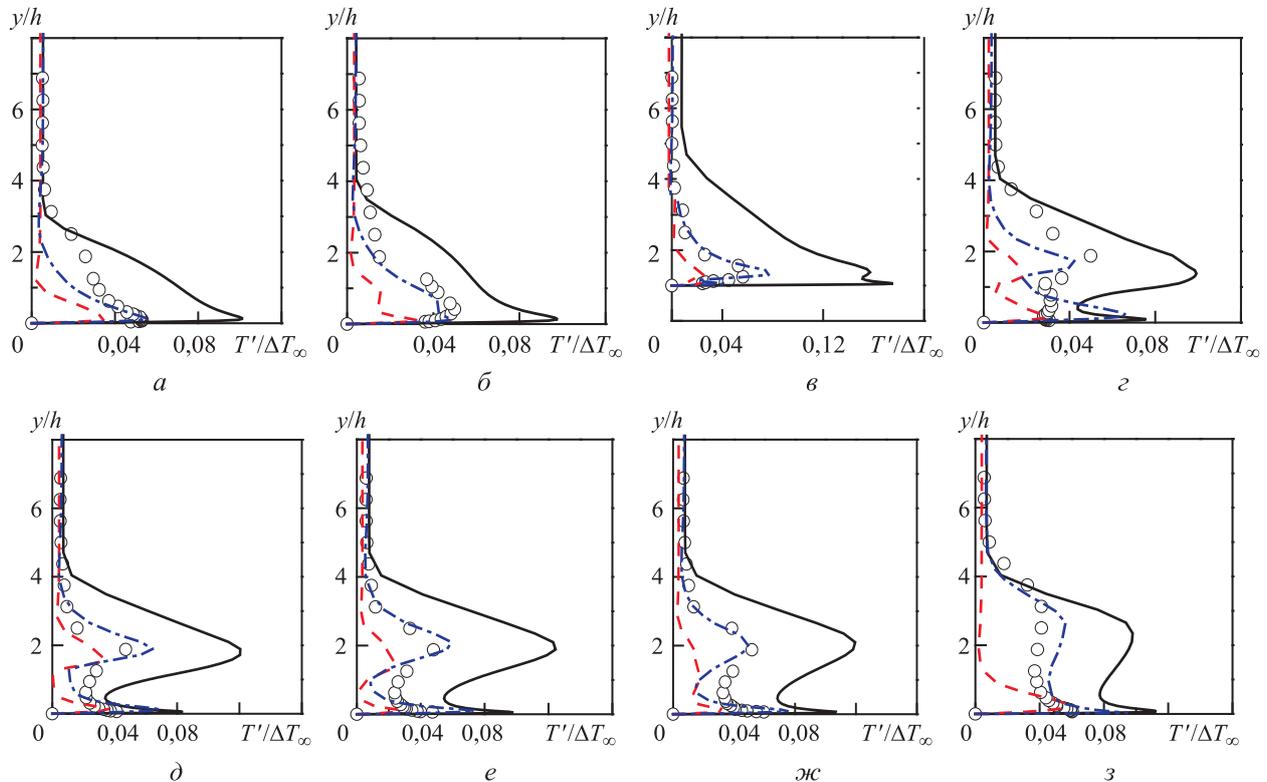


Рис. 6. Распределение пульсаций температуры в сечениях $x/h = -11,94$ (а), $-1,94$ (б), $-0,50$ (в), $0,56$ (г), $2,13$ (д), $5,25$ (е), $8,38$ (ж) и $20,88$ (з) при обтекании потока выступа:
 — — AKN; - - - SSZ; - · - · BCD; ○ — экспериментальные данные

