

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ТЕЧЕНИЯ ВОДЫ СО СВЕРХКРИТИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ КОДАМИ ANSYS-CFX И STAR-CD

И.А. Чусов, А.С. Шелегов, В.И. Слободчук, В.Ф. Украинцев,

А.Н. Яркин

Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ, г. Обнинск



Приведены результаты сравнительного анализа оценок, выполненных с помощью кодов ANSYS-CFX и STAR-CD, для течения воды при сверхкритических параметрах с экспериментальными данными ГНЦ РФ-ФЭИ. Оценки были проведены с использованием пяти моделей турбулентности. Показано, что результаты расчета удовлетворительно согласуются с данными экспериментов. Отдельно рассмотрен вопрос о формировании М-образного профиля скорости.

Ключевые слова: ядерный реактор, сверхкритические параметры теплоносителя, код ANSYS-CFX, код STAR-CD, турбулентность, экспериментальный участок.

Key words: nuclear reactor, supercritical parameters of coolant, ANSYS-CFX code, STAR-CD code, turbulence, experimental part.

Обоснование возможности создания инновационного реактора на сверхкритических параметрах (СКП) «Супер-ВВЭР» на современном этапе является одним из доминирующих направлений в развитии атомной энергетики РФ.

Возможность использования воды сверхкритического давления в качестве теплоносителя для водоохлаждаемых реакторов обсуждается с начала 1960-х гг. В разные годы использование в корпусных водоохлаждаемых реакторах теплоносителя со сверхкритическими параметрами рассматривалось в РНЦ «Курчатовский институт», МЭИ, ИВТАН, ГНЦ РФ-ФЭИ и целом ряде других институтов.

При расчете течений теплоносителей с СКП кроме обычных сложностей численного характера, таких как необходимость адекватного задания геометрии входной и выходной камер рассчитываемого участка, построения расчетной сетки, позволяющей наиболее точно оценить величину силы трения и интенсивность теплообмена, обеспечение сеточной независимости решения, прибавляется специфика расчета течения с сильно изменяющимися теплофизическими свойствами.

В работе преследуется цель показать, с одной стороны, возможность применения современных расчетных кодов к расчету течений с СКП в обогреваемой трубе, а с другой – провести анализ различных факторов, определяющих интенсивность процессов тепломассообмена в течениях такого типа.

© И.А. Чусов, А.С. Шелегов, В.И. Слободчук, В.Ф. Украинцев, А.Н. Яркин, 2011

Первые экспериментальные работы по течению теплоносителя с СКП в нашей стране были выполнены еще в 50-х гг. прошлого столетия. Уже в это время было отмечено, что течение теплоносителя с СКП обладает рядом специфических свойств:

- сильной немонотонной зависимостью теплоемкости, плотности, коэффициента объемного расширения и числа Прандтля от температуры;
- значительным ускорением потока по длине канала;
- большим вкладом естественной конвекции в общий механизм перемешивания, обусловленный действием сил плавучести;
- наличием области ухудшенного теплообмена.

Именно эти обстоятельства и являются основной причиной необходимости верификации кодов ANSYS-CFX и STAR-CD.

Отметим, что практически все работы зарубежных авторов [1–4], в которых приводятся результаты численных расчетов течений с СКП, касаются вычислений, в которых режим с возникновением зоны ухудшенного теплообмена намеренно или ненамеренно исключается. Однако, по мнению авторов работы, именно течения такого типа могут быть «лакмусовой бумажкой» для оценки качества расчета тем или иным расчетным кодом.

МОДЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Модельный эксперимент был выполнен в ГНЦ РФ-ФЭИ [5, 6]. Экспериментальный участок (ЭУ) в первом случае представлял собой вертикальную трубу с обогреваемой длиной 1 м, а во втором случае обогреваемая длина ЭУ равнялась 4 м. В обоих случаях труба имела диаметр $D = 14 \times 2$. Материал трубы – нержавеющая сталь марки 12X18H10T. Общий вид экспериментального участка (ЭУ) показан на рис. 1. Шероховатость поверхности трубы характеризовалась средним арифметическим отклонением профиля $R_s = 0,63 - 0,80$ мкм. В качестве рабочего тела использовалась дистиллированная вода.

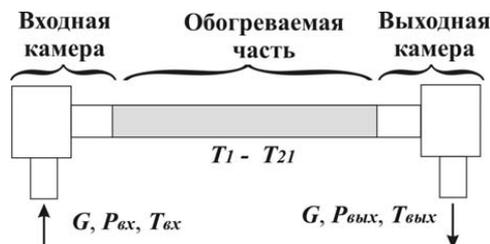


Рис. 1. Схема экспериментального участка

Измерения входной и выходной температуры воды выполнялись при помощи хромель-копелевых термопар, установленных на входе ($T_{вх1}$, $T_{вх2}$) и выходе ($T_{вых1}$, $T_{вых2}$) ЭУ. Кроме того, измерялась температура воды в месте измерения расхода ($T_{ш}$).

Температура наружной поверхности стенки трубы определялась посредством хромель-алюмелевых термопар, установленных вдоль трубы с шагом 50 мм по высоте ($T_{с1}$, $T_{с21}$). Количество термопар на стенке, закрепленных контактной сваркой и изолированных стеклянным шнуром, составляло 21 шт.

Для измерения давления воды ($P_{вх1}$, $P_{вх2}$) и перепада давления на ЭУ использовались преобразователи типа Сапфир-22ДИ и Сапфир-22ДД класса 0,25, установленные перед входом в обогреваемую часть трубы и после выхода из нее, через камеры отбора давления.

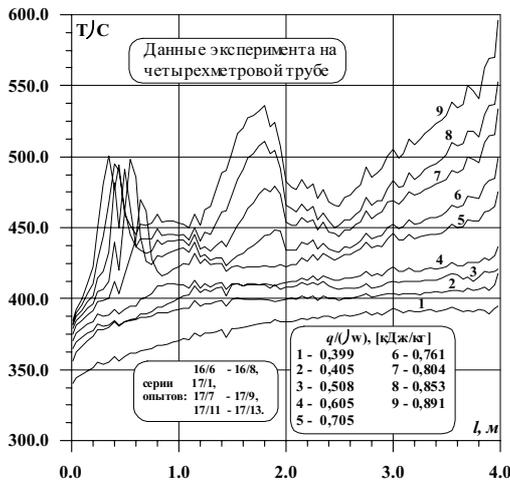


Рис. 2. Типичные результаты эксперимента. Эксперименты для $\rho w = 492-503 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$

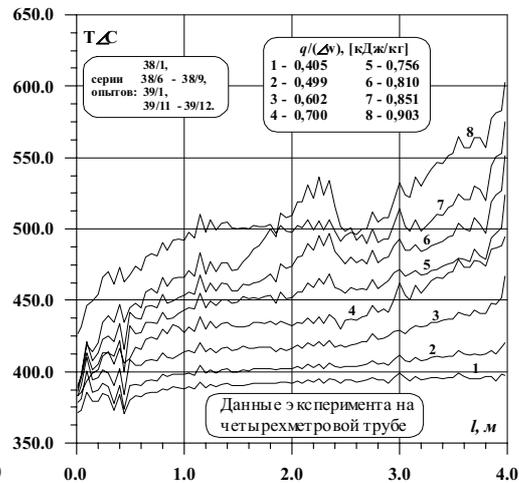


Рис. 3. Типичные результаты эксперимента. Эксперименты для $\rho w = 996-1002 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$

Обогрев ЭУ производился пропусканием по трубе переменного тока через токопроводящие шины, установленные непосредственно на трубе.

Исследования проводились при следующих режимных параметрах: 1) длина трубы 1 м, давление на входе $P_{\text{вх}} = 24,5 \text{ МПа}$, массовая скорость $\rho w = 200-10000 \text{ кг}/(\text{м}^2 \text{ с})$, температура воды на входе $T_{\text{вх}} = 50-450^\circ\text{C}$, тепловой поток $q = 200-8000 \text{ кВт}/\text{м}^2$; 2) длина трубы 4 м, давление на входе 23, 24, 25 МПа, массовая скорость $\rho w = 200-2000 \text{ кг}/(\text{м}^2 \text{ с})$, температура воды на входе $T_{\text{вх}} = 320-380^\circ\text{C}$, на выходе – $T_{\text{вых}} = 380-500^\circ\text{C}$, тепловой поток $q = 40-1200 \text{ кВт}/\text{м}^2$.

Наиболее характерные результаты измерений приведены на рис. 2 и 3 для обогреваемой трубы длиной 4 м.

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ И РАСЧЕТНЫЕ СЕТКИ

Расчетная модель строилась в соответствии с условиями эксперимента, проведенного для обогреваемой трубы 1 м. В ходе построения расчетной модели полностью воспроизводились вход, выход и обогреваемая часть ЭУ.

Расчетная сетка для кода ANSYS-CFX [7] строилась с использованием стандартных средств, а именно, с помощью процедуры CFX-Mesh. Сетка имеет сгущение в пристеночной области, где градиенты всех составляющих скорости и температуры имеют наибольшее значение. На рисунках 4а, б в качестве примера показан фрагмент расчетной сетки, а именно, входная камера ЭУ, построенной кодом ANSYS-CFX. На рисунках 4в, д показаны фрагменты расчетной сетки, построенной кодом STAR-CD [8].

Результаты правильности построения сетки были подтверждены предварительными вариантными расчетами по исследованию сеточной независимости решения.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Вариантные расчеты были проведены для массовых скоростей 200, 500, 1000 $\text{кг}/(\text{м}^2 \text{ с})$. Такой выбор исходных параметров определялся тем, что при значении массовых скоростей 200 и 1000 $\text{кг}/(\text{м}^2 \text{ с})$ в экспериментах не наблюдалось формирование зоны ухудшенного теплообмена, которое имеет место при массовой скорости $\rho w = 500$.

На рисунке 5 приведены некоторые результаты расчетов в сравнении с экспериментальными данными. Из рисунков видно, что код ANSYS-CFX качественно вер-

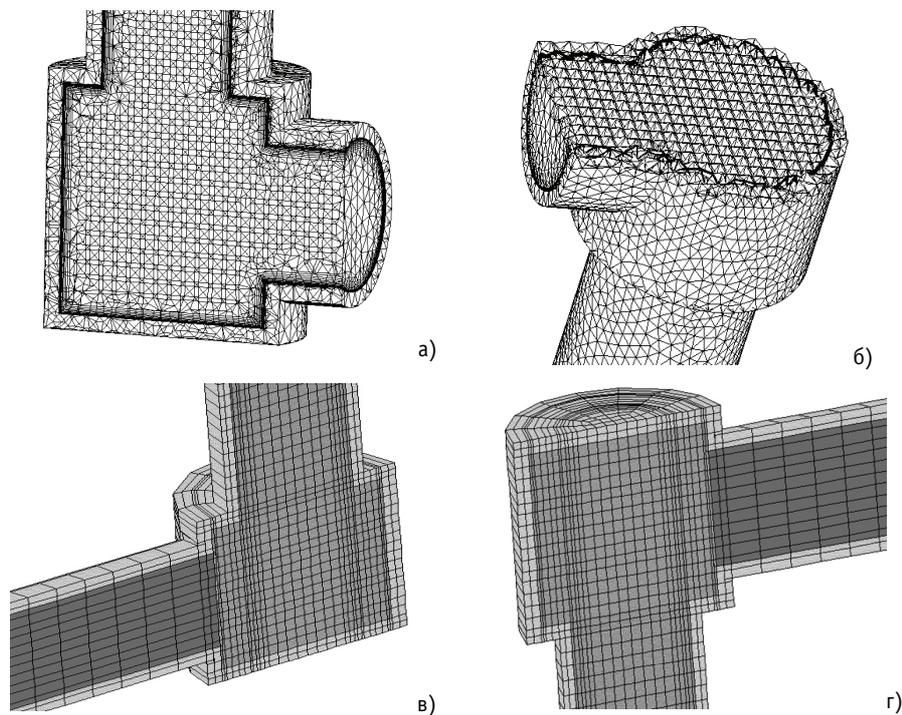


Рис. 4. Расчетные сетки, сформированные кодом ANSYS-CFX: а) вход в ЭУ; б) выход из ЭУ и кодом STAR-CD: в) вход в ЭУ; г) выход из ЭУ

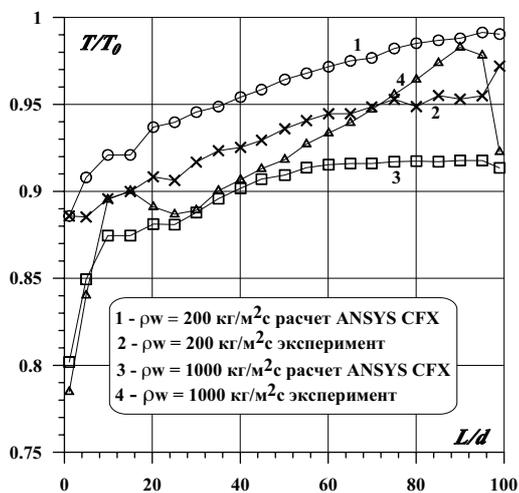


Рис. 5. Результаты расчетов для режимов с $\rho_w = 200 \text{ кг}/(\text{м}^2 \text{ с})$ и $\rho_w = 1000 \text{ кг}/(\text{м}^2 \text{ с})$ соответственно

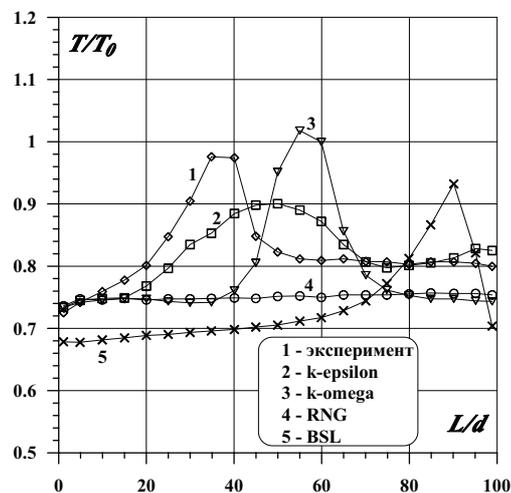


Рис. 6. Сравнение данных эксперимента $\rho_w = 500 \text{ кг}/(\text{м}^2 \text{ с})$ с расчетом по различным моделям турбулентности

но отражает характеристики теплообмена при сверхкритических параметрах. Однако в количественном отношении различие с экспериментом может быть достаточно существенным. На этом рисунке T_0 – начальная температура на входе.

На рисунке 6 показаны варианты расчетов с зоной ухудшенного теплообмена. В ходе анализа результатов расчета был сделан вывод, что они сильно зависят от способа задания теплофизических свойств воды. Чем точнее задание свойств воды,

тем лучше соответствие результатов расчета с экспериментальным данным. Последнее хорошо объясняется резким изменением теплофизических свойств воды в зоне ухудшенного теплообмена.

Как показали расчеты наши и других авторов [4], результаты численного моделирования очень чувствительны к точности задания теплофизических параметров теплоносителя. Отметим что в случае полиномиального задания теплофизических свойств воды в соответствии с IF-97, видимо, необходимо проводить расчет на 64-х разрядных компьютерах, так как вычисление свойств воды на 32-х разрядных компьютерах приводит к значительным вычислительным погрешностям.

В таблице 1 приведено значение максимальной относительной ошибки между результатами расчетов с помощью различных моделей турбулентности и данными опытов в области ухудшенного теплообмена. Расчет был проведен со значениями констант в моделях турбулентности, заданных по умолчанию.

Таблица 1

Модель	<i>LRR</i>	<i>k-ε</i>	<i>k-Ω</i>	<i>BSL</i>	<i>RNG k-ε</i>	<i>SST</i>
Расхождение, %	32,2	14,5	32,5	36,9	32,2	25,8

Анализ табл. 1 указывает на большое расхождение между данными опытов и результатами расчета. Моделью с наименьшей погрешностью оказалась классическая *k-ε*-модель. Такое большое расхождение хорошо объясняется, если рассмотреть картины линий тока во входной (рис. 7) и выходной камерах (рис. 8). Кроме того, наличие явно выраженных вихревых структур в середине (рис. 9а) и конце (рис. 9б) обогреваемого участка сильно влияет на температуру стенки, по которой проводится сравнение результатов расчета и эксперимента.

Основной вывод, который должен быть сделан из анализа рис. 7–9, – это либо использовать канал большей длины, что повлечет за собой частичную или полную

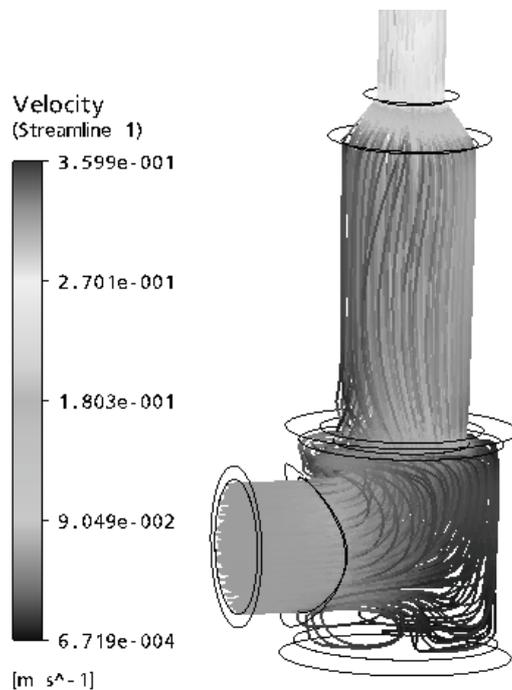


Рис. 7. Линии тока в объеме входной камеры

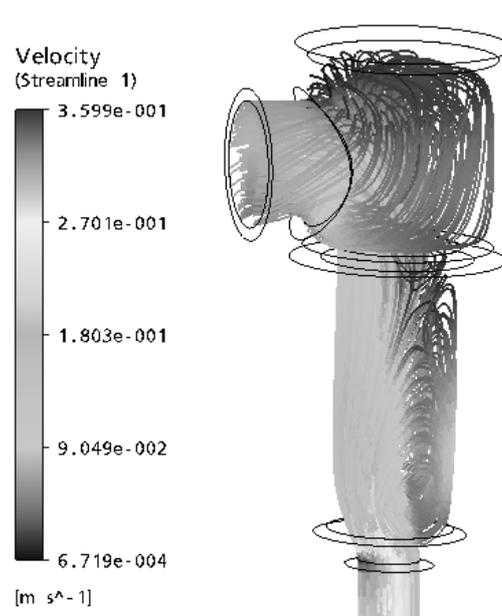


Рис. 8. Линии тока в объеме выходной камеры

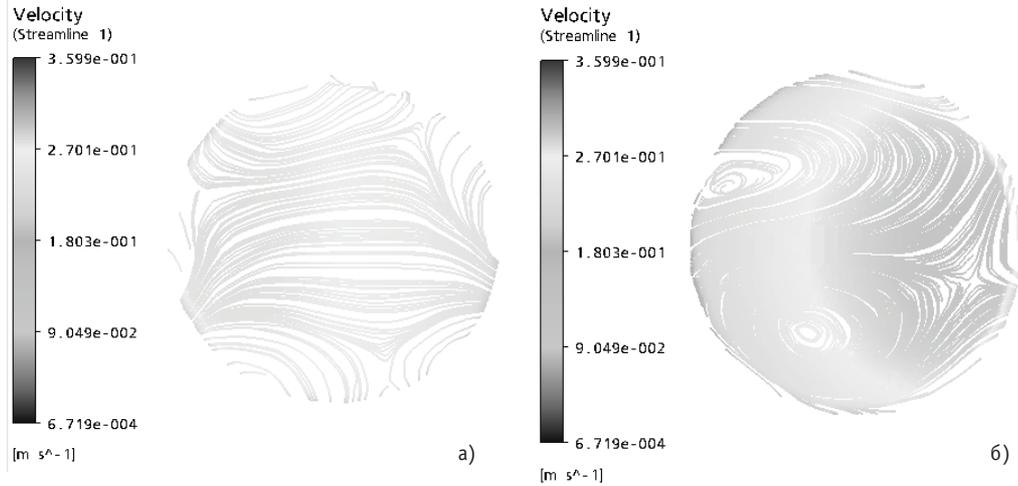


Рис. 9. Поле скоростей в середине (а) и в конце обогреваемого участка (б) $\rho_w = 1000 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$

стабилизацию потока, либо устанавливать на входе в канал устройство для гашения турбулентных пульсаций и устранения вихреобразования, например, хонейкомб.

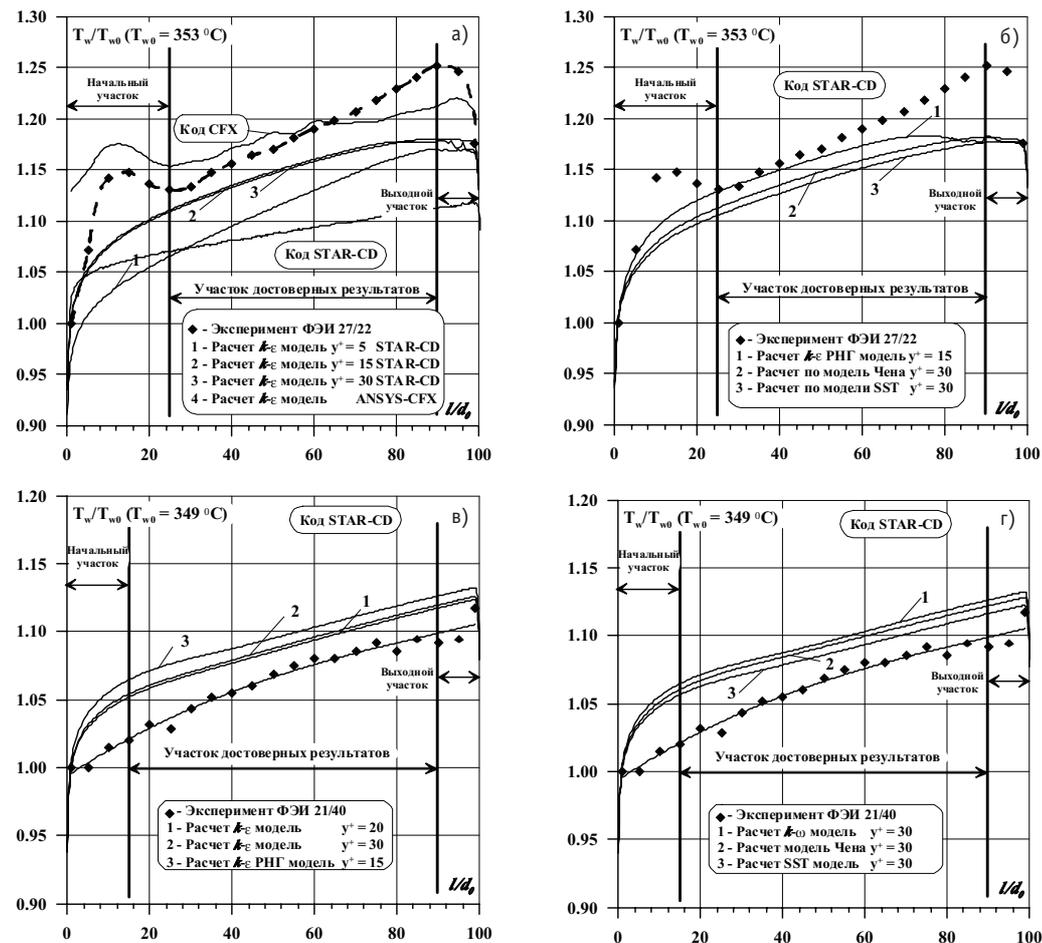


Рис. 10. Сравнение результатов расчета по коду STAR-CD с данными опытов

Еще более радикальным является способ со сглаживанием условий входа и выхода из ЭУ. Однако последнее не представляется возможным, поскольку в этом случае технически очень сложно организовать токоподвод к ЭУ.

На рисунке 10 представлено сравнение данных расчета по коду STAR-CD [8] с опытными данными ГНЦ РФ-ФЭИ. При проведении расчетов использовались модели турбулентности, которые реализованы в этой программе, со стандартным набором констант.

При проведении расчетов делалась попытка изменения динамической координаты y^+ . В целом можно отметить удовлетворительное согласие данных расчета и эксперимента. Анализ зависимостей на рис. 10 показывает, что во всех случаях наблюдается завышение расчетного значения температуры по сравнению с опытом. Последнее, видимо, можно объяснить отличием механизма генерации (диссипации) кинетической энергии турбулентности при СКП от такого же механизма при течении «классического» теплоносителя.

Результаты расчета области ухудшенного теплообмена кодом STAR-CD приведены на рис. 11. Хорошо видно, что код STAR-CD даже «не схватывает» повышение температуры.

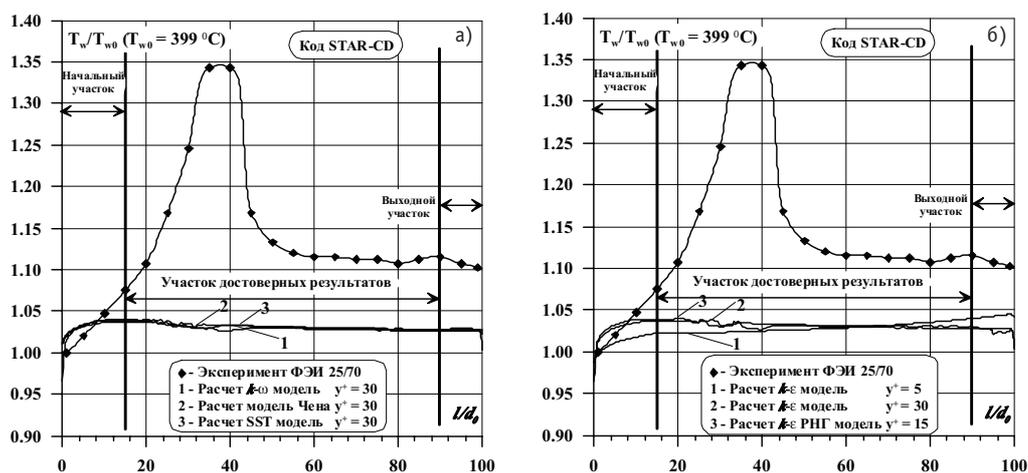


Рис. 11. Сравнение данных расчета и эксперимента в области ухудшенного теплообмена

Этот эффект можно объяснить несколькими причинами, в основном, вычислительного характера, наиболее вероятная из которых – некорректность в определении теплофизических свойств флюида, обусловленная потерей точности расчета (см. обсуждение выше).

М-ОБРАЗНЫЙ ПРОФИЛЬ. ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ

Отличительной чертой течений со сверхкритическими параметрами является формирование М-образного профиля скорости. Перестройка профиля из «классического» логарифмического в М-образный происходит за счет разницы плотностей в пристеночной области и центре потока. Максимум скорости смещается в пристеночную область, где $\partial U/\partial x = 0$, и, следовательно, касательное напряжение равно нулю. Образование М-образного профиля приводит к эффекту образования динамического «запирающего слоя», препятствующего переносу тепла и импульса, за счет уменьшения турбулентного перемешивания и величин пульсаций скорости и температуры. Именно эти обстоятельства и приводят к ухудшению теплообмена.

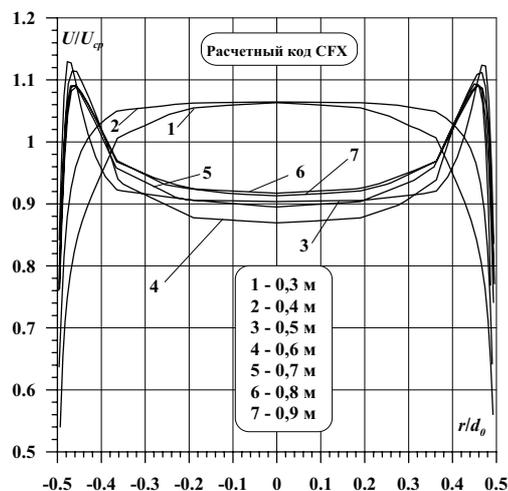


Рис. 12. Профиль скорости в различных сечениях обогреваемой трубы

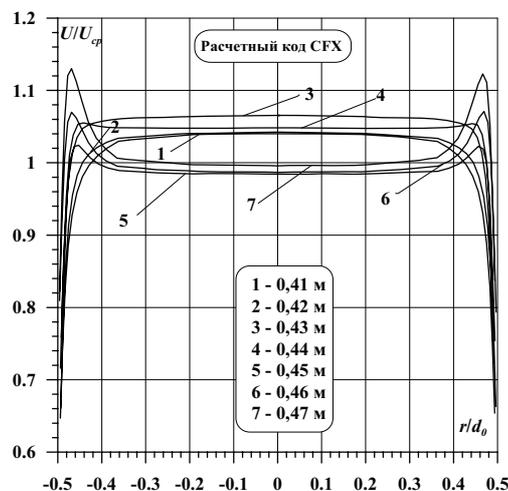


Рис. 13. Формирование М-образного профиля скорости

На рисунке 12 приведены результаты расчета всего ЭУ кодом ANSYS-CFX. Из рисунка видно, что формирование М-образного профиля происходит на длине » 10 см (на участке от 0,4 до 0,5 м от входа в ЭУ). На рисунке 13 показан участок, где по данным расчета начинается формирование М-образного профиля.

Из рисунка видно, что в начале перестройки профиль скорости становится более «наполненным», а затем происходит локальное ускорение потока в пристенной области. При этом точка максимума скорости смещается в пристенную область, приближая «запирающий слой» к стенке. Последнее в свою очередь приводит к увеличению локальной температуры стенки канала.

Работа поддержана грантом «02.740.11.0185 по ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России».

Литература

1. Cheng X, Kuang B, Yang Y.H. Numerical analysis of heat transfer in supercritical water cooled flow channel//Nuclear Engineering and Design. – 2007. – 237. – P. 240-252.
2. Cheng X., Laurien E., Yang Y.H. CFD Analysis of Heat Transfer in Supercritical Water in Different Flow Channels. Proceedings of GLOBAL 2005 (Tsukuba, Japan, Oct., 2005). – Paper № 369.
3. Misawa T, Nakatsuka T, Yoshida H, Takase K. Numerical Analysis of Heat Transfer Experiment of Supercritical Pressure Water and Freon in a Rod bundle/16th Pacific Basin Nuclear Conference (16PBNC) (Aomori, Japan, Oct. 13-18, 2008). – Paper ID P16P1065.
4. Misawa N., Yoshida H., Tamai H., Takase K. Numerical analysis of heat transfer test of supercritical water in a tube using the three-dimensional two-fluid model code/Proceedings of the 16th International Conference on Nuclear Engineering. ICONE16-48690, May 11-15, 2008, Orlando, Florida, USA.
5. Кириллов П.Л., Пометько Р.С., Смирнов А.М., Грабежная В.Л. Исследование теплообмена при сверхкритических давлениях воды в трубах и пучках стержней/Препринт ФЭИ-3051. – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2005. – 52 с.
6. Кириллов П.Л., Ложкин В.В., Смирнов А.М. Исследование границ ухудшенных режимов канала при сверхкритических давлениях/Препринт ФЭИ-2988. – Обнинск, 2003.
7. Ansys CFX: <http://www.ansys.com/> (дата обращения: 28.05.2011).
8. STAR-CD <http://www.cd-adapco.com/products/STAR-CD/index.html> (дата обращения: 28.05.2011).

Поступила в редакцию 17.06.2011

in the containment model; steam-water mixture pressure of atmospheric pressure 650 кPa; and heat flux density of 322 KW/m². Given are comparative analysis results for obtained experimental and calculated heat transfer values; closing correlations are proposed.

УДК 532.526.4: 621.039.534

Investigation of Supercritical Parameters Water Flow Problem by the ANSYS-CFX and Star-CD Codes \I.A. Chusov, A.S. Shelegov, V.I. Slobodchuk, V. Ukraintsev, A.N. Yarkin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 8 pages, 1 table, 13 illustrations. – References, 8 titles.

Results of analysis of evaluations made by codes ANSYS-CFX and STAR-CD for water flow with supercritical parameters with experimental data of the State Research Center «Institute of Physics and Power Engineering» are presented. Evaluations were carried out with the use of five model of turbulence. It is shown that calculation results are in satisfactory accordance with experimental data. The problem of forming the M-type profile of velocity is considered separately.

УДК 621.039.54

Increase of Burn-up and Proliferation Protection of Light Water Reactors Fuel at Combined Introduction of ²³¹Pa and ²³⁷Np into its Composition \G.G. Kulikov, E.G. Kulikov, E.F. Kryuchkov, A.N. Shmelev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 13 pages, 12 illustrations. – References, 13 titles.

It is founded the use of nuclides ²³¹Pa and ²³⁷Np in fuel composition of light water reactors as burnable absorbers, which allow us to reduce initial reactivity excess, increase essentially fuel lifetime and reach ultra high fuel burn-up as well strengthen proliferation protection of fuel.

Introduce of ²³⁷Np into fuel composition would allow decreasing requirements of ²³¹Pa content which is difficult of access in considerable amounts. While ²³⁷Np is in spent fuel of nuclear power plants and at present time is not used and is a problem in respect to its storage and processing. So it is expedient to review ways of its involving into nuclear fuel cycle.

УДК 621.039.543.4

Introduction of Reprocessed Uranium into Fuel Composition of Light-Water Reactors as a Protective Measure Against Proliferation \A.Yu. Smirnov, V.A. Apse, V.D. Borisevich, G.A. Sulaberidze, A.N. Shmelev, A.A. Dudnikov, E.A. Ivanov, V.A. Nevinitza, N.N. Ponomarev-Stepnoi; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 11 pages, 2 tables, 3 illustrations. – References, 15 titles.

The paper presents a physical principle for development of advanced LWR fuel with inherent resistance to unauthorized usage and proliferation of uranium-based nuclear materials. Key point of the principle consists in the use of reprocessed uranium extracted from spent fuel in fabrication of fresh fuel assemblies for export deliveries. Introduction of reprocessed uranium into fresh uranium fuel compositions can complicate substantially any diversions of nuclear materials from fuel assemblies thanks to the presence of uranium isotope ²³²U in reprocessed uranium. Any attempts of uranium re-enrichment up to the weapon-grade level will fail because of rapid increase of ²³²U content and its high-energy gamma-radiation. This technical measure, in combination with restricted accessibility of isotope separation technologies concentrated in the International nuclear technology centers and unification of requirements to dose rates of ionizing radiation from fresh fuel assemblies, can reduce significantly the proliferation risk related to export deliveries of low-enriched uranium fuel.

УДК 621.039.52.034.3

Studies of Electromagnetic Suspension of Turbomachine's Rotor for Nuclear Power Plant with High Temperature Reactor and Gas-Turbine Cycle \N.G. Kodochigov, S.M. Dmitriev, I.V. Drumov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 9 pages, 1 table, 6 illustrations. – References, 14 titles.

Prospects of applying of a direct gas-turbine cycle for nuclear power plants with high-temperature gas-cooled reactors are analyzed in this paper. Here are described the basic characteristics and requirements of a design, which provide a high level к.п.д of such type of reactors with direct gas-turbine cycle and its advantage in comparison with similar designs with steam-turbine installations. Data about development of the technology in the countries, which design and maintain high-temperature gas-cooled reactors, are cited.