

Д.В. Багаев, М.Н. Сыралева  
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОБОДНО-КОНВЕКТИВНОГО ТЕЧЕНИЯ ОКОЛО ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НАГРЕВА

**Объект и цель научной работы.** В настоящей работе рассматриваются особенности численного моделирования свободно-конвективного течения около вертикальной поверхности нагрева в различных расчетных кодах вычислительной гидродинамики (CFD). Целью работы является оценка возможности использования полуэмпирических моделей турбулентности для предсказания положения ламинарно-турбулентного перехода свободно-конвективного течения около вертикальной поверхности нагрева.

**Материалы и методы.** Характеристики свободно-конвективного турбулентного течения в воздухе около вертикальной поверхности нагрева находятся из численного решения системы дифференциальных уравнений в приближении Буссинеска, замкнутых моделью турбулентности. Рассматривались 2 модели турбулентности:  $k-\omega$  Menter SST и низкорейнольдсовая модель турбулентности  $k-\epsilon$ .

**Основные результаты.** Результаты численного моделирования турбулентного пограничного слоя на нагретой пластине в воздухе в различных CFD-кодах показали, что модель  $k-\omega$  Menter SST не дает ярко выраженного ламинарно-турбулентного перехода, а для  $k-\epsilon$  модели положение точки перехода смещается вверх по пластине с увеличением количества итераций. Температурные поля, в силу своей консервативности, по обоим моделям дают хорошие согласования с экспериментом.

**Заключение.** Проведенное численное моделирование свободно-конвективного течения около вертикальной поверхности нагрева показало, что низкорейнольдсовые модели турбулентности  $k-\epsilon$  способны к спонтанному переходу к турбулентности, но положение перехода зависит не только от модели турбулентности, но и от схемы, сетки, глубины сходимости и других численных особенностей алгоритма расчета. Полуэмпирические модели турбулентности без внесения дополнительных возмущений непригодны для надежного предсказания положения ламинарно-турбулентного перехода.

**Ключевые слова:** численное моделирование, полуэмпирические модели турбулентности, ламинарно-турбулентный переход, свободная конвекция.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

Для цитирования: Багаев Д.В., Сыралева М.Н. Численное моделирование свободно-конвективного течения около вертикальной поверхности нагрева. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; 2(384): 93–98.

УДК 536.2

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-384-93-98

D. Bagaev, M. Syralyova  
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

## NUMERICAL SIMULATION OF FREE-CONVECTION FLOW NEAR VERTICAL HEATING SURFACE

**Object and purpose of research.** This work discusses numerical simulation specifics of free-convection flow near vertical heating surface in different CFD software codes. The purpose of this work is to assess possibility of applying semi-empirical turbulence model for position prediction of laminar-turbulent transition of free-convection flow near vertical heating surface.

**Materials and methods.** Parameters of free-convection turbulent flow in the air near vertical heating surface are found from the numerical solution to the system of differential equations in Boussinesq approximation, closed by the turbulence model. Two turbulence models were investigated:  $k-\omega$  Menter SST and low-Reynolds turbulence model  $k-\epsilon$ .



**Main results.** CFD simulation results for turbulent boundary layer on heated plate in the air, obtained in different CFD codes have shown that  $k-\omega$  Menter SST model does not yield any clear laminar-turbulent transition, whereas in the  $k-\epsilon$  model the position of this transition point shifts up the plate as the number of iterations increases. Temperature fields were conservative, so they have shown a good correlation with the experiment in both models.

**Conclusion.** Numerical simulation of free-convection flow near vertical heated surface have shown that  $k-\epsilon$  low-Reynolds turbulence models can have spontaneous transition to the turbulence, however, the point of this transition depends not only on the turbulence model, but also on the layout, the mesh, the depth of convergence, as well as on other numerical peculiarities of the calculation algorithm. Without introduction of additional disturbances, semi-empirical turbulence model cannot reliably predict the position of laminar-turbulent transition point.

**Key words:** numerical simulation, semi-empirical turbulence models, laminar-turbulent transition, free convection.

Authors declare lack of the possible conflicts of interests.

For citations: Bagaev D., Syralyova M. Numerical simulation of free-convection flow near vertical heating surface. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018; 2(384): 93–98 (in Russian).

UDC 536.2

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-384-93-98

## Список использованных обозначений

Abbreviations

$L$  – длина пластины;

$\nu$  – коэффициент кинематической вязкости;

$T$  – температура;

$\Delta T = T_w - T_\infty$  – характерный перепад температуры;

$\tau_w$  – касательные напряжения на стенке;

$\rho$  – плотность;

$q_w$  – тепловой поток на поверхности;

$x$  – координата по пластине;

$\lambda$  – теплопроводность;

$y^+ = \frac{U^* y}{\nu}$  – нормированная пристенная координата;

$U^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$  – скорость торможения;

$Ra$  – число Рэлея;

$Bo$  – число Бонда;

$Nu$  – число Нуссельта;

$Nu_x = \frac{q_w x}{\lambda \Delta T}$  – локальное число Нуссельта.

Индексы:

$( )_\infty$  – параметры среды за границей пограничного слоя;

$( )_w$  – параметры на нагреваемой поверхности.

## Введение

Introduction

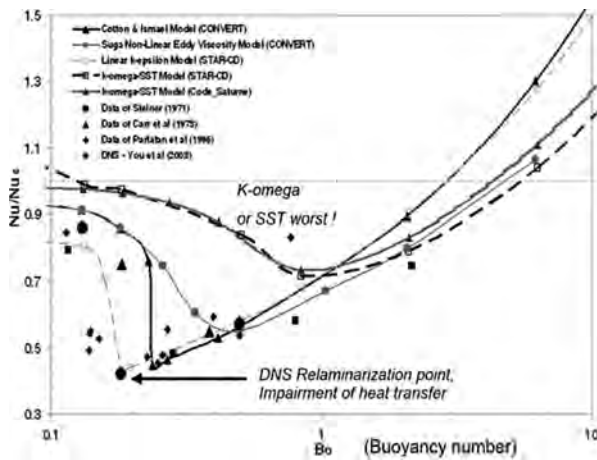
Задача о развитии свободно-конвективного течения около вертикальной поверхности нагрева является фундаментальной и привлекает к себе

внимание исследователей на протяжении многих лет. Существуют полуэмпирические соотношения для расчета теплообмена как при ламинарном режиме течения, так и при развитом турбулентном, неоднократно подтвержденные экспериментальными исследованиями [1]. Поэтому необходимость в использовании расчетных кодов вычислительной гидродинамики для расчета таких течений отсутствует.

Однако в теплообменном оборудовании всегда наблюдается развитие свободно-конвективного пограничного слоя вдоль поверхности нагрева и смена режимов течения. Интенсивность теплоотдачи при турбулентном и ламинарном режиме течения отличается на порядок [2]. В связи с этим практический интерес связан с проблемой адекватного предсказания ламинарно-турбулентного перехода и возможности расчета в едином алгоритме коэффициента теплоотдачи для ламинарного, переходного и турбулентного режимов свободно-конвективного течения около вертикальной поверхности нагрева.

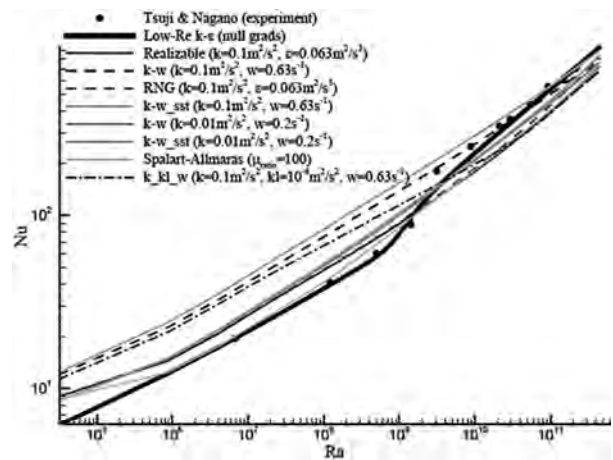
В ряде работ [3, 5] отмечена способность низкорейнольдсовых моделей к спонтанному переходу к турбулентности. В частности, в работе [3] рассматривалось конвективное течение в трубе при заданном постоянном тепловом потоке на поверхности. Как видно из рис. 1, положение точки перехода, полученное по низкорейнольдсовой модели турбулентности  $k-\epsilon$  [4] совпадает с экспериментальными данными и результатами прямого численного моделирования.

На рис. 2 показано сравнение результатов численного моделирования свободно-конвективного течения около вертикальной нагретой поверхно-



**Рис. 1.** Зависимость приведенного числа Нуссельта от числа Бонда для течения в круглой трубе [3]

**Fig. 1.** Reduced Nusselt number versus Bond number for the flow in the circular tube [3]



**Рис. 2.** Зависимость числа Нуссельта от локального числа Рэлея [5]

**Fig. 2.** Nusselt number versus local Rayleigh number [5]

сти с замыканием по различным моделям турбулентности [5]. Расчеты по низкорейнольдсово модели турбулентности  $k$ - $\epsilon$  [4] также показывают наилучшее совпадение с экспериментальными данными.

Целью данной работы является оценка возможности использования полуэмпирических моделей турбулентности для предсказания положения ламинарно-турбулентного перехода свободно-конвективного турбулентного течения около вертикальной поверхности нагрева.

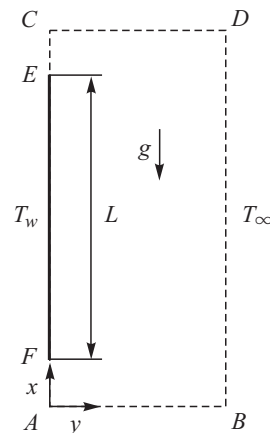
В качестве базового течения была выбрана задача о естественно-конвективном течении вдоль вертикальной пластины, которая широко используется для верификации программных кодов и моделей турбулентности. Наиболее полное экспериментальное исследование параметров турбулентного пограничного слоя на нагретой пластине в воздухе проведено в работе Nagano [6].

## Постановка задачи

Formulation of task

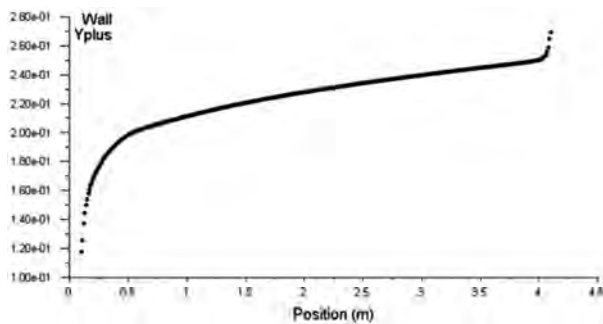
Рассматривалась двумерная задача в стационарной постановке. Значения определяющих параметров задавались в соответствии с экспериментальным исследованием [6]. Схема расчетной области приведена на рис. 3. В качестве масштаба длины принята высота пластины  $L = 4$  м. Температура поверхности пластины (участок  $FE$ )  $T_w = 333$  К. На участке  $EC$  (выше пластины, здесь

развивается восходящее струйное течение) и  $AF$  (ниже пластины) ставятся условия симметрии. Граница  $BD$  является входной; здесь задается нулевое полное давление и полная температура, равная температуре окружающей среды, а скорость подтекания определяется в ходе решения задачи по величине получаемого статического давления. На выходной границе  $CD$  реализуются условие нулевого статического давления и температура  $T_\infty = 289$  К. Нижняя граница  $AB$  задается стенкой со скольжением и адиабатическим условием на тепловой поток. Значения параметров турбулентности на входной границе задава-



**Рис. 3.** Схема расчетной области

**Fig. 3.** Layout of calculation domain



**Рис. 4.** Распределение нормированной пристенной координаты  $y^+$  вдоль пластины

**Fig. 4.** Distribution of normalized near-wall coordinate  $y^+$  along the plate

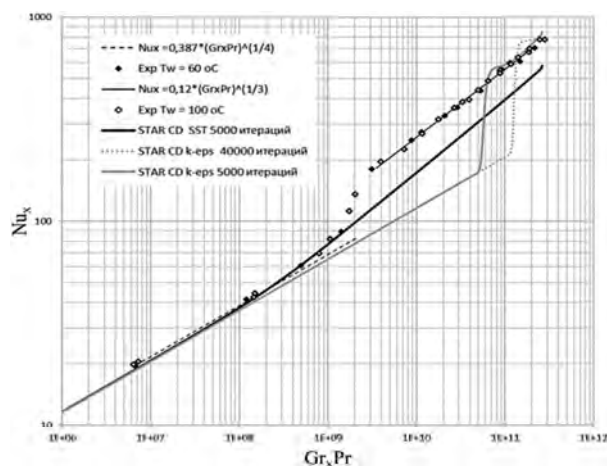
лись интенсивностью турбулентности равно 0,1 и отношением турбулентной вязкости и молекулярной – 30.

Для расчетов использовались декартовы сетки со сгущением по направлению к стенке. Величина первого пристенного шага выбиралась таким образом, чтобы обеспечить приемлемое для большинства низкорейнольдсовых моделей турбулентности значение нормированной пристенной координаты  $y^+ < 1$  (рис. 4).

## Основные результаты

### Main results

Численные решения системы дифференциальных уравнений в приближении Буссинеска про-



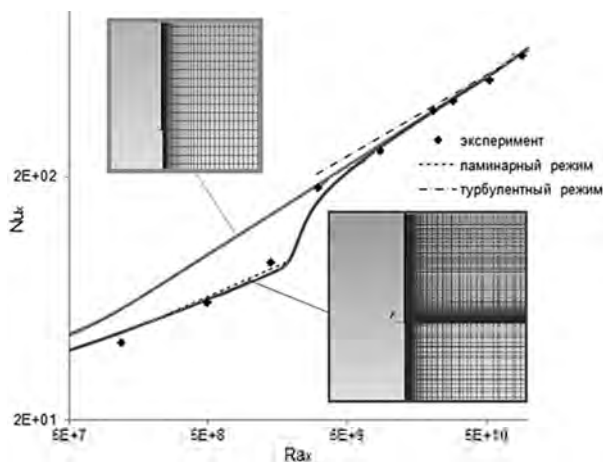
**Рис. 5.** Изменение локального числа Нуссельта по длине пластины: (программный комплекс STAR-CD)

**Fig. 5.** Variation of local Nusselt number along the plate (as calculated in STAR-CD software package)

водились двумя расчетными CFD кодами: программный комплекс STAR-CD версия 3.26 и пакет прикладных программ ANSYS FLUENT. В обоих случаях исследовалось турбулентное течение. Для решения использовался Pressure-based решатель, дискретизация второго порядка точности по пространству и по времени. Рассматривались 2 модели турбулентности:  $k-\omega$  Menter SST и низкорейнольдсовая модель турбулентности  $k-\epsilon$  [4].

На рис. 5 представлено изменения локального числа Нуссельта по пластине: черные пунктирная и сплошная линия – аппроксимации для ламинарного и турбулентного участка соответственно [6], точками показаны результаты эксперимента для двух температур поверхности нагрева [6], красная линия – модель турбулентности  $k-\omega$  Menter SST, синие кривые – низкорейнольдсовая модель турбулентности  $k-\epsilon$  [4] 5000 и 40000 итераций. Из рисунка видно, что на ламинарном участке обе модели хорошо совпадают с результатами эксперимента. Результаты численного моделирования турбулентного пограничного слоя на нагретой пластине в воздухе в программном комплексе STAR-CD показали, что модель  $k-\omega$  Menter SST не дает ярко выраженного ламинарно-турбулентного перехода, а для  $k-\epsilon$  модели положение точки перехода смещается вверх по пластине с увеличением количества итераций.

Аналогичные результаты отмечались и при расчете в пакете прикладных программ ANSYS



**Рис. 6.** Изменение локального числа Нуссельта по длине пластины

**Fig. 6.** Variation of local Nusselt number along the plate

FLUENT. Рис. 6 иллюстрирует зависимость получаемого решения по низкорейнольдсовой модели турбулентности  $k$ - $\epsilon$  от расчетной сетки: на измельченной в 2 раза сетке с внесением дополнительных сеточных возмущений путем сгущения к кромке пластины удалось добиться устойчивого положения точки перехода, что хорошо согласуется с экспериментальными данными [6].