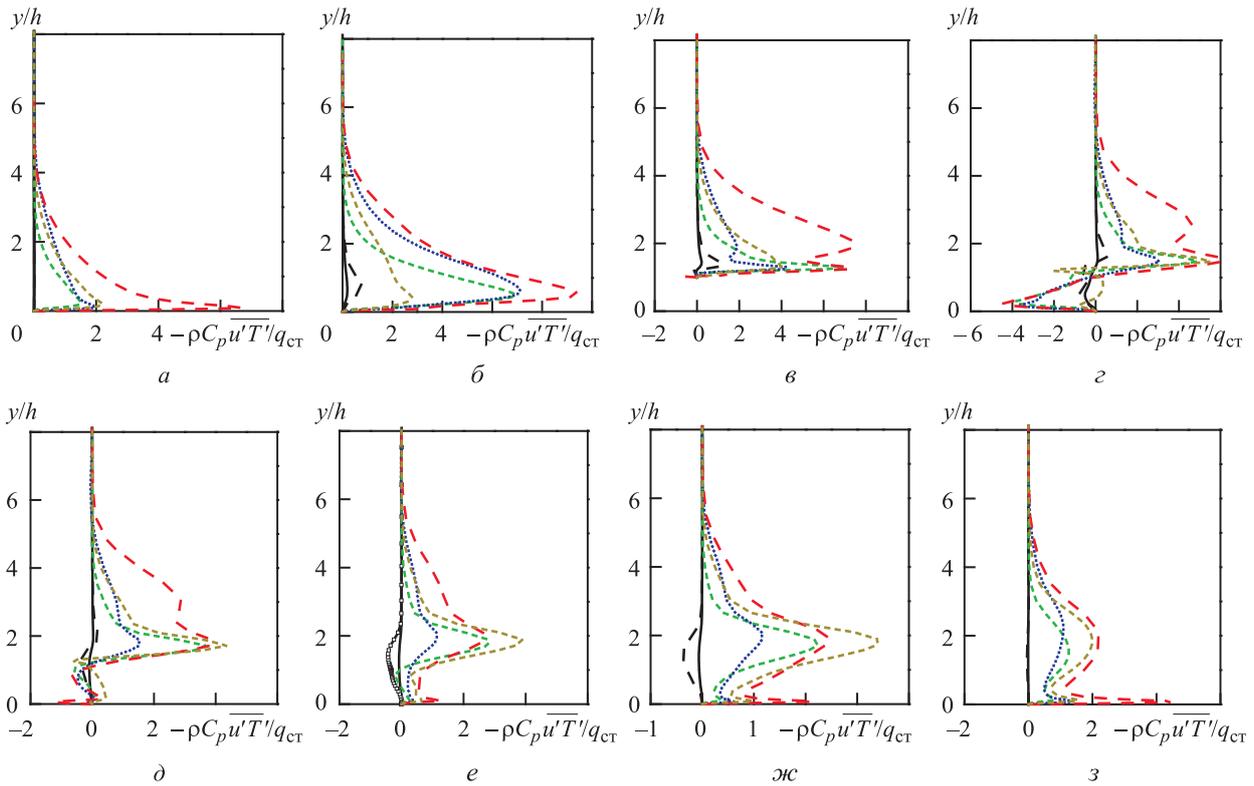


Рис. 7. Распределение продольной составляющей ТТП в сечениях $x/h = -11,94$ (а), $-1,94$ (б), $-0,50$ (в), $0,56$ (г), $2,13$ (д), $5,25$ (е), $8,38$ (ж) и $20,88$ (з) при обтекании потоком выступа:

