

УДК 533.6

А.И. ДЕРЕВЯНКО, вед. инженер ИПМаш НАНУ, г. Харьков
С.В. ЕРШОВ, д-р техн. наук; проф. ИПМаш НАНУ, г. Харьков

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕХОДА В КОМПРЕССОРНОЙ РЕШЕТКЕ

Розглянуто низькорейнольдсову модель турбулентності з обмежувачем виробництва кінетичної енергії. Реалізовано метод моделювання ламінарно-турбулентного переходу в обчислювальному пакеті *FlowER-Y* на основі двопараметричної $k-\omega$ SST моделі Ментера. Виконано розрахунки, результати яких порівнюються з експериментальними даними щодо течії газу у компресорній решітці. Показано, що низькорейнольдсова модифікація двопараметричної моделі $k-\omega$ SST дозволяє якісно описати деякі ефекти в перехідних течіях.

The Low-Reynolds turbulence model with the kinetic energy production limiter is considered. The laminar-turbulent transition method is implemented in the solver *FlowER-Y* on the base of the $k-\omega$ SST model. Calculation results were compared with experimental data for gas flow in compressor blade cascade. It is shown that the Low-Reynolds modification of the $k-\omega$ SST model allows an approximate simulation of some effects in a transitional flow.

Введение

Общепринятой практикой моделирования течений в турбомашинах является решение осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (Reynolds Averaged Navier-Stokes – RANS). Существует множество моделей турбулентности, которые могут быть применены совместно с уравнениями RANS. Распространенным подходом является использование $k-\omega$ SST модели Ментера [1], которая объединила в себе преимущества $k-\varepsilon$ и $k-\omega$ моделей турбулентности. Такой подход имеет множество преимуществ, и охватывает широкий спектр течений. Ламинарно-турбулентный переход – одно из физических явлений, моделирование которого не заложено в уравнениях $k-\omega$ SST.

Пренебрежение ламинарно-турбулентным переходом и обратным процессом, реламинизацией, может приводить к большим погрешностям в определении локальных максимумов пристеночного трения, температуры стенки и теплопередачи, так как они часто оказываются около конца переходной зоны [2].

В данной работе рассматривается низькорейнольдсова модель Уилкокса с ограничителем производства кинетической энергии турбулентности. Приводятся данные численного моделирования течения газа в компрессорной решетке. Результаты расчета сравниваются с экспериментальными данными и расчетом, проведенным с использованием оригинальной $k-\omega$ SST модели.

Ограничение производства турбулентности в низькорейнольдсовой модели

В статье [3] представлен ряд подходов, которые позволяют учитывать переход в пограничном слое. Рассмотрены такие модели как ONERA/CERT, RNG (относящиеся к классу алгебраических моделей перехода), низькорейнольдсова модель Уилкокса [4], а также модель перехода Ментера с функцией перемежаемости (относящиеся к дифференциальным моделям). Проведенный анализ позволил выделить низькорейнольдсовую модель Уилкокса для реализации учета ламинарно-турбулентного перехода в решателе *FlowER-Y* [5], так как она обладает рядом преимуществ перед другими подходами:

- построена с использованием лишь локально вычисляемых величин (использование интегральных величин, таких как толщина потери импульса, влечет за собой увеличение счетного времени и потерю общности для сложных течений);
- не требует внесения значительных изменений в высокорейнольдсовую модель;
- не требует значительного измельчения расчетных сеток, а значит, – может быть применена для расчетов проточных частей турбомашин. Прямое численное моделирование или модели расчета крупных вихрей также позволяют рассчитывать переходные течения, но требуют использования чрезвычайно мелких расчетных сеток.

