

ВЫБОР МОДЕЛИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ДЛЯ РАСЧЕТА ПРОФИЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ У ПОВЕРХНОСТИ ТВС ВВЭР-1000 В БАССЕЙНЕ ВЫДЕРЖКИ АЭС

А.В. Воронина, С.В. Павлов

ДИТИ НИЯУ МИФИ

433511, Ульяновская обл., г. Димитровград, ул. Куйбышева, 294



Рассматривается проблема выбора модели турбулентности при моделировании методами вычислительной гидродинамики (CFD-моделирования) естественной конвекции у поверхности ТВС ВВЭР-1000, выгруженной из реактора, для расчета профиля температуры у поверхности ТВС. Выбор модели турбулентности осуществляется сравнением расчетных данных, полученных с использованием программного комплекса Ansys Fluent, с результатами экспериментальных исследований естественной конвекции у поверхности нагретой вертикальной пластины, погруженной в воду, которая в первом приближении моделирует боковую грань ТВС ВВЭР-1000. Рассматриваются наиболее часто используемые в инженерной практике двухпараметрические полуэмпирические модели турбулентности семейств k - ϵ и k - ω . Сравнение расчетных и экспериментальных данных проводилось по избыточной температуре поверхности пластины и профилям температуры воды в турбулентном пограничном слое для режимов конвекции с числом Рэлея от $8 \cdot 10^{13}$ до $3,28 \cdot 10^{14}$. Показано, что наилучшее совпадение с экспериментальными данными со средним отклонением, не превышающим $\sim 8\%$, дает модель RNG k - ϵ , которую рекомендовано использовать для расчета профиля температуры у поверхности ТВС ВВЭР-1000 в бассейне выдержки АЭС.

Ключевые слова: естественная конвекция, модель, турбулентность, ламинарность, тепловыделяющая сборка, температура, Ansys Fluent.

ВВЕДЕНИЕ

Многолетний опыт исследований тепловыделяющих сборок (ТВС) энергетических реакторов с водой под давлением PWR и BWR на стендах инспекции в бассейнах выдержки АЭС убедительно доказал их эффективность при решении таких задач, как научно-техническое сопровождение эксплуатации ТВС, внедрение новых конструкций ТВС и твэлов, обоснование новых топливных циклов [1,2]. Эффективность бассейновой инспекции определяется прежде всего оперативностью получения информации сразу после извлечения ТВС из активной зоны реактора (а.з.), возможностью исследования большого количества ТВС при значительно меньшей стоимости в сравнении с исследованиями в защитных камерах исследовательских центров [1].

© А.В. Воронина, С.В. Павлов, 2021

Для ТВС ВВЭР-1000 разработан и внедряется на АЭС стенд инспекции и ремонта, который позволяет подробно осматривать ТВС и определять их формоизменение, обнаруживать и удалять негерметичные твэлы, проводить вихретоковую дефектоскопию оболочек твэлов [3]. При дальнейшем совершенствовании методического обеспечения стендов инспекции и при разработке новых неразрушающих методов контроля важным являются характеристики исследуемых ТВС, которые могут влиять на работоспособность датчиков или на погрешности измерений. К таким характеристикам относятся радиационные параметры ТВС: мощность дозы гамма- и нейтронного излучения; и теплофизические параметры: температура твэлов и элементов ТВС.

Сразу после выгрузки ТВС ВВЭР-1000 из а.з. реактора она обладает достаточно большим, до сотни киловатт, остаточным тепловыделением, вследствие которого у поверхности ТВС в бассейне выдержки образуется естественная конвекция воды. Конвективный слой характеризуется толщиной и распределением температуры и скорости воды в нем. При этом параметры конвекции меняются по мере продвижения вдоль ТВС начиная с ламинарного режима в нижней части сборки и заканчивая развитой турбулентностью сверху [4].

Наличие конвективного слоя у поверхности ТВС с заметным градиентом температуры воды следует учитывать, особенно при использовании ультразвуковых эхоимпульсных методов измерения размеров ТВС [5]. Так как скорость распространения ультразвуковых волн в воде зависит от температуры, то для оценки погрешности измерения расстояния от датчиков до поверхности ТВС необходимо знать, как изменяется скорость звука в воде вдоль траектории распространения ультразвуковых волн и, следовательно, изменение температуры в пограничном слое.

Для оценки параметров конвекции у поверхности ТВС можно использовать численное моделирование методами вычислительной гидродинамики – CFD (Computational Fluid Dynamics) [6]. В общем виде конвекция у поверхности ТВС описывается уравнениями Навье-Стокса [7], которые в инженерной практике численно решаются методом RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) [7]. Метод RANS заключается в представлении уравнений Навье-Стокса в виде системы осредненных по Рейнольдсу уравнений, для замыкания которой используются различные полупирические модели турбулентности [7].

В настоящее время разработаны сотни моделей турбулентности, но ни одна из них не является универсальной. Поэтому, когда появляется новый объект численного моделирования конвекции, возникает проблема выбора конкретной модели турбулентности и оценки степени достоверности полученных с ее помощью результатов.