— $Pr_t = 0,85$; - - - BCD; ····· RS; ····· LRN-YSC; - - - MAS; - · - SL

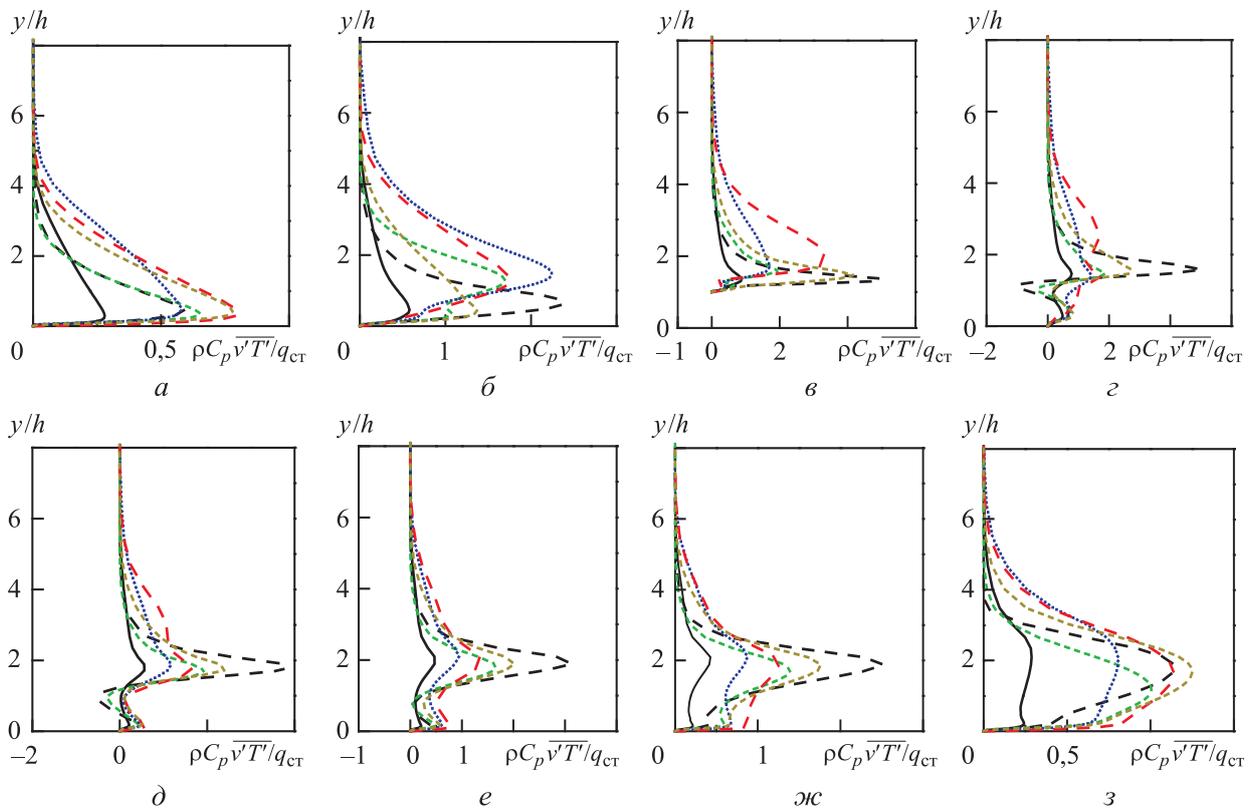


Рис. 8. Распределение нормальной составляющей ТТП в сечениях $x/h = -11,94$ (а), $-1,94$ (б), $-0,50$ (в), $0,56$ (г), $2,13$ (д), $5,25$ (е), $8,38$ (ж) и $20,88$ (з) при обтекании потоком выступа:

— $Pr_t = 0,85$; - - - BCD; ····· RS; ····· LRN-YSC; - - - MAS; - · - SL

уравнением почти не учитывает градиент температуры в продольном направлении и дает значения продольных ТТП, близкие к нулю во всех областях.

На рис. 8 приведены расчетные профили нормальной составляющей ТТП $\rho C_p \sqrt{T'} / q_{ст}$ в выбранных сечениях. Видно, что качественно профили для разных моделей похожи. Значения нормальных ТТП, определенные с помощью модели с нулевым уравнением, дают существенно более низкие значения около выступа во всех областях по сравнению с другими моделями. Это вызвано тем, что в модели с нулевым уравнением нормальные тепловые потоки зависят только от градиента температуры, а в других моделях они зависят от градиента осредненной скорости и поля турбулентности, которые имеют очень важное значение в отрывных зонах — в сечениях $0,56 \leq x/h \leq 8,38$ (см. рис. 4).

На рис. 9 и 10 показаны распределения локального относительного коэффициента теплоотдачи St/St_0 по поверхности пластины с выступом при обтекании его потоком, полученные с

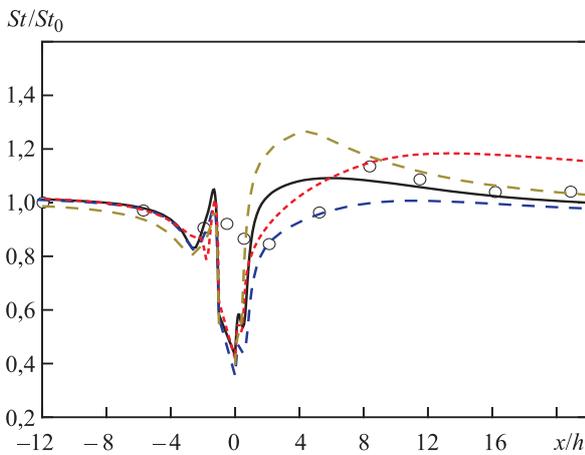


Рис. 9. Распределение локального относительного коэффициента теплоотдачи на поверхности пластины с выступом при использовании моделей с постоянным турбулентным числом Прандтля: — SKE-KL; - - RKE; ···· LRN-GL; - · - LRN-LCL; ○ — экспериментальные данные