Наряду с отмеченными выше особенностями численного моделирования турбулентного пограничного слоя на нагретой пластине, в результате сравнения с экспериментальными данными [6] было установлено, что модель  $k$ - $\omega$  Menter SST завышает максимальное значение скорости на 22 %, в то время как модель  $k$ - $\epsilon$  дает отклонение всего в 1 %. Однако ни одна модель не смогла верно предсказать экспериментальную толщину динамического пограничного слоя. Модель SST сильно зауздила, а модель  $k$ - $\epsilon$ , наоборот, завысила толщину пограничного слоя. Температурные поля, в силу своей консервативности, по обеим моделям дают хорошие согласования с экспериментом.

## Заключение

### Conclusion

В заключении можно сделать следующие выводы.

Модель  $k$ - $\omega$  Menter SST демонстрирует сравнительно медленное нарастание турбулентной вязкости по всей длине пластины без ярко выраженной точки «перехода».

Некоторые низкорейнольдсовые модели, такие как  $k$ - $\epsilon$  [4], действительно способны к спонтанному переходу к турбулентности, но положение перехода зависит не только от модели турбулентности, но и от схемы, сетки, глубины сходимости и других численных особенностей алгоритма расчета. Таким образом, можно сделать вывод, что полуэмпирические модели турбулентности без внесения дополнительных возмущений непригодны для надежного предсказания положения ламинарно-турбулентного перехода.

## Библиографический список

### References

1. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1973. [M. Mikheev, I. Mikhaylova. Fundamentals of heat transfer. Moscow: Energiya, 1973. (in Russian)].
2. Гебхарт Б., Джалурия Й., Махаджан Р.Л., Саммакия Б. Свободноконвективные течения, тепло и массообмен. Кн. 2. М.: Мир, 1991. [B. Gebhart, Y. Jaluria, R. Mahajan, B. Sammakia. Buoyancy-Induced Flows and Transport. Book 2. Moscow: Mir, 1991. (Russian translation)].
3. Коттон М., Аддад Ю., Кешмири А., Рольфо С. Улучшенный метод моделирования турбулентности в задачах энергетики // Семинар пользователей расчетного кода «Сатурн». Шатоу, Франция, ноябрь 2007. [M. Cotton, Yu. Addad, A. Keshmiri, S. Rolfo. Improved method for modeling turbulence in energy problems // Code Saturne Users' Meeting. Chatou, France, November 2007. (in Russian)].
4. Lien F.S., Leschziner M.A. Computational modelling of a transitional 3D turbine-cascade flow using a modified low-Re  $k$ - $\epsilon$  model and a multi-block scheme // Int. J. of Comp. Fluid Dynamics. 1999; 12: 1–15.
5. Безлепкин В.В., Семашко С.Е., Затевахин М.А., Игнатьев А.А. и др. Верификация и валидация CFD-кодов на задачах свободно-конвективного теплообмена и поверхностной конденсации // Атомный проект. 2012. № 13. С. 44–45. [V. Bezlepkin, S. Semashko, M. Zatevakhin, A. Ignatyev et al. Verification and validation of CFD codes for free-convection heat exchange and surface condensation // Atomic Project. 2012; 13: 44–5. (in Russian)].
6. Nagano Y., Tsuji T. Characteristics of a turbulent natural convection boundary layer along a vertical flat plate // Int. J. Heat Mass Transfer. 1988; 8(31): 1723–34.

### Сведения об авторах

Багаев Дмитрий Владимирович, начальник сектора Суперкомпьютерного Центра математического моделирования ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (911) 210-46-69. E-mail: D\_Bagaev@ksrc.ru.

Сыралева Мария Николаевна, инженер 1 категории ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: 8 (812) 748-63-72.

### **About the authors**

*Bagaev, Dmitry V.*, Head of Sector, High-Performance Computer Centre, KSRC. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (911) 210-46-69. E-mail: D\_Bagaev@ksrc.ru.

*Syralyova, Maria N.*, 1<sup>st</sup> Category Engineer, KSRC. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: 8 (812) 748-63-72.

Поступила / Received: 20.03.18  
Принята в печать / Accepted: 01.06.18  
© Багаев Д.В., Сыралева М.Н., 2018