Как правило, обоснование выбора модели турбулентности проводят сравнением расчетных данных, полученных с использованием различных моделей, с результатами эксперимента. При этом эксперимент может проводиться с использованием самого объекта исследования либо его модели или близких (идентичных) к нему по физической сути процессов конвекции объекта.

В литературе нет экспериментальных данных по параметрам естественной конвекции у поверхности погруженной в воду ТВС ВВЭР-1000 с остаточным тепловыделением. В связи с этим возникает необходимость искать примеры экспериментальных исследований естественной конвекции для объектов, по возможности близких с точки зрения теплофизики к нагретой ТВС ВВЭР-1000. Конвективный слой вдоль наружной поверхности ТВС формируется, в первую очередь, тепловыделением твэлов наружного ряда, которые в первом приближении могут моделироваться нагретой вертикальной пластиной с шириной, равной грани ТВС ВВЭР-1000 (~ 135 мм), и высотой, равной высоте твэлов (~ 4000 мм), с плотностью теплового потока, равным потоку от твэлов и направленному перпендикулярно пластине во внешнюю

среду. Другими словами, ТВС ВВЭР-1000 моделируется нагретым шестигранником.

В статье приведены результаты CFD-моделирования с использованием программного комплекса (ПК) Ansys Fluent [8] естественной конвекции вдоль вертикальной нагретой пластины, погруженной в воду. В качестве моделей турбулентности использовались двухпараметрические полуэмпирические модели семейств k - ε и k - ω . Результаты расчетов сравнивались с результатами экспериментов [9, 10].

CFD-МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНВЕКЦИИ

Существует множество теоретических и экспериментальных исследований, посвященных изучению естественной конвекции у вертикальной нагретой поверхности. Поскольку явление естественной конвекции наиболее привлекает ученых при расчетах строительных конструкций, инженерных систем при отводе или подводе тепла, то значительное количество работ посвящено изучению естественной конвекции у вертикальной поверхности с равномерным нагревом в воздушной среде. Исследований по изучению конвекции у неизотермической поверхности выполнено существенно меньше. Одной из первых работ, в которой опубликованы результаты экспериментов по изучению ламинарной конвекции у вертикальной поверхности с постоянным тепловым потоком в воде, является работа Лока и Троттера [11]. Влит и Лайю [9] продолжили исследования по изучению естественной конвекции у погруженной в воду пластины с постоянным тепловым потоком. Эксперименты проведены для различных значений температуры воды и плотности теплового потока. Аналогичные исследования были проведены Гебхартом [10].

Для сопоставления полученных результатов при CFD-моделировании конвекции с экспериментальными данными были выбраны эксперименты, опубликованные в [9, 10]. В этих работах представлены подробные данные по избыточной температуре стенки и профилю температур в пограничном слое.

В общем виде течение вязкой жидкости описывается системой уравнений Навье-Стокса, состоящей из уравнения сохранения массы и закона сохранения импульса [12]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{v}) &= 0, \\ \frac{\partial(\rho \mathbf{v})}{\partial t} + (\rho \mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} &= -\nabla p + \mu \Delta \mathbf{v} + \mathbf{F}, \end{aligned} \quad (1)$$

где \mathbf{v} – вектор скорости жидкости; μ – динамическая вязкость; \mathbf{F} – вектор объемных сил; p – статическое давление; ρ – плотность; ∇ – оператор Гамильтона; Δ – оператор Лапласа.

Существующие подходы к моделированию турбулентных течений разделяют на три направления:

- прямое численное моделирование (DNS);
- решение систем уравнений, осредненных по Рейнольдсу (RANS);
- метод моделирования крупных вихрей (LES).

Метод DNS предполагает решение полных нестационарных уравнений Навье-Стокса. Для моделирования реальных физических течений метод DNS сложно применим, так как требует вычислительных мощностей, реализация которых станет возможна только к 2080 г. [13]. Качественное описание турбулентного течения при меньшей по сравнению с предыдущим методом мощностью требует метод LES, позволяющий моделировать не только мелкие вихри, но и проводить прямой расчет крупных вихрей [14]. Из-за того, что метод LES требует использования параллельных вычислительных систем, для моделирования турбулентности использовался

метод RANS. Для замыкания уравнений, осредненных по Рейнольдсу, разработано множество RANS-моделей турбулентности. Данный метод позволяет получить физически корректный результат при относительно невысокой ресурсоемкости [15].

Для изотермических условий было выполнено большое количество работ по моделированию свободно-конвективного течения около вертикальной поверхности нагрева [16 – 18]. Для замыкания системы (1) использовались различные модели турбулентности. Эти исследования показали, что наиболее распространенные модели турбулентности k - ϵ и k - ω из семейства двухпараметрических RANS-моделей могут использоваться для расчета естественно-конвективных течений и теплообмена. Однако требуется оценка их применимости для исследования свободно-конвективного течения вблизи неизотермической поверхности.