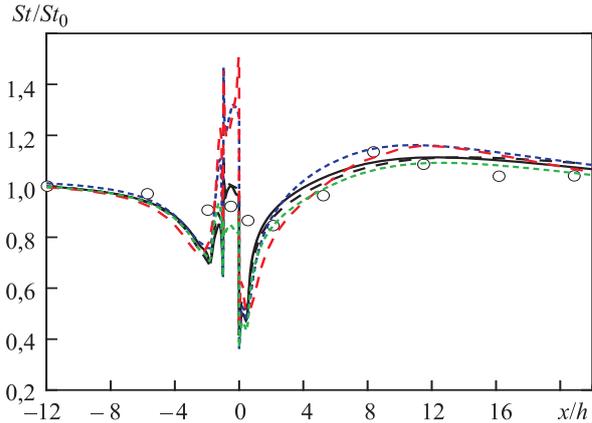


Рис. 10. Распределение локального относительного коэффициента теплоотдачи на поверхности пластины с выступом при использовании сложных моделей: — BCD; - - RS; ···· LRN-YSC; - · - MAS; - · - SL; ○ — экспериментальные данные

помощью моделей с постоянным турбулентным числом Прандтля и сложных моделей. В таблице приведены результаты отклонений, рассчитанных с помощью разных моделей для ТТП в эксперименте за выступом в отрывном течении. Как указано в работе [17], экспериментальные данные носят больше качественный характер, поскольку методы определения локальных коэффициентов теплоотдачи в застойных и отрывных зонах нуждаются в уточнении и дополнительных экспериментальных исследованиях для получения более полного представления о механизмах переноса в этих областях.

Распределения относительных коэффициентов теплоотдачи, полученные с помощью модели с нулевым уравнением на основе различных моделей турбулентности, за выступом заметно отличаются от экспериментальных [17]. Значительно лучшее качественное и количественное совпадение расчетных профилей с экспериментальными данными дают сложные модели (с двумя уравнениями (BCD)), явные алгебраические модели (AS, LRN-YSC, MAS) и дифференциальная (SL), базирующиеся на дифференциальной модели турбулентности (LRN-GL).

Сравнение экспериментальных и расчетных результатов

Отклонение от эксперимента, %	Модели								
	Простые ($Pr_t = 0,85$)				Сложные				
	SKE-KL	RKE	LRN-GL	LRN-LCL	BCD	RS	LRN-YSC	MAS	SL
Максимальное	21,7	12,1	13,4	41,1	7,5	6,8	11,4	8,0	6,3
Минимальное	0,5	0,5	1,2	0,6	2,4	2,1	1,1	2,0	0,4

Выводы

1. Проведены верификационные расчеты по моделям для турбулентных тепловых потоков: модель с нулевым уравнением, двухпараметрические диссипативные модели (AKN, SSZ, BCD) и явные алгебраические модели (RS, LRN-YSC, MAS), а также дифференциальная модель (SL). Верификация проводилась путем сравнения расчетных прогнозов профилей осредненной, пульсационной температуры и распределения коэффициентов теплоотдачи с экспериментальными данными при поперечном обтекании прямоугольного выступа, расположенного на плоской пластине.

2. Профили температуры за выступом в зоне смешения на границе между основным потоком и пристеночным течением (в зоне рециркуляции) имеют явно выраженный излом. Модель с нулевым уравнением не может дать точный прогноз для поля температуры в отрывной зоне. Более точного прогноза для поля температуры и распределения коэффициента теплоотдачи можно добиться при использовании сложных моделей. Кроме того, низкорейнольдсовая двухпараметрическая модель (BCD) для ТТП обеспечивает приемлемый прогноз для пульсации температуры во всех областях.

