

13. Никаноров Н. В., Шандаров С. М. Волноводная фотоника ИТМО. Санкт-Петербург, 2008.
14. Morgan T. P. Nvidia Rounds Out Pascal Tesla Accelerator Lineup. June 20, 2016. [Electronic resource]. Mode of access: <http://www.nextplatform.com/2016/06/20/nvidia-rounds-pascal-tesla-accelerator-lineup>.

PHOTONIC COMPUTER. STRUCTURE AND ALGORITHMS. EVALUATION OF PARAMETERS

S. A. Stepanenko

Russian Federal Nuclear Center –
All-Russia Research Institute of Experimental Physics, Sarov

A structure and implementation principles of a photonic computer are proposed. Its operation is based on the effects of interaction between coherent light wave systems generated by a laser source generated by a laser source.

The estimations of the performance, power consumed, and physical parameters were produced. These estimations show potential advantages of the photonic computer as compared to the electric one.

Key words: photonic processor, optic gate, data flow control.

УДК 532.5

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРИСТЕНОЧНЫХ ФУНКЦИЙ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

Д. А. Уткин, А. С. Козелков, В. В. Курулин

Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский НИИ экспериментальной физики», Саров

Для численного моделирования турбулентных течений в каналах и трубах особое внимание должно быть уделено приграничной области турбулентного потока. Метод пристеночных функций позволяет на основе эмпирических закономерностей получить распределение профилей температуры и скорости в области пограничного слоя на относительно грубых сетках. Большинство тепловых пристеночных функций, представленных в литературе, имеют недостатки, связанные с существенной потерей точности результата на сетках низкого разрешения. В настоящем докладе представлен новый вариант пристеночной функции для аппроксимации теплового потока на стенке для чисел Прандтля в интервале от 0,7 до 2. Функция получена методом калибровки подходящих значений безразмерной температуры T^+ при различных y^+ относительно предельного численного решения, полученного на самой густой расчётной сетке, для задачи турбулентного течения в канале. Точность работы функции протестирована на других канонических турбулентных задачах. Результаты работы предложенной функции сравниваются с аналогичными результатами,

полученными по другим пристеночным функциям. Показано, что результаты, полученные с помощью предложенной тепловой пристеночной функции, дают наиболее низкую погрешность относительно других рассмотренных функций.

Ключевые слова: численное моделирование, турбулентность, пограничный слой, турбулентный теплообмен, пристеночная функция.

Введение

Большая часть практически важных течений жидкости или газа проходит в турбулентном режиме и содержит участки пограничного слоя вблизи твердой поверхности. Пограничный слой имеет сложную структуру и характеризуется высокими градиентами продольной скорости и температуры. Градиент скорости внутри пограничного слоя напрямую определяет силу трения и, следовательно, общее гидродинамическое сопротивление [1]. Градиент температуры, в свою очередь, определяет тепловой поток, передающийся от жидкости к твёрдому телу. В связи с этим точность численного моделирования большинства задач напрямую зависит от точности моделирования пограничного слоя.

Методы численного моделирования пограничного слоя определяются используемыми подходами моделирования турбулентности. Так, при прямом численном моделировании в пограничном слое должны быть численно воспроизведены вихри всех линейных масштабов, вплоть до Колмогоровского [2]. Это требует использования подробных сеточных моделей, что на практике приводит к чрезмерно высокому возрастанию ресурсных затрат [3 – 5]. В настоящее время для моделирования задач установившегося турбулентного течения жидкости и газа на практике чаще всего применяют RANS модели турбулентности [6, 7]. В рамках RANS модели вместо мгновенных полей основных величин рассматриваются осредненные поля. Это позволяет существенно сократить количество ячеек в пограничном слое. Однако градиенты осредненных полей скорости и температуры по направлению, перпендикулярному стенке, в пограничном слое остаются высокими и требуют качественного сеточного разрешения в данной области.

Качество сеточного разрешения определяется расстоянием от стенки до первого счетного узла, который, для получения хорошего результата, должен располагаться глубоко внутри ламинарного подслоя, что соответствует значению безразмерного параметра $y^+ < 1$ [1]. Уже при $y^+ > 10$ прямой метод нахождения силы трения и теплового потока на стенке дает значительную погрешность [8, 9].

Применение универсальных пристеночных функций позволяет решить данную проблему и с хорошей точностью предсказывать коэффициент трения и производную скорости на твердой стенке в широком диапазоне значений параметра y^+ . Метод пристеночных функций получил широкое распространение после выхода работы Лаундера и Сполдинга [8] и с тех пор зарекомендовал себя как неотъемлемый инструмент для работы с RANS моделями турбулентности. Метод основан на инициализации граничных условий уравнения сохранения импульса и энергии не на стенке, а на некотором расстоянии от неё, вне области ламинарного подслоя. Граничные условия переносятся в область турбулентного пристеночного слоя, что и позволяет снизить количество счётных ячеек в направлении нормали к стенке. За основополагающие допущения метода пристеночных функций взяты универсальность логарифмического профиля скорости и температуры в пристеночной области и постоянство касательного напряжения, теплового потока и турбулентной энергии [10]. В связи с этим отдельно выделяют пристеночные функции для аппроксимации профиля продольной скорости и тепловые пристеночные функции для аппроксимации профиля температуры.

Дальнейшее развитие метода пристеночных функций сводится к расширению диапазона их применимости за счёт повышения точности в области ламинарного подслоя. Так в [11] приведена пристеночная тепловая функция, которая автоматически разрешает ламинарный подслой и логарифмическую подобласть пограничного слоя. В [12] приводится функция, включающая три формульных аппроксимации для разрешения пограничного слоя в ламинарной, буферной

и логарифмической подобласти. В [13] приведены варианты пристеночных функций температуры и скорости для чисел Прандтля $Pr = 0,7$ и $Pr = 5,9$. В [10] приводится анализ влияния на пристеночные функции таких усложняющих течение факторов как: течение на непроницаемых поверхностях с ненулевым градиентом давления и проницаемых с нулевым градиентом давления, а также свободная конвекция на непроницаемых и проницаемых поверхностях.

Такое многообразие пристеночных функций обусловлено попыткой снизить погрешность результатов при их применении для того или иного класса задач. Из анализа работ можно сделать вывод о том, что выражения для пристеночных функций температуры и скорости подбираются в зависимости от категории рассматриваемых задач, используемого численного метода и граничных условий, устанавливаемых дополнительно на стенку (шероховатость, переменный градиент давления и другие).