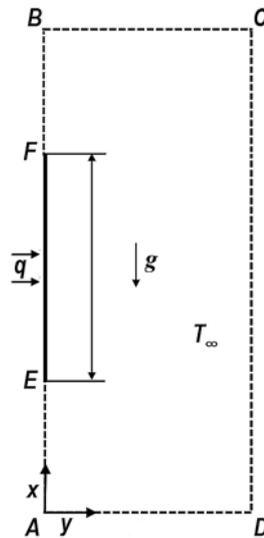


Рис. 1. Схема расчетной области

Численное моделирование задачи выполнялось в нестационарной двумерной постановке. Исследовалось течение вдоль тепловыделяющей пластины высотой 1,5 м, погруженной в статическую жидкость (вода) с постоянной температурой T_∞ . Схема расчетной области приведена на рис. 1.

Начальные условия имеют вид

$$u(x, y, 0) = v(x, y, 0) = k(x, y, 0) = \epsilon(x, y, 0) = \omega(x, y, 0) = 0;$$

$$T(x, y, 0) = T_{\infty}$$

где u, v – проекции вектора скорости на оси x и y соответственно; x, y – координаты, м; k – кинетическая энергия турбулентности, $\text{м}^2/\text{с}^2$; ϵ – скорость диссипации кинетической энергии турбулентности, $\text{м}^2/\text{с}^3$; ω – удельная скорость диссипации энергии турбулентности, с^{-1} ; T_∞ – температура воды, $^\circ\text{C}$.

В качестве граничных условий на поверхности пластины FE заданы граничные условия второго рода по температуре

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = q$$

и условия прилипания и непроницаемости для скорости

$$\mathbf{v} = 0,$$

где λ – теплопроводность материала стенки; \mathbf{n} – вектор нормали к поверхности;

q – плотность теплового потока, Вт/м²; \mathbf{v} – вектор скорости.

На участках AE и FB задано условие симметрии, обозначающее равенство нулю нормальной к границе составляющей скорости движения жидкости, а также градиентов температуры и давления:

$$v(x, y, t) = 0,$$

$$\frac{\partial p}{\partial \mathbf{n}} = \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = 0.$$

На границах AD , CD и BC задаются следующие граничные условия для скорости, давления и температуры:

$$u(x, y, t) = v(x, y, t) = 0,$$

$$p(x, y, t) = p_{\infty},$$

$$T(x, y, t) = T_{\infty}.$$

где p_{∞} и T_{∞} – давление и температура воды соответственно.

Для моделирования турбулентности использовались следующие модели турбулентности из семейств k - ϵ и k - ω , реализованные в Ansys Fluent: Standard k - ϵ , RNG k - ϵ , Realizable k - ϵ , Standard k - ω и SST k - ω . В силу ограниченного объема работы подробное описание каждой из моделей здесь не представлено. Математическая формулировка и особенности моделей приведены в [12].

Модели семейства k - ϵ не способны удовлетворительно смоделировать эффекты, происходящие в пристеночной области. Для качественного моделирования течения в пограничном слое при помощи моделей k - ϵ используются полуэмпирические формулы, называемые *пристеночными функциями*. В Ansys Fluent имеются следующие модели для пристеночной турбулентности: стандартные пристеночные функции (Standard Wall Function), неравновесные пристеночные функции (Non-equilibrium Wall Function) и расширенное пристеночное моделирование (Enhanced Wall Treatment) [8]. В работе использовалось расширенное пристеночное моделирование. Использование пристеночных функций Standard Wall Function и Non-equilibrium Wall Function показало плохое соответствие при моделировании похожего явления – конвекции у изотермической пластины [18].

Для описания конвективного движения нередко применяется приближение Бусинеска [19]. Однако использование этого приближения возможно только при малых перепадах температур (для воды $\Delta T < 2^{\circ}\text{C}$) [20]. В связи с этим все теплофизические свойства воды, в том числе и плотность, предполагаются полиномиальными функциями от температуры.

Решение проводилось с помощью решателя Pressure-Based Solver. Для расчета связи поля скорости и давления использовался алгоритм Simple (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) с привлечением противоточной схемы второго порядка точности (Second order Up-wind) для конвективных членов в уравнении сохранения импульса, для уравнения кинетической турбулентной энергии и уравнения диссипации турбулентной энергии. Сходимость решения считалась достигнутой в тех случаях, когда разность между итерациями при решении уравнений неразрывности, количества движения, энергии, турбулентной кинетической энергии и скорости диссипации достигала $1 \cdot 10^{-6}$.

Для проведения расчетов применялись регулярные сетки со сгущением по направлению к нагретой стенке. В качестве сеточного генератора использовался Ansys Meshing. Сеточная модель создавалась с учетом основных критериев, характеризующих её качество [8].