Литература

- [1] Shishov E.V. Turbulent heat and momentum transfer in boundary layers under strong pressure gradient conditions: Analysis of experimental data and numerical prediction. *Experimental thermal and fluid science*, 1991, vol. 4, iss. 4, pp. 389–398.
- [2] Леонтьев А.И., Шишов Е.В., Герасимов А.В. Модель турбулентности « k - ϵ » для расчета гидродинамического и температурного полей градиентных пристенных течений. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 1999, № 5–6, с. 5–19.
- [3] Леонтьев А.И., Шишов Е.В., Захаров А.Ю. Моделирование переноса теплоты и импульса в отрывном течении за обратным уступом. *Доклады академии наук*, 1995, т. 341, № 3, с. 763–767.
- [4] Rhee G.H., Sung H.J. A nonlinear low-Reynolds number heat transfer model for turbulent separated and reattaching flows. *International journal of heat and mass transfer*, 2000, vol. 43, iss. 8, pp. 1439–1448.
- [5] Abe K., Suga K. Towards the development of a Reynolds-averaged algebraic turbulent scalar-flux model. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2001, vol. 22, iss. 1, pp. 19–29.
- [6] Mazaheri K., Chaharlang K.K., Karimi M. A modified turbulent heat-flux model for predicting heat transfer in separating-reattaching flows and film cooling. *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 110, pp. 1609–1623.
- [7] Younis B.A., Weigand B., Spring S. An explicit algebraic model for turbulent heat transfer in wall-bounded flow with streamline curvature. *ASME. Journal of Heat Transfer*, 2007, vol. 129, iss. 4, pp. 425–433.
- [8] Kim J., Moin P. Transport of passive scalars in a turbulent channel flow, *In Turbulent Shear Flows 6*, Springer, 1989, pp. 85–96, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-642-73948-4_9
- [9] Debusschere B., Rutland C. Turbulent scalar transport mechanisms in plane channel and Couette flows. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, vol. 47, iss. 8–9, pp. 1771–1781.
- [10] Abe K., Kondoh T., Nagano Y. A new turbulence model for predicting fluid flow and heat transfer in separating and reattaching flows—II. Thermal field calculations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1995, vol. 38, iss. 8, pp. 1467–1481.
- [11] Sommer T., So R., Zhang H. Near-Wall Variable Prandtl-Number Turbulence Model for Compressible Flows. *AIAA Journal*, 1993, vol. 31, no. 1, pp. 27–35.
- [12] Brinckman K.W., Calhoun W.H., Dash S.M. Scalar fluctuation modeling for high-speed aeropropulsive flows. *AIAA Journal*, 2007, vol. 45, no. 5, pp. 1036–1046.
- [13] Dietz C.F., Neumann S.O., Weigand B. A comparative study of the performance of explicit algebraic models for the turbulent heat flux. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications: An International Journal of Computation and Methodology*, 2007, vol. 52, iss. 2, pp. 101–126.

- [14] Weihing P., Younis B.A., Weigand B. Heat transfer enhancement in a ribbed channel: Development of turbulence closures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, vol. 76, pp. 509–522.
- [15] ANSYS. *Fluent 17.2 Theory Guide*. ANSYS Fluent Inc., Canonsburg, PA, 2016. URL: https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/17.2/en-us/help/flu_th/th-x1-20001.1.html (дата обращения 30 марта 2018).
- [16] Белов И.А., Исаев С.А., Коробков В.А. *Задачи и методы расчета отрывных течений несжимаемой жидкости*. Ленинград, Судостроение, 1989. 256 с.
- [17] Афанасьев В.Н., Трифионов В.Л., Гетя С.И., Кон Дехай. Выступ в турбулентном пограничном слое. *Машиностроение и компьютерные технологии*, 2017, № 10, с. 13–35.
- [18] Afanasiev V.N., Kong D.H. Rectangular ribs in turbulent boundary layer on the initially smooth surface. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 891, art. no. 012140, doi: 10.1088/1742-6596/891/1/012140
- [19] Launder B.E. Modelling convective heat transfer in complex turbulent flows. *Engineering Turbulence Modelling and Experiments – Proc. Second Int. Symp. on Engineering Turbulence Modelling and Measurements*, 31 May–2 June 1993, Florence, Italy, Elsevier Science, 1993, pp. 3–22.
- [20] Lien F.S., Chen W.L., Leschziner M.A. Low Reynolds-number eddy-viscosity modeling based on non-linear stress-strain/vorticity relations. *Engineering Turbulence Modeling and Experiments*, 1996, vol. 3, pp. 91–100.
- [21] Lien F.S., Leschziner M.A. Assessment of turbulent transport models including non-linear RNG eddy-viscosity formulation and second-moment closure. *Computers & Fluids*, 1994, vol. 23, no. 8, pp. 983–1004.
- [22] Gibson M., Launder B. Ground effects on pressure fluctuations in the atmospheric boundary layer. *Journal of Fluid Mechanics*, 1978, vol. 86, no. 03, pp. 491–511.
- [23] Launder B.E., Shima N. Second-moment closure for the near-wall sublayer development and application. *AIAA Journal*, 1989, vol. 27, no. 10, pp. 1319–1325.
- [24] Batchelor G.K. Diffusion in a field of homogenous turbulence. Eulerian Analysis. *Australian Journal of Scientific Research*, 1949, vol. 2, pp. 437–450.