В настоящей работе показано, что при использовании конечно-объемного метода и решении задач вынужденной конвекции несжимаемой жидкости существующие пристеночные функции для температуры ведут себя неудовлетворительно. В работе приводится процедура получения новой тепловой пристеночной функции для задач с $Pr = 0,7 \div 2$. Формулировка новой тепловой пристеночной функции выполняется путем ее калибровки на задаче о турбулентном течении в канале на сетках в широком диапазоне y^+ . Принцип калибровки – определение зависимости $T^+(y^+)$, приводящее к наиболее точному результату при каждом отдельно взятом y^+ .

Анализ эффективности полученной тепловой функции выполняется путем решения задач вынужденной конвекции с тепловым пограничным слоем: течение в плоском канале с подогреваемыми стенками и объемным тепловыделением [14], течение Куэтта [15], обтекание подогреваемой пластины [16]. Каждая из задач решается на сетках с различным пристеночным разрешением.

1. Анализ существующих пристеночных функций для теплового пограничного слоя

Пристеночные функции устанавливают связь между параметрами T^+ и y^+ . Здесь T^+ – температура на стенке, обезразмеренная в величинах температуры стенки T_w и температуры в первом счѐтном узле T_i , плотности ρ , удельной теплоёмкости C_p , динамической скорости u_r и теплового потока на стенке q_w :

$$T^+ = \frac{(T_w - T_i) \rho C_p u_r}{q_w}.$$

Данное выражение используется для вычисления теплового потока на стенке. Безразмерное расстояние до стенки вычисляется с помощью величины плотности ρ , динамической скорости u_r , кратчайшего расстояния до стенки d и динамической вязкости μ :

$$y^+ = \frac{\rho u_r d}{\mu}.$$

Далее приведены известные варианты пристеночных функций. Наиболее распространенной пристеночной функцией является функция вида [11]:

$$T^+(y^+) = y^+ Pr e^{(-\Gamma)} + \left\{ 2,12 \ln \left[\left(16 + y^+ \right) \frac{2,5(2 - y/\delta)}{1 + 4(1 - y/\delta)^2} \right] + \beta(Pr) \right\} e^{(-1/\Gamma)},$$

$$\beta(Pr) = \left(3,85 Pr^{1/3} - 1,3 \right)^2 + 2,12 \ln Pr, \quad (1)$$

$$\Gamma = \frac{0,01 (y^+ Pr)^4}{1 + 5 y^+ Pr^3}.$$

Функция (1) характеризуется наличием интерполяционных коэффициентов $e^{(-\Gamma)}$ и $e^{(-1/\Gamma)}$, для плавного переключения между зависимостями для ламинарного и логарифмического подслоя. В [11] отмечается, что функция подходит для расчётов в широком диапазоне чисел Прандтля.

Пристеночная функция для течений с числом Прандтля $Pr = 0,7 \div 1$ (соответствует воздуху) была предложена в [13]:

$$T^+(y^+) = \begin{cases} y^+ Pr & y^+ \leq 13,2 \\ 2,075 \ln(y^+) + 12,2 Pr - 5,34, & y^+ > 13,2 \end{cases} \quad (2)$$

Данная функция отличается от функции (1) зависимостью $T^+(y^+)$ в логарифмической части пограничного слоя. Здесь выделена точка пересечения пристеночных функций для ламинарного и логарифмического подслоя, при этом область перехода между ними не сглаживается, что может привести к потере точности расчётов при соответствующих y^+ .

В [12] приведена функция, уточняющая распределение $T^+(y^+)$ в области переходного подслоя отдельной формулой:

$$T^+(y^+) = \begin{cases} y^+ Pr, & y^+ Pr < 1 \\ 1,87 \ln(y^+ Pr + 1) + 0,065 y^+ Pr - 0,36, & 1 \leq y^+ Pr \leq 11,7 \\ 2,5 \ln(y^+ Pr + 1) - 1, & y^+ Pr > 11,7 \end{cases} \quad (3)$$

Отдельная формула для области переходного подслоя в функции (3) необходима для сглаживания профиля $T^+(y^+)$ в данном конкретном интервале $y^+ Pr = 1 \div 11,7$.

Ниже приводятся результаты сравнения перечисленных тепловых функций на задачах моделирования вынужденной конвекции с тепловым пограничным слоем. В качестве пристеночных функций для трения на стенке используются универсальные пристеночные функции вида [17]:

$$U^+ = \frac{1}{\sqrt[4]{\frac{1}{U_{\text{vis}}^4} + \frac{1}{U_{\text{log}}^4}}}, \quad U_{\text{vis}} = y^+, \quad U_{\text{log}} = \frac{1}{k} \log(Ey^+), \quad E = 7,3, \quad (4)$$

где $k = 0,41$ – константа Кармана. Значение U^+ используется для вычисления трения r_w :

$$u_r = U_1 / U^+, \quad r_w = \rho u_r^2. \quad (5)$$

Кинетическая энергия турбулентности k и скорость диссипации турбулентной энергии ω в приграничных ячейках аппроксимируются выражениями:

$$k_1 = \left(\frac{1}{k_{\text{vis}}} + \frac{1}{k_{\text{log}}} \right)^{-1}, \quad k_{\text{vis}} = 0,002 u_r^2 (y^+)^{3,5}, \quad k_{\text{log}} = \frac{u_r^2}{0,3}, \quad (6)$$

$$\omega_1 = \sqrt{(\alpha_{\text{vis}} \omega_{\text{vis}})^2 + \omega_{\text{log}}}, \quad \omega_{\text{vis}} = \frac{80\nu}{d^2}, \quad \omega_{\text{log}} = \frac{u_r}{0,3kd}, \quad \alpha_{\text{vis}} = 0,7. \quad (7)$$

Данные формулы совмещают аппроксимацию для ламинарного (вязкого) подслоя (vis) и логарифмической подобласти (log). В зависимости от того, какому по величине y^+ соответствует область пограничного слоя, больший вклад вносит то или иное соответствующее выражение.

В настоящем докладе моделирование турбулентности осуществляется по модели $k - \omega$ SST. Для численного решения системы уравнений Навье-Стокса применяется метод SIMPLE на основе конечно-объемной аппроксимации. Подробно описание используемого метода приводится в [15, 18, 19]. Численные эксперименты и реализация вышеописанных пристеночных функций проводятся на базе российского пакета программ ЛОГОС, предназначенного для решения сопряженных трехмерных задач конвективного теплопереноса, аэродинамики и гидродинамики на параллельных ЭВМ [4, 5, 7].

Чтобы оценить точность работы пристеночных функций «А» – «В» решим задачу турбулентного течения в канале с охлаждаемыми стенками. Задача решается при числе Рейнольдса

$Re_r = 900$, построенного по высоте канала и динамической скорости на стенке u_r . На стенках канала задана фиксированная температура $T = 0$. В расчетной области определено объемное энерговыделение, заданное объемным источником в уравнении энергии $Q = \frac{2\rho C_P}{Re_r Pr}$. Движение жидкости задаётся объемным источником в уравнении импульсов $I_x = \frac{2\rho u_r^2}{h}$. На входной и выходной границе заданы периодические граничные условия.

Данная задача решалась на нескольких расчётных сетках, которые соответствовали значениям $y^+ = 0,025 \div 60$. Расчетные сетки содержали сгущение к стенкам по геометрической прогрессии с коэффициентом роста 1,15. При установлении стационарного режима течения все тепло, возникающее в результате действия объемного источника, покидает область через тепловой поток на стенках. Неизвестной величиной в задаче является распределение температуры и её максимальное значение, которое реализуется в центре канала. При недооценке теплового потока q_w значение максимальной температуры в канале T_{\max}^+ завышается, и, наоборот, при переоценке теплового потока величина максимальной температуры занижается.

Для оценки результатов рассматривается графики отклонения $dT = \frac{T_{\max}^+ - T_{\max}^0}{T_{\max}^0}$, где T_{\max}^0 – максимальная безразмерная температура, полученная на сетке $y^+ = 0,025$. На рис. 1 представлены результаты отклонения dT_{\max}^+ от y^+ , полученные при числе Прандтля $Pr = 1$. Кривые «А», «Б», «В» – отклонение максимальной температуры, полученное для функций (1), (2) и (3) соответственно.

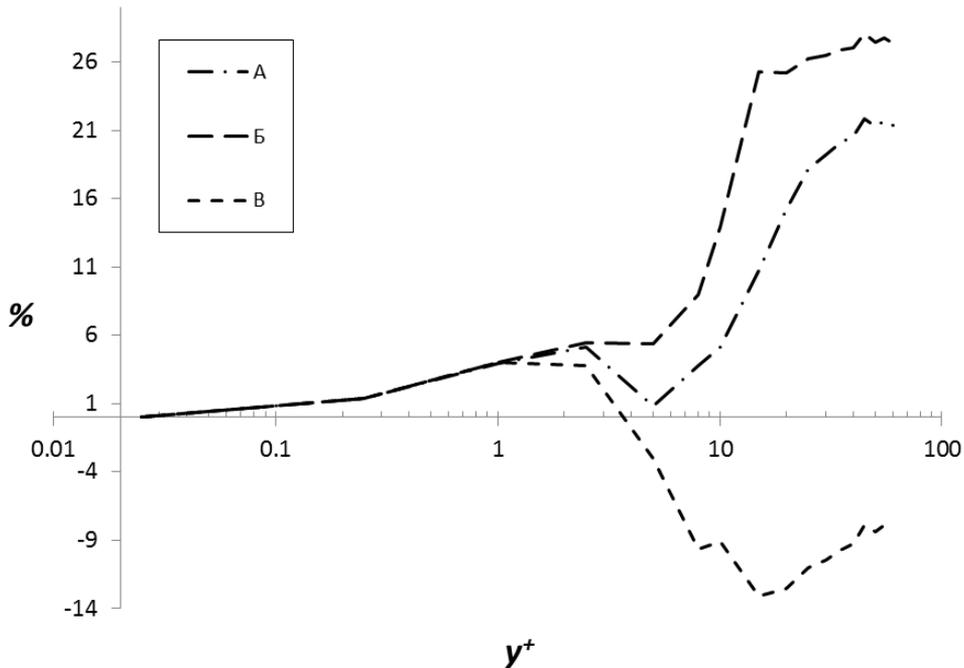


Рис. 1. Отклонение максимальной температуры в зависимости от y^+ при $Pr = 1$

Графики показывают, что до $y^+ = 1$ пристеночные функции дают одинаковое отклонение, не более 4 %. После $y^+ = 1$ наблюдаются серьезные отклонения, имеющие неодинаковый характер. Максимальная погрешность функций «А», «Б» и «В» составляет 20 %, 28 % и 13 % соответственно. Также функции «А» и «В» демонстрируют немонокотное изменение полученного результата – на практике это означает, что при измельчении расчетной сетки данные функции могут приводить к ухудшению результата.

Таким образом, рассмотренные пристеночные функции дают неудовлетворительный результат. Подобный уровень отклонений наблюдается и при других числах Прандтля. В следующем разделе приводится процедура получения новой тепловой пристеночной функции для задач с $Pr = 0,7 \div 2$, которая позволяет значительно уменьшить погрешность вычислений для рассматриваемого численного метода.

2. Получение новой тепловой пристеночной функции

Формулировка новой тепловой пристеночной функции выполняется путем её калибровки на задаче о турбулентном течении в канале на сетках с y^+ , лежащих в широком диапазоне значений. Принцип калибровки – определение зависимости $T^+(y^+)$, приводящее к наиболее точному результату при каждом отдельно взятом y^+ . Процесс подбора оптимальных значений T^+ подразумевает получение таких значений, при которых значение T_{\max}^+ будет соответствовать предельному значению T_{\max}^0 , полученному при расчёте на самой подробной сетке с $y^+ = 0,025$.

На рис. 2 представлены результаты полученных распределений T^+ от y^+ для трёх чисел Прандтля. В приведенные результаты не включены расчёты для вязкого подслоя ($y^+ < 2.5$), где распределение профиля T^+ соответствует выражению $T^+ = y^+ Pr$.

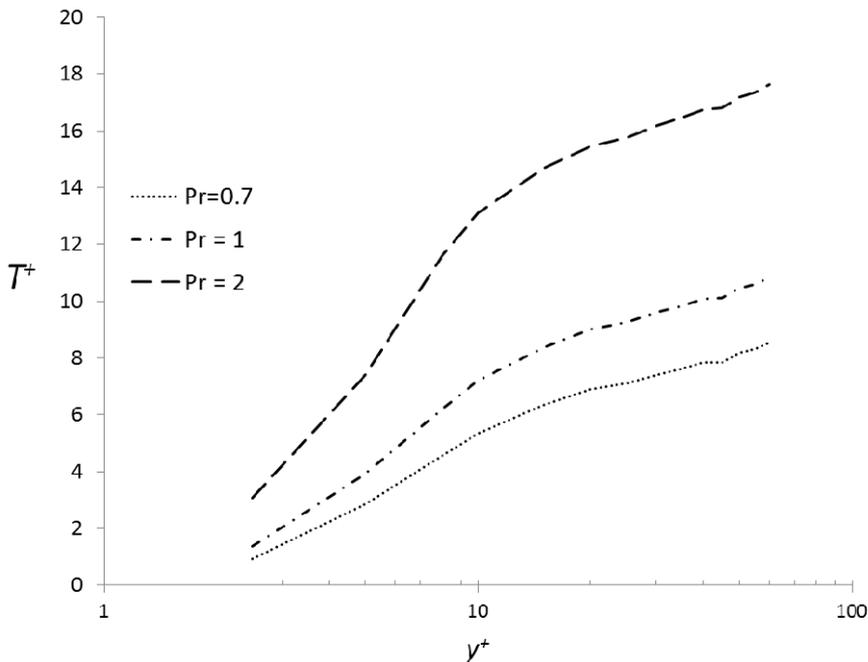


Рис. 2. Профили T^+ от y^+

При подборе пристеночной функции было решено выделить три формулы, соответствующие вязкому, буферному и логарифмическому подслою – T_{vis}^+ , T_{buf}^+ , и T_{log}^+ соответственно. Данные формулы можно записать в виде:

$$T_{\text{vis}}^+ = y^+ Pr,$$

$$T_{\text{buf}}^+ = (2,831Pr + 1,1545) \ln(y^+) - 0,8334Pr - 1,4546, \quad (8)$$

$$T_{\text{log}}^+ = 2,2 \ln(y^+ Pr + 8) + 5,4195Pr - 3,8355.$$

Также были определены две характерных точки $y_1^{+*} = 2$ и $y_2^{+*} = 14$, которые разграничивают интервалы y^+ , в рамках которых будет действовать та или иная формула. При этом чтобы обеспечить гладкий переход между тремя выражениями для $T^+(y^+)$ была введена дополнительная сглаживающая функция вида:

$$f(a, b, y^+) = 0,5 \left(1 + \tanh \left[\pi \left(\frac{y^+ - a}{b - a} - 0,5 \right) \right] \right), \quad (9)$$

где $a = y_1^{+*} - \delta$; $b = y_2^{+*} + \delta$; δ соответствует некоторому числу, задающему интервал, в пределах которого функцией $f(a, b, y^+)$ будет обеспечиваться гладкий переход между функциями (8).

Значению y_1^{+*} соответствует $\delta_1 = 0,8$, а y_2^{+*} соответствует $\delta_2 = 0,1$.

Таким образом, итоговая пристеночная функция будет объединять выражения (8), (9):

$$T^+(y^+) = (T_{\text{vis}}^+ (1 - f_1) + T_{\text{buf}}^+ f_1)(1 - f_2) + T_{\text{log}}^+ f_2, \quad (10)$$

$$f_1 = f(y_1^{+*} - \delta_1, y_1^{+*} + \delta_1, y^+),$$

$$f_2 = f(y_2^{+*} - \delta_2, y_2^{+*} + \delta_2, y^+).$$

На рис. 3, 4 представлены графики отклонения dT_{max}^+ от y^+ для $Pr = 1$ и для промежуточного значения $Pr = 1,5$, для которого не выполнялась калибровка. Кривые «А», «Б», «В» относятся к отклонению максимальной температуры, полученному по функциям (1), (2) и (3) соответственно. Кривая «Г» относится к отклонению максимальной температуры, полученному по сформулированной функции (10).

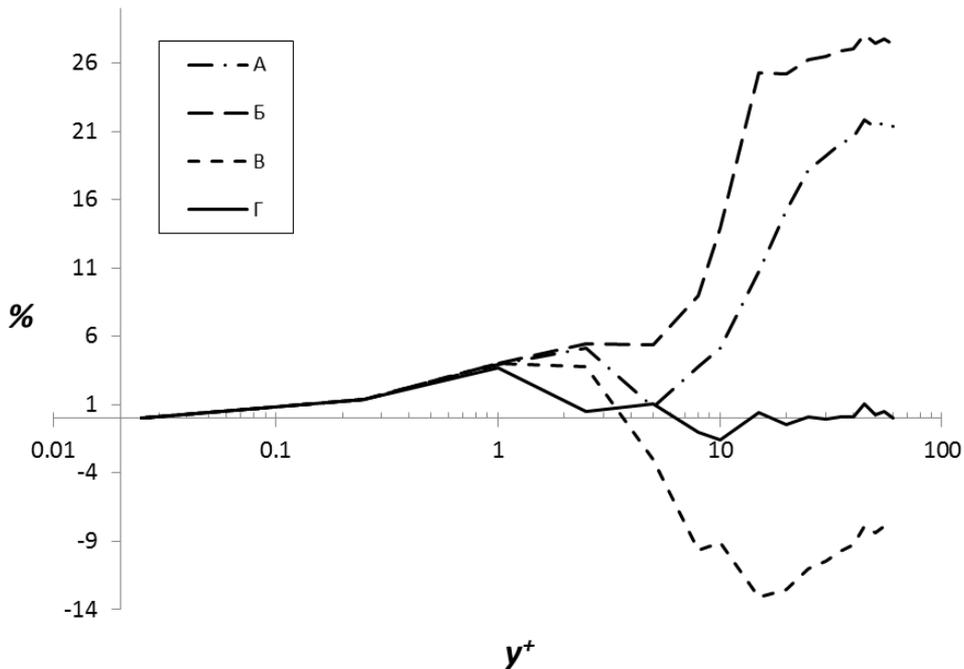


Рис. 3. Отклонение максимальной температуры и максимальной скорости в зависимости от y^+ , $Pr = 1$

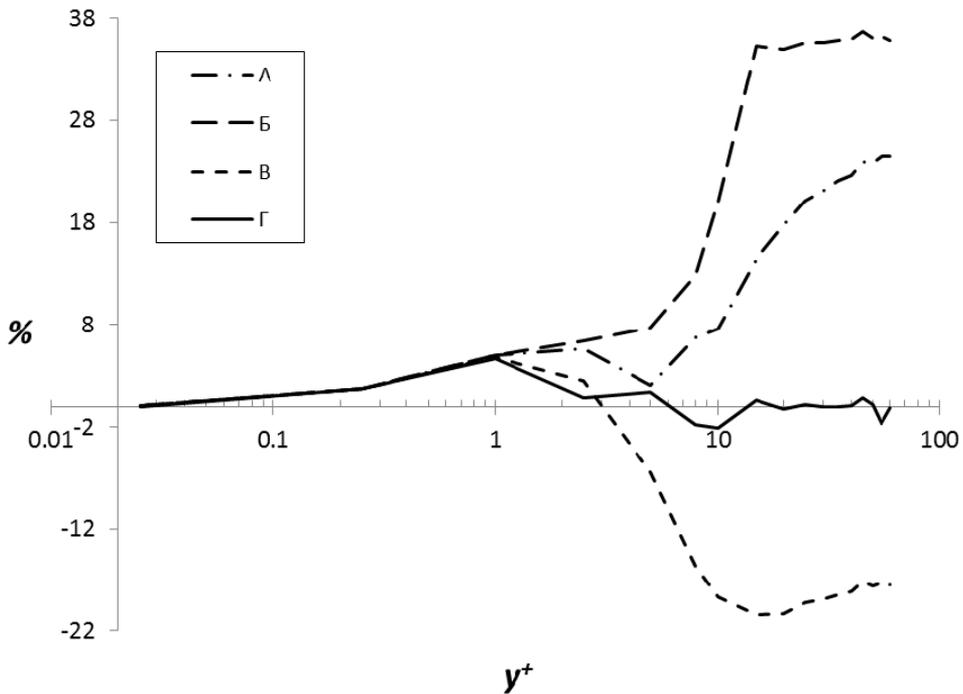


Рис. 4. Отклонение максимальной температуры и максимальной скорости в зависимости от y^+ , $Pr = 1,5$

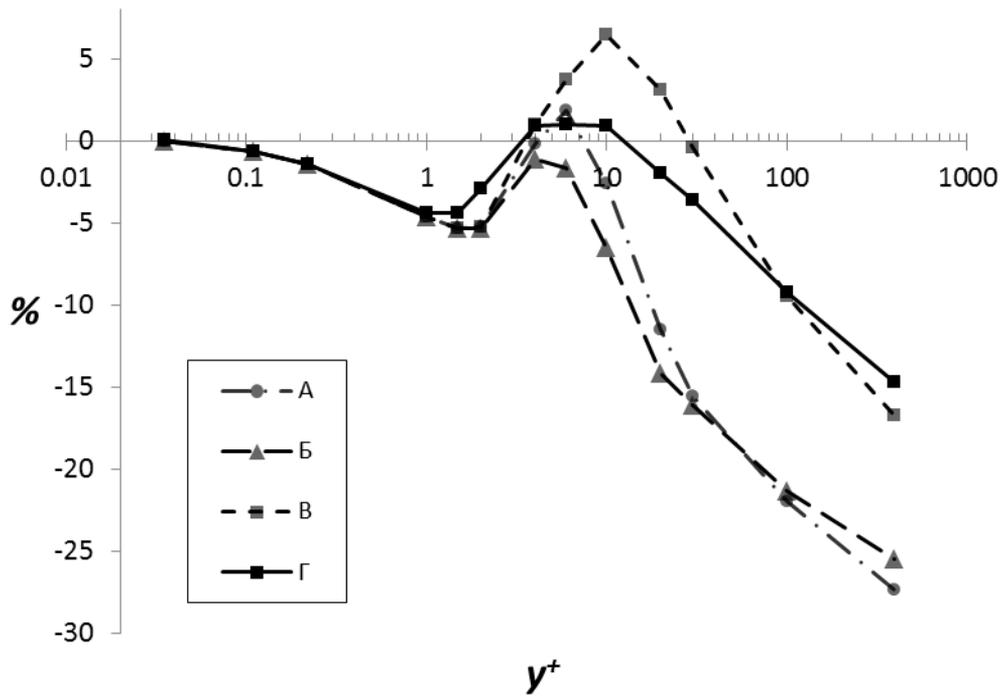
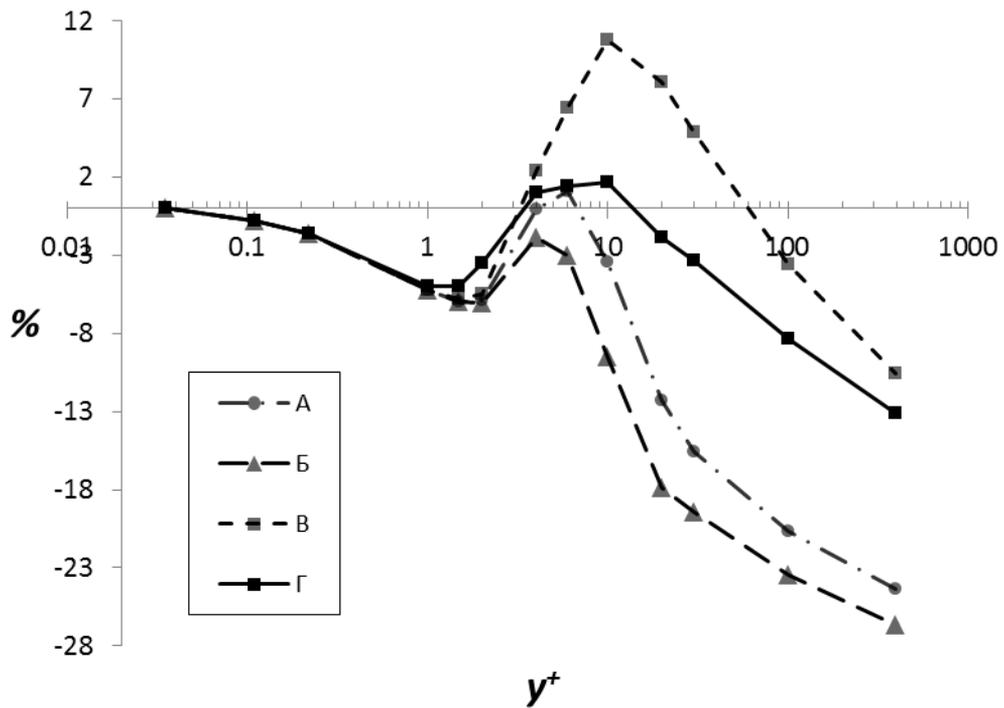
Графики показывают, что сформулированная пристеночная функция позволяет существенно снизить погрешность результатов в области высоких значений y^+ . В области $y^+ < 1$ поведение пристеночной функции (10) аналогично другим рассмотренным. Также наблюдается немонотонность зависимости отклонения результата от y^+ , однако ее колебания заметно меньше, чем у других. В следующем разделе приведен анализ эффективности полученной тепловой функции, который выполняется путем решения задач вынужденной конвекции с тепловым пограничным слоем.

3. Численные эксперименты

Канал с движущейся стенкой

Рассматривается задача турбулентного установившегося течения несжимаемой жидкости в плоском канале с движущейся нагретой стенкой – течение Куэтта. Задача решалась с числом Рейнольдса $Re = u_w h/\nu = 10^6$, где u_w – скорость движения стенки, h – высота канала. На движущейся стенке задана фиксированная температура $T = 1$, на неподвижной стенке $T = 0$. На входной и выходной границе канала заданы периодические граничные условия. Задача решалась на нескольких расчётных сетках, где самой мелкой сетке соответствовало $y^+ = 0,035$, а самой крупной – $y^+ = 400$. Сгущение сетки производится по закону геометрической прогрессии с коэффициентом роста 1,15.

При установлении стационарного режима течения профиль температуры относительно центра канала становится центрально-симметричным, а величина теплового потока q_w на движущейся и фиксированной стенке выравнивается. На рис. 5 – 7 представлены результаты отклонения величины теплового потока на стенке от решения, полученного на самой подробной сетке с $y^+ = 0,035$. Здесь кривые «А», «Б», «В», «Г» соответствуют функциям (1), (2), (3) и (10).

Рис. 5. Отклонение теплового потока от y^+ при $Pr = 0,7$ Рис. 6. Отклонение теплового потока от y^+ при $Pr = 1$

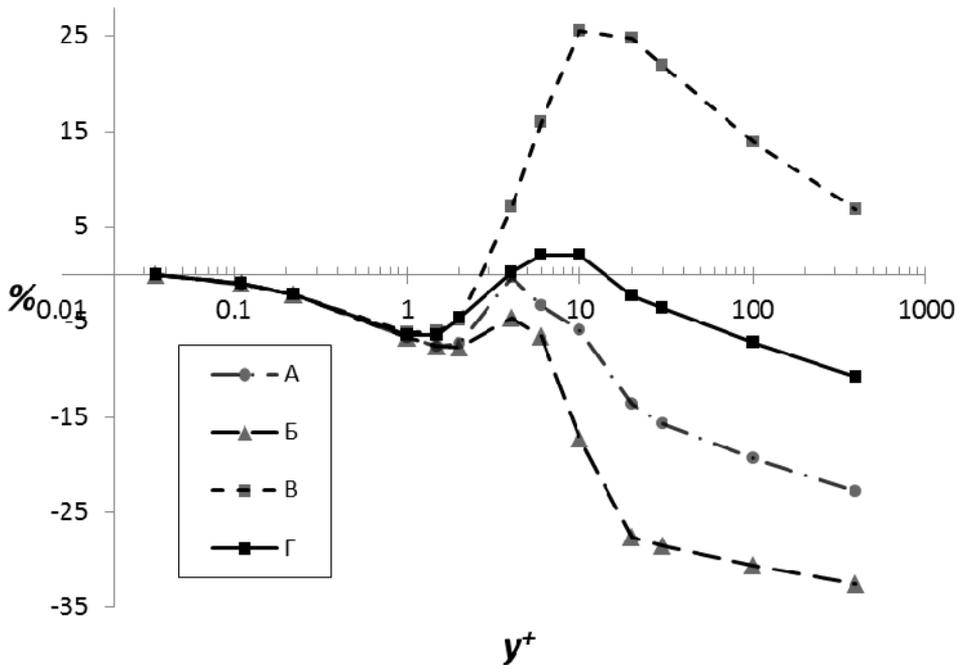


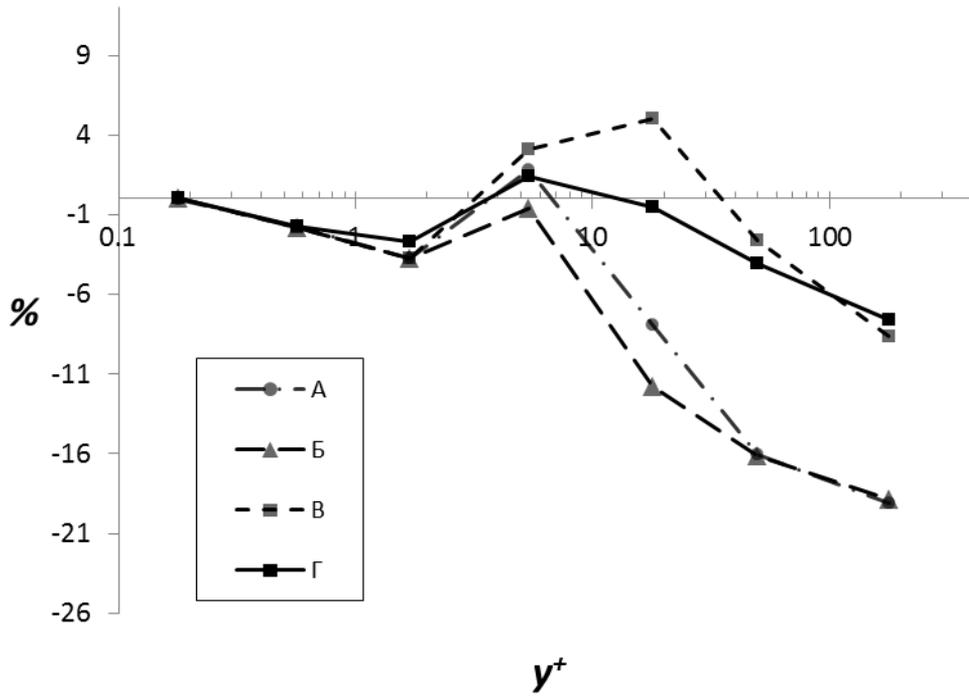
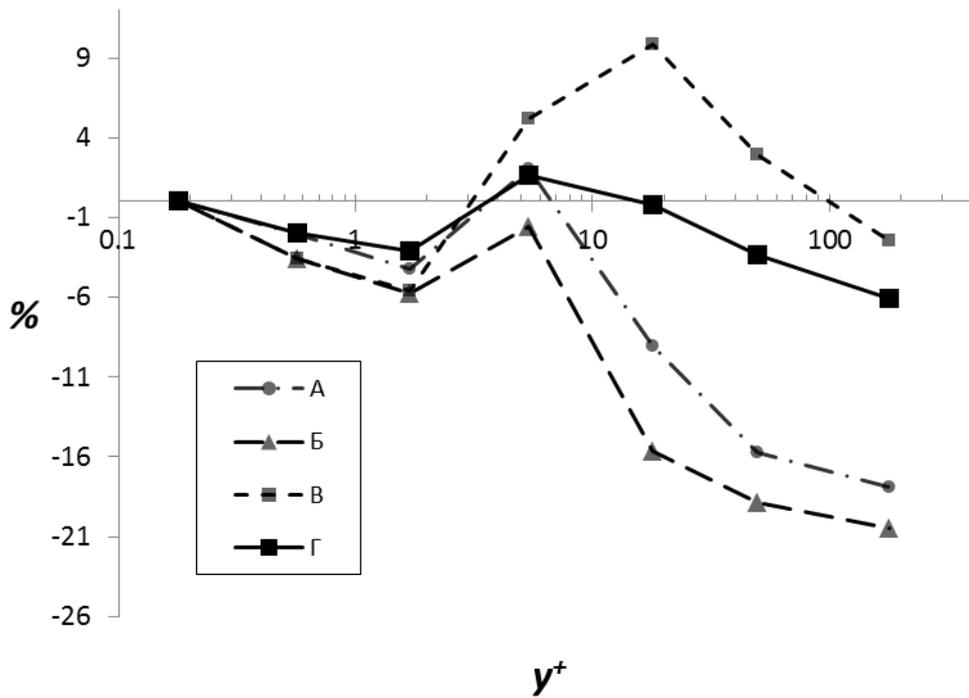
Рис. 7. Отклонение теплового потока от y^+ при $Pr = 2$

Пристеночная функция (10) при рассмотренных числах Прандтля демонстрирует погрешность, не превышающую 15 % для $Pr = 0,7$ (рис. 5), но при этом на участке $y^+ = 50$ она даёт результат, который хуже, чем у функции «В». При $Pr = 1$ (рис. 6) функция (10) на самой крупной сетке дала отклонение 13,1 %, что хуже, чем у функции «В» на том же участке, при этом в области $y^+ = 4 \div 20$ функция (10) демонстрирует наиболее низкие отклонения. При расчёте с $Pr = 2$ (рис. 7) особенно видно, что функции «А» и «Б» имеют свойство занижать, а «В» завышать величину теплового потока на стенке при увеличении y^+ . Полученная функция (10) даёт результат с наименьшей погрешностью по всему диапазону рассмотренных y^+ , однако на самой крупной сетке с $y^+ = 400$ у функции «В» результат лучше на 4 %.

Турбулентное обтекание пластины однородным потоком

Рассматривается задача о турбулентном обтекании нагретой плоской пластины однородным потоком в двумерной постановке. Задача решалась относительно числа Рейнольдса на конце пластины $Re = u_\infty L / \nu = 10^7$, где u_∞ – скорость набегающего потока, L – длина пластины. На входной границе задан втекающий поток с фиксированной скоростью u_∞ и температурой $T = 0$. Поверхность пластины имеет фиксированную температуру $T = 1$. На остальных границах задано граничное условие с нулевым статическим давлением. Задача решалась на нескольких расчётных сетках, соответствующих параметру $y^+ = 0,18 \div 180$ для задней кромки пластины. Рост высоты счётных ячеек от поверхности пластины к верхней границе подчинялся геометрической прогрессии с коэффициентом роста 1,15. Число ячеек по продольному направлению пластины было одинаковым для всех сеток, ширина ячеек так же менялась по геометрической прогрессии с коэффициентом роста 1,15, а минимальная ширина ячейки составляла $5L \times 10^{-4}$.

При установлении стационарного режима течения касательное напряжение трения на пластине и тепловой поток распределяются по убыванию от передней кромки пластины. Тепловой поток измерялся на пластине в точке, отстоящей от передней кромки на расстояние x , соответствующее локальному числу Рейнольдса $Re_x = x u_\infty / \nu \approx 8,7 \times 10^6$. На рис. 8 – 10 приведены графики значений тепловых потоков q_w на сетках с различными y^+ при нескольких числах Прандтля. Кривым «А», «Б», «В», «Г» соответствуют функции (1), (2), (3) и (10).

Рис. 8. Процентное отклонение теплового потока от предельного решения при $Pr = 0,7$ Рис. 9. Процентное отклонение теплового потока от предельного решения при $Pr = 1$

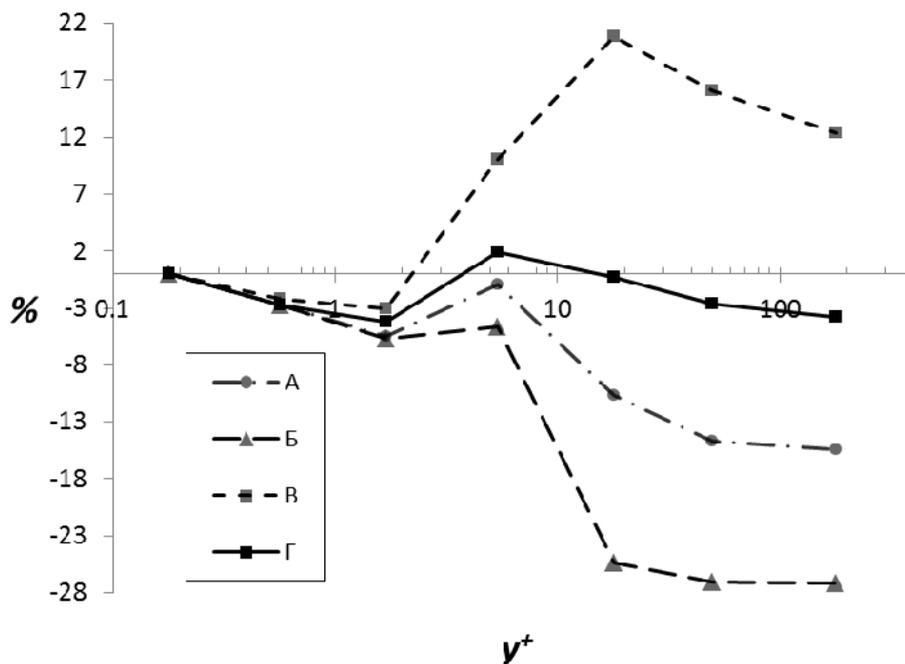


Рис. 10. Процентное отклонение теплового потока от предельного решения при $Pr = 2$

Аналогично предыдущей задаче, пристеночная функция (10), по сравнению с пристеночными функциями «А» – «В», демонстрирует низкое отклонение теплового потока, в особенности на участке переходной области, в то время как функции «А» – «Б» и функция «В» имеют свойство соответственно занижать и завышать значение теплового потока в рассматриваемом участке пластины. При $Pr = 0,7$ (рис. 8) на самой грубой сетке отклонение от предельного численного решения достигает 7,6 %, при этом, по полученным данным, более точный результат демонстрирует только функция «В» на участке $y^+ = 50$. При $Pr = 1$ (рис. 9) функция (10) демонстрирует снижение максимального отклонения до 6 %, однако при $y^+ > 50$ функция «В» демонстрирует меньшее отклонение. При расчёте с $Pr = 2$ функцией (10) был получен наилучший результат – снижение погрешности на самой крупной сетке до 3,8 % и умеренное отклонение результата относительно величины y^+ .

Заключение

В данном докладе была рассмотрена чувствительность тепловых пристеночных функций к сеточному разрешению. Рассматривались существующие пристеночные функции для температуры. Был проведён сравнительный анализ погрешности, которую они дают при решении задач установившегося турбулентного течения по модели $k-\omega$ SST на сетках различного разрешения. Показано, что рассмотренные тепловые пристеночные функции дают неудовлетворительный результат на сетках низкого разрешения. Была сформулирована своя новая тепловая пристеночная функция, полученная путём калибровки значений безразмерной температуры относительно предельного численного решения с последующей аппроксимацией полученной зависимости формулой. Полученная тепловая пристеночная функция была протестирована на задачах турбулентного течения, где показала снижение погрешности в оценке тепловых характеристик потока на грубых сетках.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации по государственной поддержке научных исследований молодых российских ученых-докторов наук МД-4874.2018.9.

Литература

1. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя, перев. с немецкого, главная редакция физико-математической литературы издательства. – М.: Наука, 1974.
2. Снегирев А. Ю. Высокопроизводительные вычисления в физике // Численное моделирование турбулентных течений. – СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2009.
3. Spalart P R. Strategies for turbulence modeling and simulations // Heat Fluid Flow. – 2000. – V. 21. – P. 252 – 263.
4. Козелков А. С., Курулин В. В., Крутякова О. Л., Тятюшкина Е. С. Применение численных схем с выделением пограничного слоя для расчета турбулентных течений с использованием вихреразрешающих подходов на неструктурированных расчетных сетках // Журнал вычисл. мат. и мат. физ. – 2017. – Т. 57, № 6. – С. 1048 – 1060.
5. Козелков А. С., Курулин В. В., Лашкин С. В., Шагалиев Р. М., Ялозо А. В. Исследование потенциала суперкомпьютеров для масштабируемого численного моделирования задач гидродинамики в промышленных приложениях // Журнал вычисл. мат. и мат. физ. – 2016. – Т. 56, № 8. – С. 1524 – 1535.
6. Белов И. А., Исаев С. А., Моделирование турбулентных течений: учебное пособие. – СПб.: Балт. гос. техн. ун-т., 2001.
7. Козелков А. С., Дерюгин Ю. Н., Циберева Ю. А., Корнев А. В., Денисова О. В., Стрелец Д. Ю., Куркин А. А., Курулин В. В., Шарипова И. Л., Рубцова Д. П., Легчанов М. А., Тятюшкина Е. С., Лашкин С. В., Ялозо А. В., Яцевич С. В., Тарасова Н. В., Гинниятуллин Р. Р., Сизова М. А., Крутякова О. Л. Минимальный базис задач для валидации методов численного моделирования турбулентных течений вязкой несжимаемой жидкости // Труды НГТУ им. П. Е. Алексеева. – 2014. – № 4 (106). – С. 21 – 69.
8. Launder B. E., Spalding D. V. The numerical computation of turbulent flows // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 1974. – 3. – P. 269 – 289.
9. Козелков А. С., Курулин В. В., Пучкова О. Л., Лашкин С. В. Моделирование турбулентных течений с использованием алгебраической модели рейнольдсовых напряжений с универсальными пристеночными функциями // Вычислительная механика сплошных сред. – 2014. – Т. 7, № 1. – С. 40 – 51.
10. Зайчик Л. И. Пристеночные функции для моделирования турбулентного течения и теплообмена // Теплофизика высоких температур. – 1997. – Т. 35. – Вып. 3. – С. 391 – 396.
11. Kader B. A. Temperature and concentration profiles in fully turbulent boundary layers // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1981. – V. 24 (9). – P. 1541 – 1544.
12. Кириллов П. Л., Юрьев Ю. С., Бобков В. П. Справочник по теплогидравлическим расчётам. Ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
13. Kays W. M., Crawford M. E. Convective Heat and Mass Transfer. McGraw-Hill, New York, 1994.
14. Kim J., Moin P. Transport of Passive Scalars in a Turbulent Channel Flow. – 1989. – V. VI. – P. 85 – 96.
15. Menter F. R., Kuntz M., Langtry R. Ten years of experience with the SST turbulent model // Turbulence, Heat and Mass Transfer 4 / ed. by K. Hanjalic, Y. Nagano, M. Tummers, Begell House Inc, 2003.
16. Wieghardt K., Tillmann W. On the turbulent friction layer for rising pressure // NACA TM-1314, 1951.
17. Smirnov E. M., Zaitsev D. K. Modification of wall boundary conditions for Low-Re k-w turbulence models aimed at grid sensitivity reduction // Europ. Conf. for Aerospace Sciences, July 4-7th 2005, Moscow (EUCASS 2005), CD-ROM proceedings, ID 2.09.06.
18. Ferziger J. H., Peric M. Computational methods for fluid dynamics. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2001.
19. Козелков А. С. Реализация метода расчета вязкой несжимаемой жидкости с использованием многосеточного метода на основе алгоритма SIMPLE в пакете программ ЛОГОС // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов. – 2013. – Вып. 4.

APPLICATION OF THE WALL FUNCTION METHOD FOR THERMAL TURBULENT BOUNDARY LAYER SIMULATION

D. A. Utkin, A. S. Kozelkov, V. V. Kurulin

Russian Federal Nuclear Center –
All-Russia Research Institute of Experimental Physics, Sarov

Numerical simulations of turbulent flows in channels and pipes require special treatment of the boundary flow region. Using the wall function method, one can obtain distributions of temperature and velocity profiles in the boundary layer on relatively coarse meshes based on empirical relations. Most of thermal wall functions reported in literature have drawbacks related to a significant loss of solution accuracy on low-resolution meshes. This paper presents a new wall function modification to approximate the wall heat flux for Prandtl numbers between 0.7 and 2. The function has been developed by calibration of appropriate values of dimensionless temperature T^+ at different values of y^+ with respect to the limiting numerical solution obtained on the finest mesh for the problem of a turbulent flow in a channel. The accuracy of the function has been tested on other canonical turbulent problems. Results obtained using this function are compared with similar results delivered by other wall functions. The proposed wall function is shown to produce the lowest-error results compared to the other functions considered.

Key words: numerical simulation, turbulence, boundary layer, turbulent heat exchange, wall function.

УДК 004.94

ВЕРИФИКАЦИЯ ПАКЕТА ПРОГРАММ ЛОГОС ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕЧЕНИЯ ВОДЯНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ОБОРУДОВАНИИ ТРАНСПОРТНЫХ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИХРЕРАЗРЕШАЮЩИХ МОДЕЛЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

*О. О. Шестак, А. А. Деулин, О. В. Денисова, Е. А. Данилов, Е. В. Глазунова,
В. В. Курулин*

Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, Саров

В настоящей работе представлены результаты моделирования задач из верификационного базиса пакета программ ЛОГОС для моделирования течения водяного теплоносителя в оборудовании транспортных ядерных энергетических установок с использованием вихреразрешающих моделей турбулентности. Сравнительный анализ полученных результатов численного моделирования трехмерных течений с экспериментальными данными, а также с результатами, полученными по коммерческому коду ANSYS CFX, предоставленными специалистами из АО «ОКБМ Африкантов» показал, что пакет программ ЛОГОС подтверждает перспективность применения для решения задач атомной энергетики.

Ключевые слова: пакет программ ЛОГОС, верификация, транспортные ЯЭУ, турбулентное течение, смешение неизотермических потоков, турбулентная конвекция, CFD-коды.