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ

Моделирование конвекции выполняли для условий проведения двух экспериментов, результаты которых опубликованы в работе [9], и для одного эксперимента из [10]. В первом эксперименте из [9] плотность теплового потока от пластины составила $q = 19497 \text{ Вт/м}^2$; температура воды $T_\infty = 33^\circ\text{C}$; профиль температуры в пограничном слое снят на высотной отметке $h = 1,067 \text{ м}$ от нижнего края пластины.

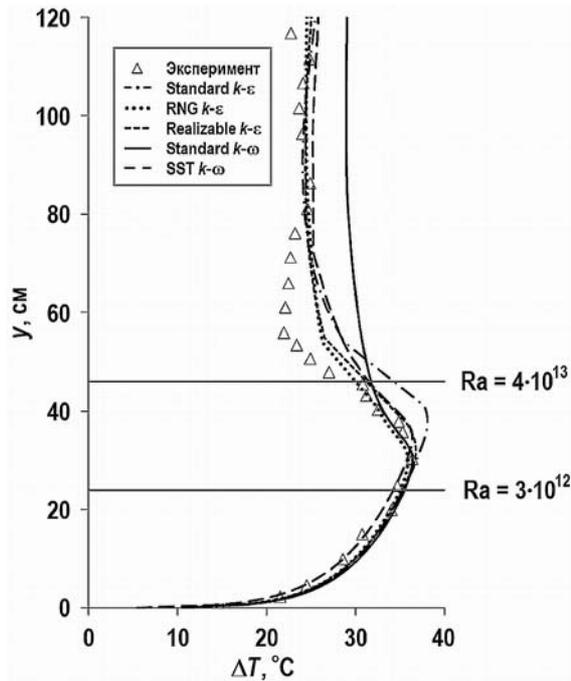


Рис. 2. Избыточная температура стенки в условиях эксперимента [9] с $q = 19497 \text{ Вт/м}^2$

Условия проведения второго эксперимента из [9]: $q = 28661 \text{ Вт/м}^2$; $T_\infty = 23^\circ\text{C}$; $h = 0,762 \text{ м}$, а эксперимента из [10]: $q = 4488 \text{ Вт/м}^2$, $T_\infty = 23^\circ\text{C}$; $h = 1,194 \text{ м}$.

На рисунках 2, 3 представлены изменения избыточной температуры стенки $\Delta T = T_{\text{ст}} - T_\infty$ (где $T_{\text{ст}}$ – температура поверхности пластины) по высоте пластины для первого и второго экспериментов из [9]. На рисунках горизонтальными линиями отмечены высотные отметки окончания ламинарного режима конвекции с $Ra = 3 \cdot 10^{12}$ и начала развитой турбулентности $Ra = 4 \cdot 10^{13}$.

Из рисунков видно, что все используемые модели турбулентности дают близкие к экспериментальным результаты в области ламинарного режима и удовлетворительно предсказывают область ламинарно-турбулентного перехода ($3 \cdot 10^{12} < Ra < 4 \cdot 10^{13}$). В области развитой турбулентности $Ra > 4 \cdot 10^{13}$ результаты расчета по модели Standard $k-\omega$ резко выделяются из общей картины – завышают температуру стенки пластины почти на 10°C (рис. 3). Поэтому эта модель в расчетах профиля температуры воды в пограничном слое в дальнейшем не использовалась.

На рисунках 4 – 6 представлены результаты численного и экспериментального исследования профиля температуры в турбулентном пограничном слое. В общем, все оставшиеся четыре модели турбулентности в целом удовлетворительно описывают профиль температуры для трех рассматриваемых экспериментов.

Наибольшее расхождение экспериментальных данных с расчетными приходится на область вблизи стенки пластины в пределах $\sim 0,1 \text{ мм}$. Здесь расчетные данные превышают полученные в эксперименте. Возможной причиной такого расхождения

может быть сложность корректного измерения температуры воды в непосредственной близости от пластины, так как датчики для измерения температуры вносят возмущение в структуру вязкого подслоя конвективного течения.

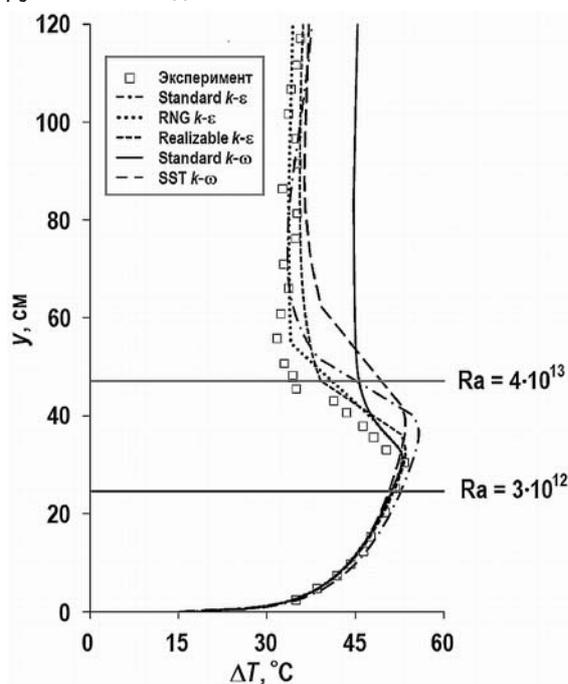


Рис. 3. Избыточная температура стенки в условиях эксперимента [9] с $q = 28661 \text{ Вт/м}^2$