References

- [1] Shishov E.V. Turbulent heat and momentum transfer in boundary layers under strong pressure gradient conditions: Analysis of experimental data and numerical prediction. *Experimental thermal and fluid science*, 1991, vol. 4, iss. 4, pp. 389–398.
- [2] Leont'yev A.I., Shishov E.V., Gerasimov A.V. The « k - ε » turbulence model for calculating the hydrodynamic and temperature fields of gradient near-wall flows. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 1999, no. 5–6, pp. 5–19 (in Russ.).
- [3] Leont'ev A.I., Shishov E.V., Zaharov A.Yu. Modelirovanie perenosa teploty i impul'sa v otrivnom techenii za obratnym ustupom [Simulation of heat and momentum transfer in the separated flow behind the back ledge]. *DAN [Academy of Sciences reports]*. 1995, vol. 341, no. 3, pp. 763–767.
- [4] Rhee G.H., Sung H.J. A nonlinear low-Reynolds number heat transfer model for turbulent separated and reattaching flows. *International journal of heat and mass transfer*, 2000, vol. 43, iss. 8, pp. 1439–1448.
- [5] Abe K., Suga K. Towards the development of a Reynolds-averaged algebraic turbulent scalar-flux model. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2001, vol. 22, iss. 1, pp. 19–29.
- [6] Mazaheri K., Chaharlang K.K., Karimi M. A modified turbulent heat-flux model for predicting heat transfer in separating-reattaching flows and film cooling. *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 110, pp. 1609–1623.
- [7] Younis B.A., Weigand B., Spring S. An explicit algebraic model for turbulent heat transfer in wall-bounded flow with streamline curvature. *ASME. Journal of Heat Transfer*, 2007, vol. 129, iss. 4, pp. 425–433.