В работе [6] описана модификация низкорейнольдсовой модели Уилкокса, содержащая дополнительный ограничитель производства кинетической энергии турбулентности. Модификация заключается в наличии дополнительного множителя α_{PTM} :

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho u_j k - (\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] = \alpha_{PTM} P_k - \beta^* \rho \omega k ;$$

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho u_j \omega - (\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] = \frac{\alpha \rho}{\mu_t} P_k - \beta \rho \omega^2 + (1 - F_1) \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j},$$

где ρ – плотность, k – кинетическая энергия турбулентности (КЭТ), ω – удельная скорость диссипации, μ – коэффициент динамической вязкости, $P_k = \tau_{ij} S_{ij}$ – производство КЭТ, τ_{ij} – тензор рейнольдсовых напряжений, S_{ij} – тензор скоростей деформации среднего течения, F_1, F_2 – переключающие функции, которые позволяют переходить от уравнений k – ω у стенки к k – ε во внешнем потоке, $\sigma_k, \beta^*, \sigma_\omega, \alpha, \beta$ – константы. Множитель α_{PTM} имеет следующий вид

$$\alpha_{PTM} = 1 - 0,94 P(\text{Re}_v) F_3 \text{th} \left((y^+ / 17)^2 \right),$$

где P – функция, зависящая от $\text{Re}_v = y^2 S / \nu$ – турбулентного число Рейнольдса, рассчитанного по расстоянию от стенки y , коэффициенту кинематической вязкости ν и величине тензора скоростей деформации, F_3 – функция, зависящая от турбулентного числа Рейнольдса $\text{Re}_t = k / (\nu \omega)$. Множитель $\text{th} \left((y^+ / 17)^2 \right)$ введен для отключения ограничителя в турбулентной области и вычисляется с помощью безразмерного расстояния до стенки

$$y^+ = \frac{y \sqrt{\tau_w / \rho_w}}{\nu},$$

где τ_w и ρ_w – параметры течения, вычисленные у стенки.

В работе [7] проведено сравнение результатов расчетов переходного течения вдоль плоской пластины низкорейнольдсовой моделью и ее модификацией. Показано, что использование ограничителя позволяет получать более согласованные с экспериментальными данными результаты. В частности, модифицированная модель меньше занижает производство КЭТ в турбулентной части пограничного слоя.

Тестирование моделей

В солвере *FlowER-Y* реализована численная модель трехмерного вязкого течения, построенная на основе решения системы нестационарных уравнений Навье–Стокса, осредненных по Рейнольдсу. Для моделирования турбулентных эффектов применяется двухпараметрическая дифференциальная модель турбулентности $k-\omega$ SST. Численное решение системы дифференциальных уравнений выполняется с использованием неявной квазимонотонной ENO-схемы второго порядка аппроксимации.

В качестве объекта исследования выбрана компрессорная решетка, для которой известны результаты измерений параметров пограничного слоя [8]. Условия течения: скорость на входе 32,88 м/с, полное давление на входе в решетку 101,6 кПа, статическое давление на выходе 101,3 кПа, степень турбулентности на входе в решетку – 0,18 %.

Для численного моделирования эксперимента построена расчетная сетка с числом ячеек $120 \times 96 \times 180 = 2073600$. Возле стенок обводов и поверхности лопатки выполнено сгущение сетки; в пограничном слое помещено около 32 ячеек, безразмерное расстояние к стенке от центра ближайшей к ней ячейки $y^+ \approx 1$.

Расчеты проводились по двум моделям турбулентности – высокорейнольдсовой $k-\omega$ SST и низкорейнольдсовой моделью Уилкокса с ограничителем РТМ. На рисунках 1, 2 представлено поле распределения кинетической энергии турбулентности, полученное с использованием этих двух моделей.

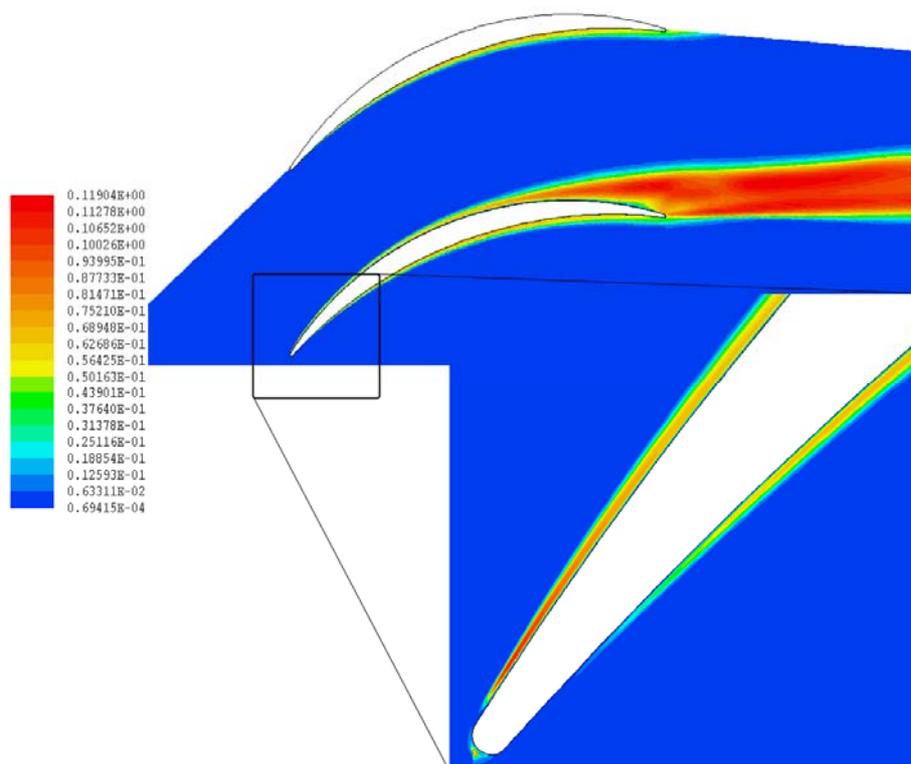


Рис. 1. Степень турбулентности – высокорейнольдсовая модель

Высокорейнольдсовая модель навязывает переход к турбулентному течению у входной кромки на выпуклой стороне лопатки, и участок с ламинарным потоком практически отсутствует. Напротив, низкорейнольдсовая модель снижает степень КЭТ, и область роста этой величины в пограничном слое значительно смещена вниз по

потoku. Вдоль всей вогнутой стороны лопатки пограничный слой остается ламинарным согласно результатам расчета по низкорейнольдсовой модели, что согласуется с данными эксперимента [8].

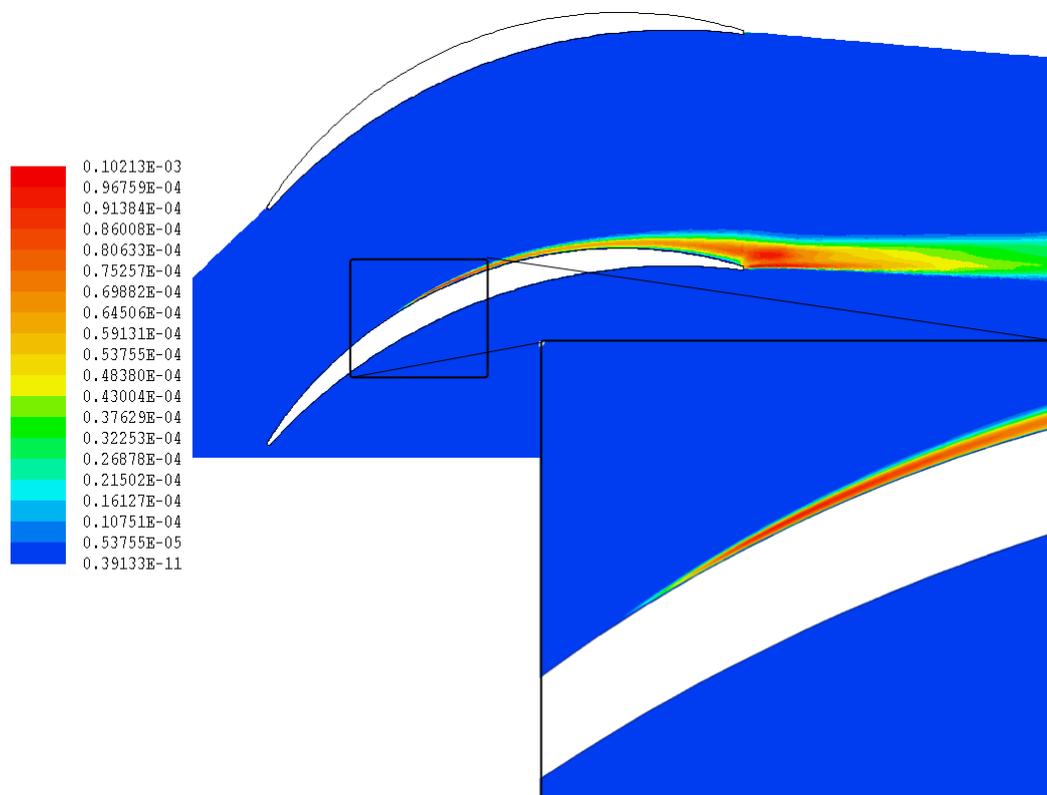


Рис. 2. Степень турбулентности – низкорейнольдсовая модель

На рисунке 3 построены графики распределения трения вдоль лопатки. На выпуклой стороне лопатки график трения испытывает несколько изломов, что может свидетельствовать о смене типа течения. Первая область роста может быть вызвана отрывом, в котором степень турбулентности резко возрастает. Ниже по потоку течение реламинируется, и величина C_f уменьшается. Далее происходит более плавный переход к турбулентному потоку.

Видно, что расчет высокорейнольдсовой моделью достаточно точно описывает турбулентную часть течения на выпуклой стороне лопатки, но вообще не учитывает снижение трения в ламинаризованных областях. На вогнутой стороне, вследствие завышения величины кинетической энергии турбулентности, распределение C_f значительно отличается от экспериментальных данных.

Низкорейнольдсовая модель качественно отображает эффекты изменения графика C_f , хотя величина отклонений отличается от данных эксперимента. На вогнутой стороне лопатки полученные данные гораздо ближе к экспериментальным.

Представленные в данной статье результаты являются предварительными, а предложенный подход описания ламинарно-турбулентного перехода еще нуждается в проверке, тестировании и доводке. Но уже сейчас можно судить о том, что низкорейнольдсовая РТМ модель позволяет, по крайней мере качественно, моделировать некоторые эффекты, возникающие в переходных течениях, что расширяет область применимости модели турбулентности $k-\omega$ SST.

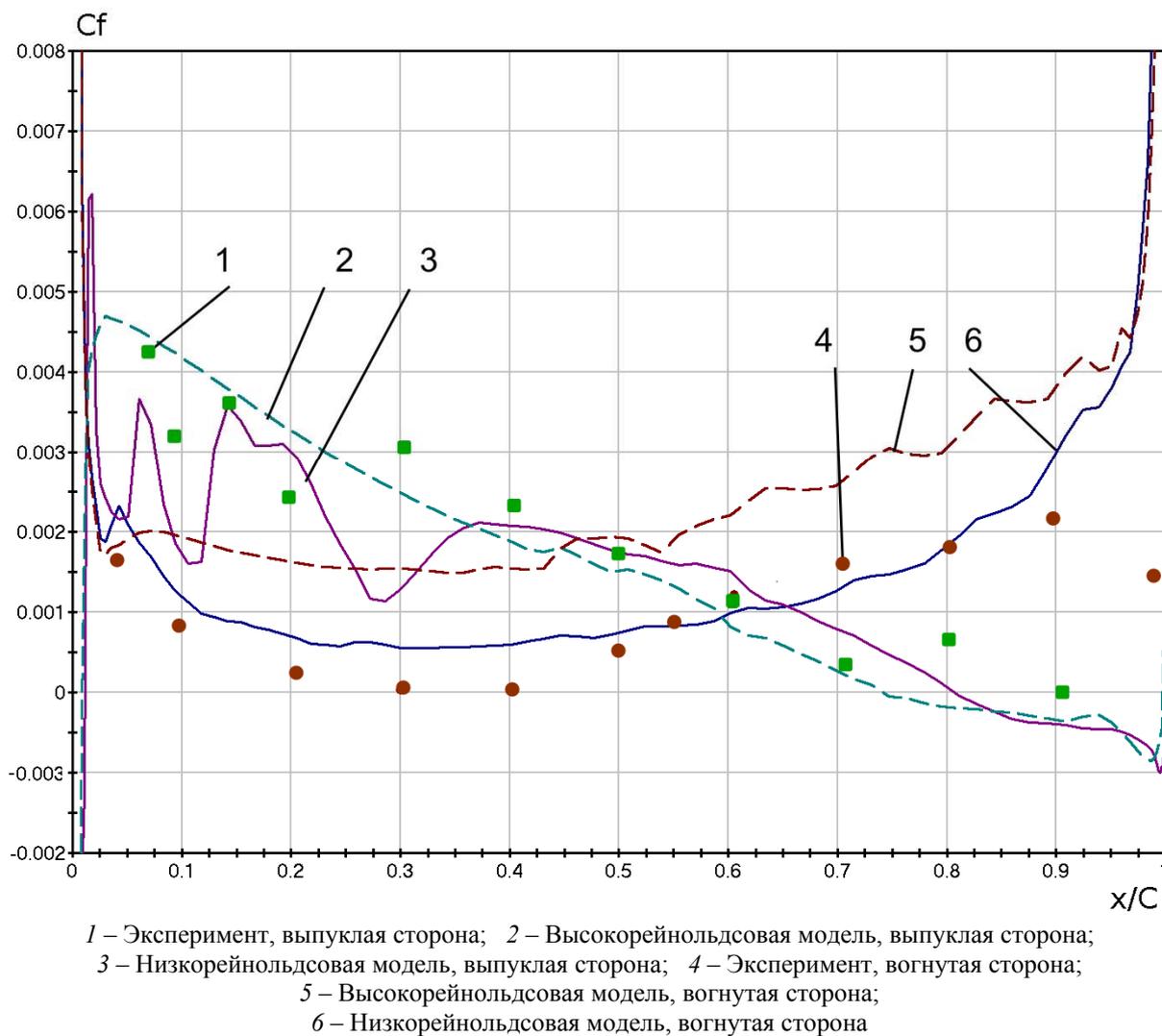


Рис. 3. Коэффициент трения

Список литературы: 1. *Menter F.R.* Two–Equation Eddy–Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications // *AIAA J.* – 1994. – 32, № 8. – P. 1598-1605. 2. *Singer B.A.* Modeling the Transition Region – NASA Contractor Report. – 1993. – 88 p. 3. *Ершов С.В.* Сравнение различных способов моделирования ламинарно-турбулентного перехода / С.В. Ершов, А.И. Деревянко // *Пробл. машиностроения.* – Харьков, 2009. – 12 № 4. – С. 25-32. 4. *Wilcox D.C.* Simulation of Transition with a Two-Equation Turbulence Model // *AIAA J.* – 1994. – 32, № 2. – P. 247-255. 5. *Єршов С.В.* Комплекс програм розрахунку тривимірних течій газу в багатовіцевих турбомашин «FlowER»: свідоцтво про державну реєстрацію прав автора на твір, ПА 77; 19.02.96 / С.В. Єршов, А.В. Русанов. – Державне агенство України з авторських та суміжних прав, 1996. – 1 с. 6. *Denissen N.A.* Implementation and Validation of a Laminar-to-Turbulent Transition Model in the Wind-US Code / N.A. Denissen, D.A. Yorden, N.J. Georgiadis // NASA TM 215451. – 2008. – 36 p. 7. *Ершов С.В.* Низкорейнольдсовая модель турбулентности с ограничителем производства кинетической энергии / С.В. Ершов, А.И. Деревянко // *Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестник НТУ «ХПИ»:* Сб. науч. трудов. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2010. – № 2. – С. 81-85. 8. *Zierke W.C.* The Measurement of Boundary Layers on a Compressor Blade in Cascade / W.C. Zierke, Steven Deutsch // NASA Contractor Report 185118. – 1989. – P. 226.

© Деревянко А.И., Ершов С.В., 2011
 Поступила в редколлегию 17.02.11