Таблица 1

Отклонения результатов численного моделирования от эксперимента

| Модель турбулентности | Среднее отклонение расчетных данных, % | Максимальное отклонение расчетных данных, % |
|-------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------|
| Standard $k-\epsilon$ | 11,64 | 26,38 |
| RNG $k-\epsilon$ | 8,07 | 22,16 |
| Realizable $k-\epsilon$ | 14,70 | 26,44 |
| SST $k-\omega$ | 14,32 | 26,34 |

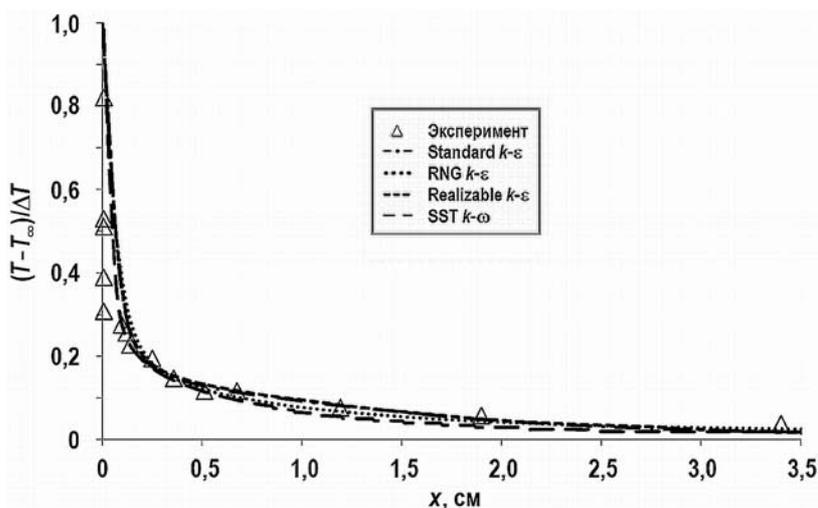
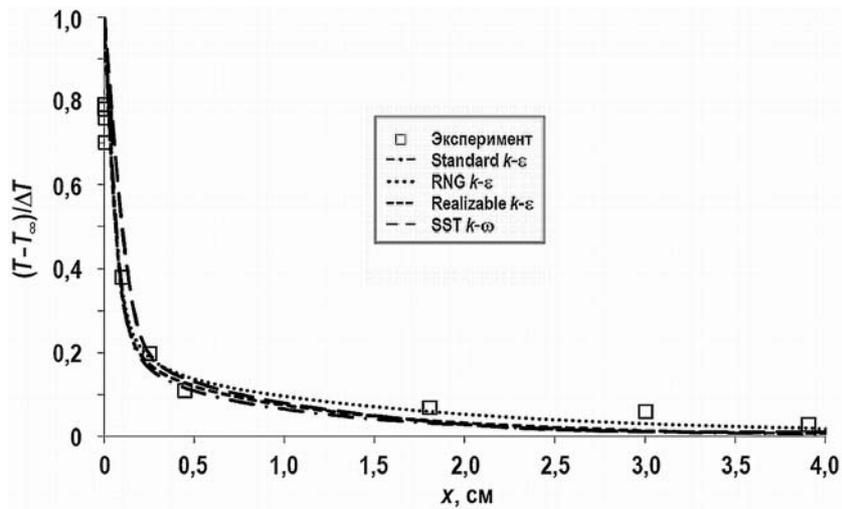
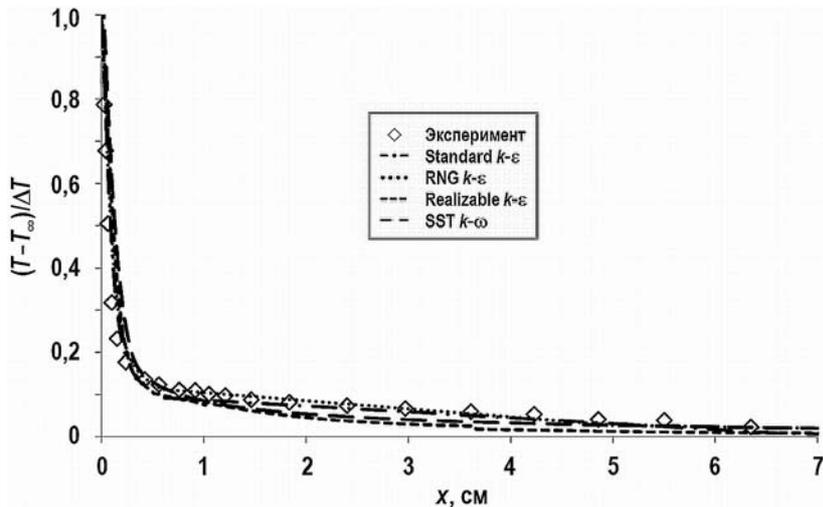


Рис. 4. Профиль температуры в пограничном слое в условиях эксперимента [9] с $q = 19497 \text{ Вт/м}^2$

Рис. 5. Профиль температуры в пограничном слое в условиях эксперимента [9] с $q = 28661 \text{ Вт/м}^2$ Рис. 6. Профиль температуры в пограничном слое в условиях эксперимента [10] с $q = 4488 \text{ Вт/м}^2$

В таблице 1 приведены результаты расчета отклонения результатов численного моделирования с использованием различных моделей турбулентности от экспериментальных данных на рис. 4 – 6. При расчете отклонений не использовали экспериментальные данные, полученные ближе, чем 0,1 мм от поверхности пластины.

Из таблицы видно, что наилучший результат дает модель RNG $k-\varepsilon$ со средним отклонением от экспериментальных данных $\sim 8\%$, тогда как модели Standard $k-\varepsilon$, Realizable $k-\varepsilon$, SST $k-\omega$ дают соответственно 11,6; 14,7 и 14,3%.

ВЫВОДЫ

С использованием ПК Ansys Fluent выполнено CFD-моделирование естественной конвекции у погруженной в воду вертикальной нагретой пластины с постоянной плотностью теплового потока. При моделировании использовались пять наиболее часто применяемых в инженерных задачах двухпараметрических полуэмпирических моделей турбулентности: Standard $k-\varepsilon$, RNG $k-\varepsilon$, Realizable $k-\varepsilon$, Standard $k-\omega$ и SST $k-\omega$.

Результаты моделирования сравнивались с ранее полученными экспериментальными данными по избыточной температуре поверхности пластины и по профилям

температуры воды в турбулентном пограничном слое для трех значений плотности теплового потока ~ 4,5; 19,5 и 28,7 кВт/м². Результаты сравнения показали следующее.

Все используемые модели турбулентности дают близкие к экспериментальным значениям результаты расчетов в ламинарной области и удовлетворительно предсказывают область ламинарно-турбулентного перехода.

В зоне развитой турбулентности все рассматриваемые модели, кроме Standard $k-\omega$, удовлетворительно рассчитывают температуру поверхности пластины. Что касается профиля температуры, то наилучший результат дает модель RNG $k-\epsilon$ со средним отклонением от экспериментальных данных в ~ 8 %.

Таким образом, для расчета с использованием ПК Ansys Fluent профиля температуры в ламинарном и турбулентном пограничном слоях естественной конвекции у наружной поверхности облученной ТВС ВВЭР-1000, погруженной в воду, в качестве модели турбулентности рекомендуется использовать двухпараметрическую полуэмпирическую модель турбулентности RNG $k-\epsilon$.

Литература

1. Павлов С.В. Методология материаловедческих исследований ТВС и твэлов ВВЭР для оперативного сопровождения внедрения нового топлива на АЭС. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2014. – № 3. – С. 25-34.
2. Павлов С.В. Неразрушающие ультразвуковые методы исследований облученного топлива ядерных реакторов. – Димитровград: ОАО «ГНЦ НИИАР», 2013. – 256 с.
3. Иванов Н.А., Бромирский И.А., Суров Д.В., Первушин Л.А., Тишков А.Н., Семенцов А.В., Павлов С.В., Амосов С.В. Стенд инспекции и ремонта тепловыделяющих сборок для проекта АЭС-2006. // Тяжелое машиностроение. – 2017. – № 4. – С. 25-28.
4. Воронина А.В., Павлов С.В. Методика и программа расчета скорости звука в воде в условиях естественной конвекции у поверхности тепловыделяющих сборок ядерных реакторов. // Вестник Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ». – 2019. – Т. 8. – № 5. – С. 465-472. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2304487X19050080>.
5. Павлов С.В., Шалагинова Т.М., Михайлов С.В., Прокуданов Д.Л. Исследование влияния естественной конвекции на результаты измерения геометрических характеристик твэлов и тепловыделяющих сборок ультразвуковыми методами в условиях бассейнов выдержки. Препринт. – Димитровград: НИИАР, 1991. – 28 с.
6. Raman R.K., Dewang Y., & Raghuvanshi J. A review on applications of computational fluid dynamics // International Journal of LNCT. – 2018. – Vol. 2 – No. 6 – PP. 137-143.
7. McLean Doug. Understanding Aerodynamics: Arguing from the Real Physics. – У.К.: Wiley, 2013. – 550 p.
8. ANSYS Fluent. Электронный ресурс: <http://www.fluent.com> (дата доступа: 29.09.2020).
9. Viet G.C., Liv C.K. An Experimental Study of Turbulent Natural Convection Boundary Layers. // Journal of Heat Transfer. – 1969. – Vol. 92. – PP. 517-531. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.3580236>.
10. Qureshi Z.H., Gebhart B. Transition and Transport in a Buoyancy Driven Flow in Water Adjacent to a Vertical Uniform Flux Surface. // Int. J. Heat Mass Transform. – 1978. – Vol. 21. – PP. 1467-1479. DOI: [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(78\)90003-0](https://doi.org/10.1016/0017-9310(78)90003-0).
11. Lock G.S.H., Trotter F.J. de B. Observations on the Structure of a Turbulent Free Convection Boundary Layer. // Int. J. Heat Mass Transfer. – 1968. – Vol. 11. – PP. 1225-1232. DOI: [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(68\)90193-2](https://doi.org/10.1016/0017-9310(68)90193-2).
12. Lecheler S. Numerische Stromungsberechnung. Schneller Einstieg durch anschauliche Beispiele mit ANSYS 15.0. – Berlin: Springer, 2014. – 278 p.
13. Spalart P.R. Strategies for Turbulence Modeling and Simulation. // Int. J. Heat and Fluid Flow. – 2000. – Vol. 21. – No. 3. – PP. 252-263. DOI: <https://doi.org/10.1016/>

S0142-727X(00)00007-2.

14. Белов И.А. Моделирование турбулентных течений. – СПб.: БГТУ. – 2001. – 107 с.
15. Spalart P.R., Garbaruk A., Strelets M. RANS Solutions in Couette Flow with Streamwise Vortices. // International Journal of Heat and Fluid Flow. – 2014. – Vol. 49. – PP. 128-134. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2014.04.010>.
16. Багаев Д.В., Сыралева М.Н. Численное моделирование свободно-конвективного течения около вертикальной поверхности нагрева. // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2018. – № 2. – С. 93-98. DOI: <https://doi.org/10.24937/2542-2324-2018-2-384-93-98>.
17. Yingchun Ji. CFD Modelling of Natural Convection in Air Cavities. // CFD Letters. – 2014. – Vol. 6. – PP. 15-31.
18. Зиганшин А.М., Посохин В.Н., Романов С.В. Тестирование моделей свободной и пристеночной турбулентности при численном решении задачи о конвекции у вертикальной нагретой стенки. // Известия вузов. Строительство. – 2012. – № 4. – С. 71-79.
19. Vykalyuk A., Kuznik F., Johannes K. Studying the Evolution of Both Thermal and Kinetic Boundary Layers in the Vicinity of a Vertical Conductive Gypsum Plate under Dynamic Time-Depending Conditions at the Building Scale. // Energy and Buildings. – 2015. – Vol. 86. – PP. 898-908. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.010>.
20. Ferziger J., Peric M. Computational Methods for Fluid Dynamics. – Berlin: Springer, 2002. – 431 p.

Поступила в редакцию 01.10.2010 г.

Авторы

Воронина Александра Владимировна, старший преподаватель, аспирант
E-mail: AVVoronina@mephi.ru

Павлов Сергей Владленович, зав. базовой кафедрой, доцент, д-р техн. наук
E-mail: pavlov@sosny.ru

UDC 621.039.546.8

SELECTING A TURBULENCE MODEL FOR CALCULATING THE TEMPERATURE PROFILE AT THE SURFACE OF VVER-1000 FUEL ASSEMBLIES IN THE NPP SPENT FUEL POOL

Voronina A.V., Pavlov S.V.

Dimitrovgrad Engineering and Technological Institute, NRNU MEPhI
294 Kuibyshev Ave., 433511 Dimitrovgrad, Ulyanovsk Reg., Russia

ABSTRACT

The article focuses on the problem of selecting a turbulence model to simulate natural convection at the surface of VVER-1000 fuel assemblies unloaded from the reactor by computational fluid dynamics (CFD) methods. The turbulence model is selected by comparing the calculated data obtained using the Ansys Fluent software package with the results of experimental studies of natural convection at the surface of a heated vertical plate immersed in water, which in the first approximation simulates the lateral face of a VVER-1000 fuel assembly. The most widely-used in engineering practice two-parameter semi-empirical models of turbulence, k - ε and k - ω , are considered. The calculated and experimental data were compared on the excess

temperature of the plate surface and on the water temperature profiles in the turbulent boundary layer for convection modes with the Rayleigh number from $8 \cdot 10^{13}$ to $3.28 \cdot 10^{14}$. It is shown that the best agreement with experimental data with an average deviation not exceeding $\sim 8\%$ is provided by the RNG $k-\omega$ model, which is recommended to be used in modeling natural convection at the fuel assembly surface.

Key words: natural convection, model, turbulence, laminarity, fuel assembly, temperature, Ansys Fluent.

REFERENCES

1. Pavlov S.V. Methodology of Material Science Investigations of VVER Fuel Assemblies and Fuel Elements for Operational Support of New Fuel Introduction at NPPs. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika*. 2014, no. 3, pp. 25-34 (in Russian).
2. Pavlov S.V. *Nondestructive Ultrasonic Methods for Investigation of Irradiated Fuel of Nuclear Reactors*. Dimitrovgrad. JSC «SSC RIAR» Publ., 2013, 256 p. (in Russian).
3. Ivanov N.A., Bromirsky I.A., Surov D.V., Pervushin L.A., Tishkov A.N., Sementsov A.V., Pavlov S.V., Amosov S.V. Stand for Inspection and Repair of Fuel Assemblies for NPP-2006 Project. *Tyazhyoloe Mashinostroenie*. 2017, no. 4, pp. 25-28 (in Russian).
4. Voronina A.V., Pavlov S.V. Technique and Program of Calculation of Sound Velocity in Water under Conditions of Natural Convection at the Surface of Fuel Assemblies of Nuclear Reactors. *Vestnik Natsional'nogo Issledovatel'skogo Yadernogo Universiteta «MIFI»*. 2019, v. 8, no. 5, pp. 465-472; DOI: <https://doi.org/10.1134/S2304487X19050080>.
5. Pavlov S.V., Shalaginova T.M., Mikhaylov S.V., Prokudanov D.L. *Study of Natural Convection Effect on the Measurement Results of Geometrical Characteristics of Fuel Elements and Fuel Assemblies by Ultrasonic Methods in spent pools*. Preprint. Dimitrovgrad. NIIAR Publ., 1991, 28 p. (in Russian).
6. Raman R.K., Dewang Y., Raghuvanshi J. A Review on Applications of Computational Fluid Dynamics. *International Journal of LNCT*. 2018, v. 2, no. 6, pp. 137-143.
7. McLean Doug. *Understanding Aerodynamics: Arguing from the Real Physics*. U.K. Wiley, 2013, 550 p.
8. ANSYS Fluent. Available at: <http://www.fluent.com> (accessed: Sep. 29, 2020).
9. Vliet G.C., Liv C.K. An Experimental Study of Turbulent Natural Convection Boundary Layers. *Journal of Heat Transfer*. 1969, v. 92, pp. 517-531. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.3580236>.
10. Qureshi Z.H., Gebhart B. Transition and transport in a buoyancy driven flow in water adjacent to a vertical uniform flux surface. *Int. J. Heat Mass Transform.* 1978, v. 21, pp. 1467-1479. DOI: [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(78\)90003-0](https://doi.org/10.1016/0017-9310(78)90003-0).
11. Lock G.S.H., Trotter F.J. de B. Observations on the structure of a turbulent free convection boundary layer. *Int. J. Heat Mass Transfer*. 1968, v. 11, pp. 1225-1232. DOI: [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(68\)90193-2](https://doi.org/10.1016/0017-9310(68)90193-2).
12. Lecheler S. *Numerische Stromungsberechnung. Schneller Einstieg durch anschauliche Beispiele mit ANSYS 15.0*. Berlin: Springer, 2014, 278 p.
13. Spalart P.R. Strategies for Turbulence Modeling and Simulation. *Int. J. Heat and Fluid Flow*. 2000, v. 21, no. 3, pp. 252-263. DOI: [10.1016/S0142-727X\(00\)00007-2](https://doi.org/10.1016/S0142-727X(00)00007-2).
14. Belov I.A. *Modeling of Turbulent Currents*. Saint-Petersburg. BGTU Publ., 2001, 107 p. (in Russian).
15. Spalart P.R., Garbaruk A., Strelets M. RANS solutions in couette flow with streamwise vortices. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2014, v. 49, pp. 128-134. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2014.04.010>.
16. Bagaev D.V., Syraleva M.N. Numerical Simulation of Free Convective Flow near a Vertical Heating Surface. *Trudy Krylovskogo Gosudarstvennogo Nauchnogo Tsentra*. 2018, no. 2, pp. 93-98; DOI: <https://doi.org/10.24937/2542-2324-2018-2-384-93->

98 (in Russian).

17. Yingchun Ji. CFD Modelling of Natural Convection in Air Cavities. *CFD Letters*. 2014, v. 6, pp. 15-31.

18. Ziganshin A.M., Posokhin V.N., Romanov S.V. Testing Models of Free and Near-Wall Turbulence in Numerical Solution of the Problem of Convection at a Vertical Heated Wall. *Izvestia Vuzov. Stroitel'stvo*. 2012, no. 4, pp. 71-79 (in Russian).

19. Bykalyuk A., Kuznik F., Johannes K. Studying the evolution of both thermal and kinetic boundary layers in the vicinity of a vertical conductive gypsum plate under dynamic time-depending conditions at the building scale. *Energy and Buildings*. 2015, v. 86, pp. 898-908. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.010>.

20. Ferziger J., Peric M. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Berlin. Springer, 2002, 431 p.

Authors

Voronina Alexandra Vladimirovna, Senior Lecturer, PhD Student

E-mail: AVVoronina@mephi.ru

Pavlov Sergey Vladlenovich, Head of Department, Docent, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: pavlov@sosny.ru