- [8] Kim J., Moin P. Transport of passive scalars in a turbulent channel flow. In *Turbulent Shear Flows 6*, Springer, 1989, pp. 85–96, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-642-73948-4_9
- [9] Debusschere B., Rutland C. Turbulent scalar transport mechanisms in plane channel and Couette flows. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, vol. 47, iss. 8–9, pp. 1771–1781.
- [10] Abe K., Kondoh T., Nagano Y. A new turbulence model for predicting fluid flow and heat transfer in separating and reattaching flows–II. Thermal field calculations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1995, vol. 38, iss. 8, pp. 1467–1481.
- [11] Sommer T., So R., Zhang H. Near-Wall Variable Prandtl-Number Turbulence Model for Compressible Flows. *AIAA Journal*, 1993, vol. 31, no. 1, pp. 27–35.
- [12] Brinckman K.W., Calhoun W.H., Dash S.M. Scalar fluctuation modeling for high-speed aeropropulsive flows. *AIAA Journal*, 2007, vol. 45, no. 5, pp. 1036–1046.
- [13] Dietz C.F., Neumann S.O., Weigand B. A comparative study of the performance of explicit algebraic models for the turbulent heat flux. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications: An International Journal of Computation and Methodology*, 2007, vol. 52, iss. 2, pp. 101–126.
- [14] Weihing P., Younis B.A., Weigand B. Heat transfer enhancement in a ribbed channel: Development of turbulence closures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, vol. 76, pp. 509–522.
- [15] ANSYS. *Fluent 17.2 Theory Guide*. ANSYS Fluent Inc., Canonsburg, PA, 2016. Available at: https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/17.2/en-us/help/flu_th/th-x1-20001.1.html (accessed 30 March 2018).
- [16] Belov I.A., Isaev S.A., Korobkov V.A. *Zadachi i metody rascheta otryvnykh techeniy neszhimaemoy zhidkosti* [Problems and methods of calculation of separated incompressible fluid flows]. Leningrad, Sudostroenie publ., 1989. 256 p.
- [17] Afanas'ev V.N., Trifonov V.L., Getya S.I., Kon Dekhay. Vystup v turbulentnom pogranichnom sloe [Rib in Turbulent Boundary Layer]. *Mashinostroenie i komp'yuternye tekhnologii* [Mechanical engineering and computer science]. 2017, no. 10, pp. 13–35.
- [18] Afanasiev V.N., Kong D.H. Rectangular ribs in turbulent boundary layer on the initially smooth surface. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 891, art. no. 012140, doi: 10.1088/1742-6596/891/1/012140
- [19] Launder B.E. Modelling convective heat transfer in complex turbulent flows. *Engineering Turbulence Modelling and Experiments – Proc. Second Int. Symp. on Engineering Turbulence Modelling and Measurements*, 31 May–2 June 1993, Florence, Italy, Elsevier Science, 1993, pp. 3–22.
- [20] Lien F.S., Chen W.L., Leschziner M.A. Low Reynolds-number eddy-viscosity modeling based on non-linear stress-strain/vorticity relations. *Engineering Turbulence Modeling and Experiments*, 1996, vol. 3, pp. 91–100.
- [21] Lien F.S., Leschziner M.A. Assessment of turbulent transport models including non-linear RNG eddy-viscosity formulation and second-moment closure. *Computers & Fluids*, 1994, vol. 23, no. 8, pp. 983–1004.
- [22] Gibson M., Launder B. Ground effects on pressure fluctuations in the atmospheric boundary layer. *Journal of Fluid Mechanics*, 1978, vol. 86, no. 03, pp. 491–511.
- [23] Launder B.E., Shima N. Second-moment closure for the near-wall sublayer development and application. *AIAA Journal*, 1989, vol. 27, no. 10, pp. 1319–1325.
- [24] Batchelor G.K. Diffusion in a field of homogenous turbulence. Eulerian Analysis. *Australian Journal of Scientific Research*, 1949, vol. 2, pp. 437–450.

Статья поступила в редакцию 23.10.2018

Информация об авторах

АФАНАСЬЕВ Валерий Никанорович — доктор технических наук, профессор кафедры «Теплофизика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: a-mvtu@yandex.ru).

КОН Дехай — аспирант кафедры «Теплофизика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: kongdehai2013@gmail.com).

ЕГОРОВ Кирилл Сергеевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплофизика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: egorovks@bmstu.ru).

Information about the authors

AFANASIEV Valeriy Nikanorovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Thermophysics. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: a-mvtu@yandex.ru).

KONG Dehai — Postgraduate, Department of Thermophysics. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: kongdehai2013@gmail.com).

EGOROV Kirill Sergeevich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Thermophysics. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: egorovks@bmstu.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Афанасьев В.Н., Кон Дехай, Егоров К.С. Верификация моделей для турбулентных тепловых потоков при обтекании прямоугольного выступа на пластине. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2019, № 1, с. 58–71, doi: 10.18698/0536-1044-2019-1-58-71

Please cite this article in English as:

Afanasiev V.N., Kong Dehai, Egorov K.S. Verification of Models for Turbulent Heat Fluxes in the Flow over a Rectangular Rib on a Plate. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2019, no. 1, pp. 58–71, doi: 10.18698/0536-1044-2019-1-58-71



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышло в свет 2-е издание учебного пособия

В.Н. Охитина, С.С. Меньшакова

«Фугасное действие боеприпасов»

Раскрыты основные понятия и определения, классификация и постановка задач теории действия взрыва. Приведены решения внутренней задачи, в качестве которой рассмотрена одномерная детонация заряда взрывчатых веществ различной плотности, а также некоторые аналитические решения внешней задачи теории действия взрыва. Кроме того, даны решения граничной задачи названной теории в частной постановке при контактном и близком неконтактном взрыве и оценка фугасного действия на элементы конструкций.

Для студентов, обучающихся по специальности «Боеприпасы и взрыватели».

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru