

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТУРБУЛЕНТНОГО ОБМЕНА ПРИ РАСЧЕТЕ ПОЛЕЙ СКОРОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ В МОДЕЛЬНОЙ СБОРКЕ РЕАКТОРА БРЕСТ-ОД-300

Е.Ф. Авдеев, И.А. Чусов, А.А. Карпенко

*Обнинский государственный технический университет атомной энергетики,
г. Обнинск*



В работе приводится описание новой методики расчета полей скорости и температуры теплоносителя в реакторе корпусного типа с бесчехловыми ТВС. Методика применена к расчету полей скорости и температуры теплоносителя в модельной сборке реактора БРЕСТ-ОД-300. На основе струйной модели определены коэффициенты турбулентного обмена, найденные на основе сопоставления экспериментальных данных и результатов расчета в преобразованных координатах. Приводятся результаты численного расчета полей скорости и температуры теплоносителя в различных сечениях по высоте модельной сборки.

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы безопасной эксплуатации действующих и перспективных реакторных установок требуют детального анализа особенностей течения теплоносителя в активной зоне. В связи с этим возникает задача разработки методики расчета, которая бы позволяла, с одной стороны, физически адекватно описывать теплогидравлические процессы течения теплоносителя в активной зоне, а с другой – корректно определять коэффициент турбулентной «вязкости» и турбулентного аналога числа Прандтля. Предлагаемая методика позволяет с достаточной степенью достоверности проводить численные расчеты реакторных установок корпусного типа с бесчехловыми ТВС, к которым, в частности, относится реакторная установка БРЕСТ-ОД-300.

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕЧЕНИЯ

Физическая модель течения теплоносителя в активной зоне реактора корпусного типа с бесчехловыми ТВС основана на представлении течения теплоносителя в виде системы коаксиальных квазисвободных турбулентных струй. В рамках такого подхода течение теплоносителя в активной зоне можно рассматривать как набор кольцевых зон, каждая из которых заполнена бесчехловыми ТВС с одинаковым тепловыделением и одинаковым на входе в них расходом теплоносителя.

Основная особенность предложенной струйной модели обусловлена наличием в потоке вертикальных стержней (твэл), заполняющих каждую кольцевую зону.

© **Е.Ф. Авдеев, И.А. Чусов, А.А. Карпенко, 2004**

С одной стороны, стержни искажают характер поперечного турбулентного переноса, присущий свободной турбулентности, с другой – являются причиной потерь энергии на трение.

В связи с этим, в динамическом уравнении предлагается слагаемое, отражающее поперечный турбулентный перенос и трение разделить на две составляющие: сохранить в обычной форме слагаемое, отражающее турбулентный перенос в условиях квазисвободного смещения и дополнить его слагаемым потерь давления на трение на элементарной длине. При этом для коэффициента сопротивления трения можно использовать известные его выражения при продольном обтекании пучков стержней. Так как течение теплоносителя неизотермическое, в объемную силу, кроме силы тяжести, необходимо включить архимедову силу «плавучести».

Поскольку неизотермичность обусловлена тепловыделением твэлов, уравнение энергии будет включать слагаемое, отражающее наличие внутренних источников тепла.

Рассматривалось течение теплоносителя в неоднородной модельной сборке реактора БРЕСТ-ОД-300, описание которой приведено в [1, 2].

Модельная сборка имитаторов твэл реактора БРЕСТ-ОД-300, изготовленная в ГНЦ РФ-ФЭИ, состоит из двух зон с разными диаметрами имитаторов твэл ($s/d = 1,46$ и $1,25$ соответственно), размещенных в четырехугольном чехле (рис. 1). Поэтому решение пространственной задачи заменено решением двух плоских задач – в плоскости 1-1 и диагональной плоскости 2-2.

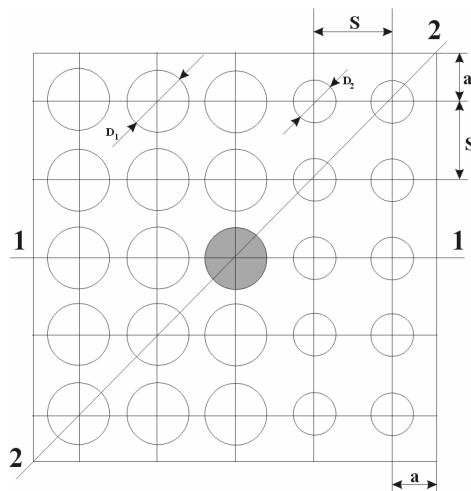


Рис. 1. Графическое изображение процедуры решения дифференциальных уравнений

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Система уравнений в приближении квазисвободного турбулентного пограничного слоя, включающая в себя уравнение неразрывности, количества движения и переноса тепла для плоского течения, имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho U) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V) = 0, \quad (1)$$

$$\rho U \frac{\partial U}{\partial x} + \rho V \frac{\partial U}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left[\rho \epsilon \frac{\partial U}{\partial y} \right] - \rho g + \rho g \beta \Delta T - \frac{\lambda \rho U^2}{2d_r}, \quad (2)$$

$$\rho U \frac{\partial T}{\partial x} + \rho V \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\rho \varepsilon}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{q_v}{c_p}. \quad (3)$$

Граничные условия задаются равенством нулю скорости теплоносителя на стенках сборки, а также равенством температуры теплоносителя на стенке сборки и температуры самой стенки (граничное условие первого рода). На входе в сборку задается «ступенчатое» распределение скорости между твэлами и равномерное распределение температуры теплоносителя.

Выражение для коэффициента турбулентного обмена согласно [3] принимается в виде:

$$\rho \varepsilon = \rho \frac{\gamma^2}{n} d_\Gamma (U_{\max} - U_{\min}),$$

где U_{\max} , U_{\min} – максимальная и минимальная скорости в ячейке, n – характеризует затесненность потока твэлами, γ – некоторая эмпирическая постоянная, отражающая характер поперечного турбулентного перемешивания.

Поскольку скорость на стенке твэла равна нулю, то выражение для коэффициента турбулентного обмена примет вид:

$$\varepsilon = \frac{\gamma^2}{n} d_\Gamma U_{\max}.$$

Если обозначить $k = \frac{\gamma^2}{n} d_\Gamma$, то

$$\varepsilon = k U_{\max}.$$

Одним из эффективных методов решения уравнений свободного турбулентного пограничного слоя является применение обобщенных независимых переменных Прандтля–Мизеса [4]. Это преобразование позволяет исключить из уравнений слагаемое с поперечной составляющей скорости, являющееся источником численной неустойчивости, и дает возможность расчетно-экспериментальным путем определить коэффициенты турбулентного обмена.

В соответствии с этим методом в качестве поперечной координаты принимается функция тока $\psi(x, y)$:

$$\rho U = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad \rho V = -\frac{\partial \psi}{\partial x},$$

а преобразованная продольная координата ξ записывается в виде:

$$\xi = \int_0^x \rho \varepsilon(x) dx.$$

Выполнив переход в уравнениях (2)–(3) к обобщенным переменным Прандтля–Мизеса, получим:

$$\frac{\partial U}{\partial \xi} = \frac{\partial}{\partial \psi} \left(\rho U \frac{\partial U}{\partial \psi} \right) - \frac{1}{\rho \varepsilon} \left(\frac{g}{U} + \frac{\lambda U}{2 d_\Gamma} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \xi} = \frac{\partial}{\partial \psi} \left(\rho U \frac{\partial T}{\partial \psi} \right) + \frac{q_v}{c_p \rho U \frac{\rho \varepsilon}{Pr_t}}. \quad (5)$$

Граничные и начальные условия для системы уравнений в преобразованных координатах, будут иметь вид:

при $\xi = 0$ $U = U_0(\psi)$, $T = T_0(\psi)$; на стенке, при $\psi = 0$ $U = 0$, $T = T_{\text{ст}}$. (6)

Сравнительная простота уравнений (4)–(5) типа теплопроводности, методик их решения и наличие хорошо отработанных алгоритмов делает применение предлагаемой методики особенно привлекательной в расчетных комплексах, действующих в режиме реального времени.

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ

Уравнения (4)–(5) с граничными условиями (6) представляют собой систему нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка. Они аппроксимировались методом конечных разностей по неявной четырехточечной схеме [5, 6]. Выбор неявной схемы обусловлен ее абсолютной устойчивостью к величине шага по маршевой координате [5] и возможностью использования для решения линейных уравнений метода прогонки.

Линеаризация конечно-разностных аналогов осуществлялась методом западывающих коэффициентов [7]. Численное решение проводилось методом раздельных прогонок [8] в два этапа. На первом этапе решалась динамическая часть задачи, а на втором – осуществлялось вычисление температуры теплоносителя по уже известному значению скорости. Решение каждого из уравнений выполнялось методом правой прогонки, для чего линеаризованные конечно-разностные аналоги уравнений движения и энергии приводились к виду:

$$A_i f_i + B_i f_{i+1} + C_i f_{i-1} = D_i,$$

где f_i – обобщенная переменная.

Построенный таким образом итерационный процесс позволяет значительно сократить вычислительные затраты. Как показала практика вычислений, применение метода раздельных прогонок позволило сократить время счета каждого шага по маршевой координате на 30%.

Точность вычислений контролировалась, во-первых, выполнением точности расчета массового расхода, а во-вторых, для каждого из уравнений вычислялась относительная ошибка, составляющая 0,1%.

ОСОБЕННОСТИ ЧИСЛЕННОЙ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА

При решении данной задачи течение теплоносителя, как уже было отмечено выше, представляется в виде системы струй, распространяющихся в межтвэльном пространстве. В связи с этим постановка граничных условий в данной задаче является нехарактерной для струйных течений, которым свойственно свободное распространение струи в пространстве, тогда как в данной задаче граничным условием является равенство нулю скорости теплоносителя при одном и том же значении поперечной координаты на стенке сборки.

Для корректности решения поставленной задачи ставится дополнительное условие – постоянство расхода теплоносителя в сечениях сборки. Это достигается введением дополнительного слагаемого в коэффициент D_i конечно-разностного аналога уравнения движения.

Алгоритм условия сохранения расхода следующий: на всех шагах по маршевой координате вычисляется расход и сравнивается с расходом, вычисленным на первом шаге, эта разность подставляется в виде множителя во введенное нами дополнительное слагаемое в коэффициент D_i . Это слагаемое посредством процедуры решения уравнений с трехдиагональной матрицей производит коррекцию поля скоростей.

Математически добавка к коэффициенту D_i записывается следующим образом:

$$\frac{\Delta p}{\rho U_i^{j-1} \Delta \xi}.$$

Таким образом, корректируя величину продольного перепада давления Δp , уточнялось поле скоростей.

Вследствие этого, на каждом шаге по маршевой координате получены расходы, отличающиеся от расхода на первом шаге не более чем на 3%, что находится в пределах допустимой погрешности.

ПОЛУЧЕНИЕ КОНСТАНТЫ ДЛЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕПЛООБМЕНА

Определение коэффициента турбулентного обмена проводилось для значений поперечной координаты, соответствующих местам экспериментальных замеров температур в ячейках, изображенных на рис. 2.

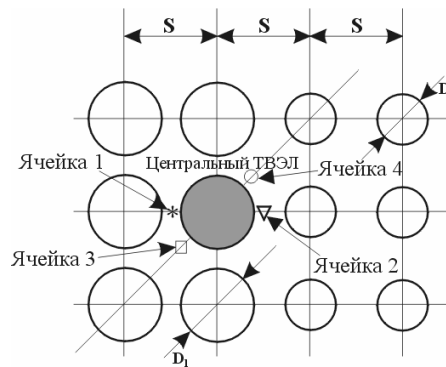


Рис. 2. Расположение ячеек, в которых измерялись среднесмешанные температуры

На первом этапе, из решения уравнения энергии в преобразованных переменных находилось продольное распределение температуры. На втором этапе, из условия совпадения данных эксперимента в физических координатах и расчетных величин в преобразованной плоскости, строилась расчетно-экспериментальная зависимость, связывающая преобразованную и физическую продольные координаты. Из графика находилось начальное приближенное значение коэффициента турбулентного обмена, которое затем подставлялось в программу. На третьем этапе, строилось распределение коэффициента k по высоте модельной сборки.

Расчеты проводились для расходов, соответствующих показаниям расходомера $E = 4,5$ мВ для семи значений относительной мощности твэлов $N_{15}/N_{10} = 1.0/2.0, 1.35/2.0, 1.65/2.0, 2.0/1.0, 2.0/1.35, 2.0/1.65, 2.0/2.0$ и при $E = 10,1$ мВ для двух значений $N_{15}/N_{10} = 1.0/2.0; 2.0/1.0$. В данной работе из-за большого количества материала, приводятся данные только для случая отношения энерговыделений имитаторов твэл $N_{15}/N_{10} = 2.0/2.0$ при $E = 4,5$ мВ (для остальных режимов при соответствующих расходах зависимости имеют аналогичный вид).

Поскольку коэффициент k изменяется только на начальном участке (рис. 3, 4), а далее по высоте сборки остается практически постоянным, его значение принимается равным этому постоянному значению.

Среднее значение коэффициента турбулентного обмена получено:

- в плоскости 1-1 $\varepsilon = 3,62 \cdot 10^{-4}$ м²/с;
- в плоскости 2-2 $\varepsilon = 5,5 \cdot 10^{-4}$ м²/с.

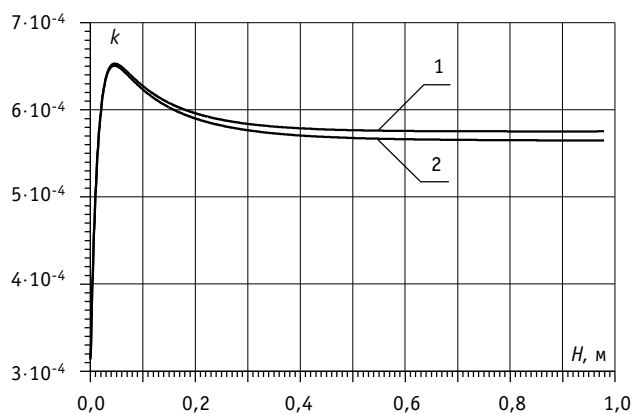


Рис. 3. Распределение величины k по высоте модельной ТВС (ячейка 1, ячейка 2) при $N_{15}/N_{10} = 2.0/2.0$, $E = 4,5$ мВ

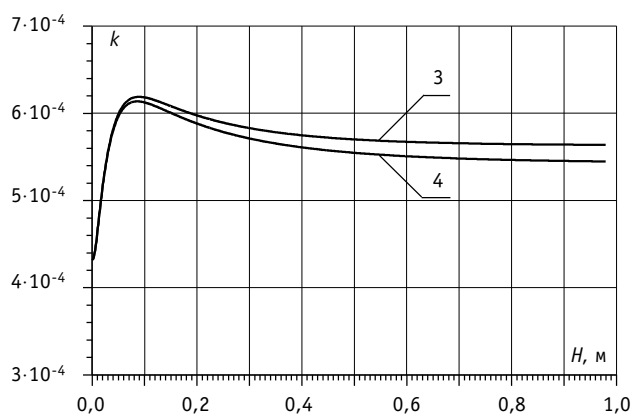


Рис. 4. Распределение величины k по высоте модельной ТВС (ячейка 3, ячейка 4) при $N_{15}/N_{10} = 2.0/2.0$, $E = 4,5$ мВ

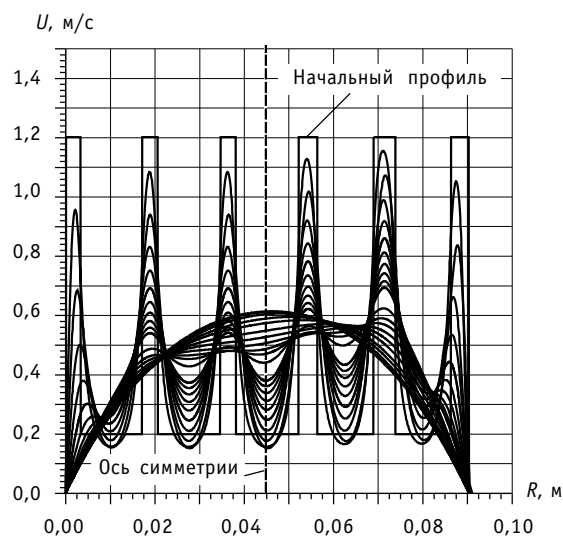


Рис. 5. Распределение скоростей теплоносителя в сечениях по высоте сборки при $N_{15}/N_{10}=2.0/2.0$, $E=4,5$ мВ (плоскость 1-1)

Среднее значение коэффициента турбулентного теплообмена между имитаторами твэл можно принять $\varepsilon = 4,56 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$.

Далее осуществлялся переход к физическим переменным (x, y) согласно зависимостям:

$$x = \int_0^{\xi} \frac{1}{\rho \varepsilon(x)} d\xi, \quad y = \int_0^{\psi} \frac{1}{\rho U} d\psi.$$

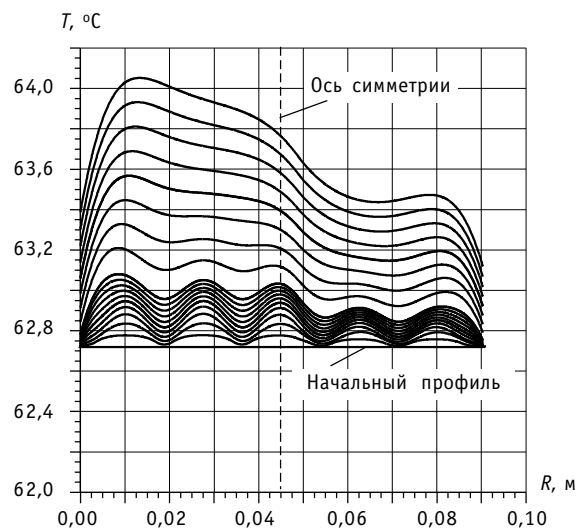


Рис. 6. Распределение температуры теплоносителя в сечениях по высоте сборки на начальном участке при $N_{15}/N_{10} = 2.0/2.0$, $E = 4,5 \text{ мВ}$ (плоскость 1-1)

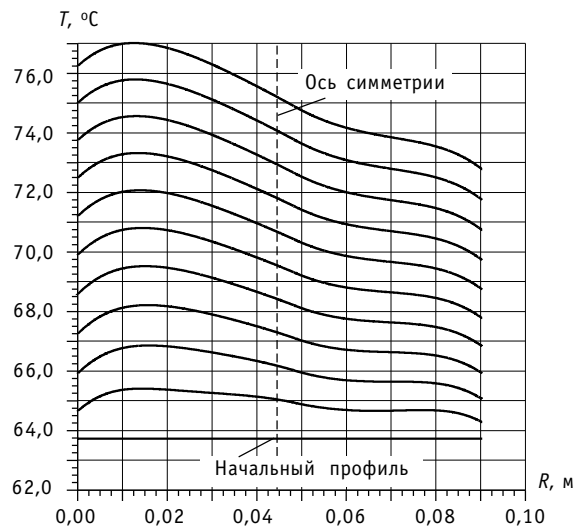


Рис. 7. Поперечное распределение температуры теплоносителя при $N_{15}/N_{10} = 2.0/2.0$, $E = 4,5 \text{ мВ}$ (плоскость 1-1)

РЕЗУЛЬТАТЫ ВАРИАНТНЫХ РАСЧЕТОВ

Для семи значений относительной мощности твэлов $N_{15}/N_{10} = 1.0/2.0, 1.35/2.0, 1.65/2.0, 2.0/1.0, 2.0/1.35, 2.0/1.65, 2.0/2.0$ при показаниях расходомера $E = 4,5$ мВ и для двух значений $N_{15}/N_{10} = 1.0/2.0; 2.0/1.0$ при $E = 10,1$ мВ проводились варианты расчеты при найденных значениях коэффициента турбулентного обмена, в результате которых получены поперечные распределения скоростей и температур теплоносителя. Графики для них строились при значениях продольной координаты $x = 0,097, 0,196, 0,294, 0,392, 0,49, 0,588, 0,686, 0,784, 0,882, 0,98$ м (рис. 7–9) и для ячеек, соответствующих местам замеров температуры (рис. 2),

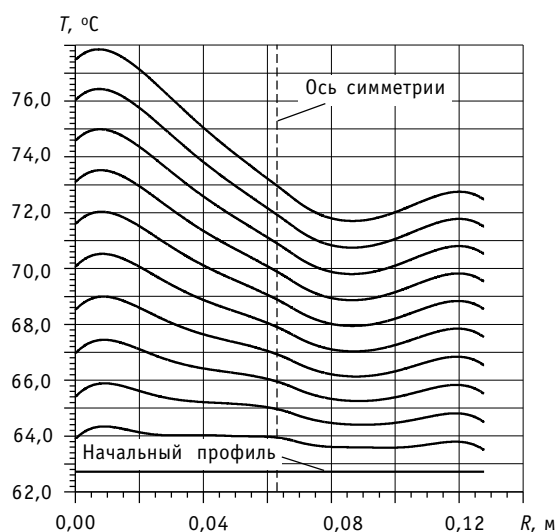


Рис. 8. Поперечное распределение температуры теплоносителя при $N_{15}/N_{10} = 2.0/2.0, E = 4,5$ мВ (плоскость 2-2)

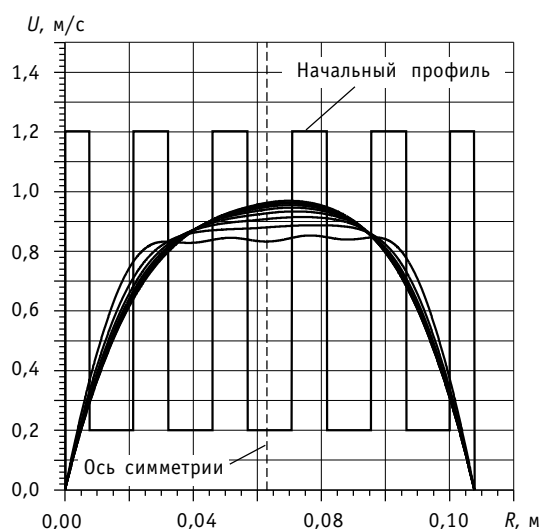


Рис. 9. Поперечное распределение скорости теплоносителя при $N_{15}/N_{10} = 2.0/2.0, E = 4,5$ мВ (плоскость 2-2)

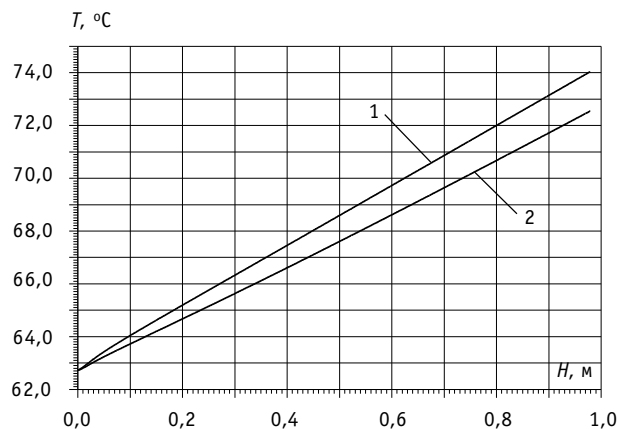


Рис. 10. Изменение температуры теплоносителя по высоте модельной ТВС (ячейка 1, ячейка 2) при $N_{15}/N_{10} = 2,0/2,0$, $E = 4,5$ мВ

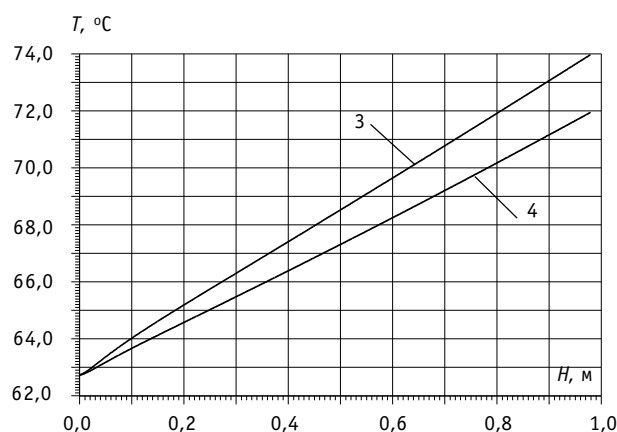


Рис. 11. Изменение температуры теплоносителя по высоте модельной ТВС (ячейка 3, ячейка 4) при $N_{15}/N_{10} = 2,0/2,0$, $E = 4,5$ мВ

строились графики распределения расчетной температуры теплоносителя по высоте сборки (рис. 10, 11).

Отличительной особенностью проведенных вариантных расчетов является невозможность задания начальной скорости потока равной нулю в расчетных точках, относящихся к зонам расположения твэл (как это следует из физических соображений). Это обстоятельство обусловлено причинами только вычислительного характера – невозможностью численного разрешения столь большого градиента скорости. По этой причине скорость на входе в местах расположения твэл задавалась 0,2 м/с. Предполагалось, что это обстоятельство практически не влияет на точность проведенных расчетов.

Характер изменения скорости теплоносителя в разных сечениях по высоте модельной сборки показан на рис. 5. Отчетливо виден интегральный характер «размывания» начального профиля скорости. Распределение температуры теплоносителя в различных сечениях по высоте на начальном участке изображено на рис. 6.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предлагается новая физическая модель течения теплоносителя в реакторах корпусного типа с бесчехловыми ТВС.
2. Принятой физической модели поставлена в соответствие математическая модель, представленная законами сохранения, записанными в приближении квазисвободного турбулентного пограничного слоя.
3. Обосновано новое выражение для коэффициента турбулентного обмена, учитывающего затесненность потока твэлами.
4. Расчетно-экспериментальным путем определены константы турбулентного теплообмена в модельной сборке реактора БРЕСТ-ОД-300.
5. Показана возможность применения обобщенных переменных Прандтля – Мизеса к расчету полей скорости и температуры теплоносителя в активной зоне реакторов с бесчехловыми ТВС.

Авторы выражают благодарность начальнику лаборатории № 22 ГНЦ РФ–ФЭИ проф., д.т.н. А.П. Сорокину и проф., д.т.н. А.В. Жукову за предоставленные экспериментальные данные.

Литература

1. Кузина Ю.А., Жуков А.В., Сорокин А.П., Филин А.И., Смирнов В.П., Леонов В.Н., Сила-Новицкий А.Г. Теплообмен и температурные поля в активной зоне реактора БРЕСТ-ОД-300 на быстрых нейтронах со свинцовым охлаждением // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2002. – № 4. – С. 91-99.
2. Кузина Ю.А., Жуков А.В., Сорокин А.П., Леонов В.Н., Сила-Новицкий А.Г., Смирнов В.П. Результаты измерений полей скоростей теплоносителя электромагнитным методом в модельных сборках реактора БРЕСТ-ОД-300 // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2002. – № 1. – С. 77-87.
3. Авдеев Е.Ф., Чусов И.А. Интегральный подход к расчету гидродинамики и температурных полей теплоносителя в реакторах корпусного типа с бесчехловыми ТВС: Доклады 2 РНКТ. – М., 1998. – Т. 5. – С. 139-142.
4. Авдеев Е.Ф. Применение теории пограничного слоя для расчета турбулентного смешения системы струй в коллекторе за головками ТВС гетерогенного реактора // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Ядерная техника и технология. – 1989. – Вып. 5. – С. 96-101.
5. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. – М.: Мир, 1980. – 612с.
6. Ши Д. Численные методы в задачах теплообмена. – М.: Мир, 1988. – 544с.
7. Андерсон Д., Танненхил Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен. – М.: Мир, 1990. – 728с.
8. Самарский А.А., Попов Ю.П. Разностные схемы газовой динамики. – М.: Наука, 1975.

Поступила в редакцию 20.04.2004

УДК 621.039.586

The Code ANPEX Abstract / M.V. Kascheev, I.A. Kuznetsov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2004. – 5 pages.

Short information is given on the calculation of FBR's power excursion by prompt neutrons. The code is characterized by vast application possibilities and can account for various initial reactor states.

УДК 621.039.524

Research of Emergency Situations with Small Leaks of the First Circuit of Reactor VVER-1000 / A.N. Shkarovskii, V.I. Aksenov, N.P. Serdun; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2004. – 6 pages, 4 illustrations. – References, 5 titles.

Calculating research of accidents with small leaks in the first circuit of reactor WWER-1000 during reactor's work in rated power and in situation of «hot shutdown» is developed. It is shown that in all investigate modes of operation emergency protection and safety systems provide reactor cooldown and subcritical condition, reactor is transferred in safe shutdown condition.

УДК 621.039.56

Fuel Cycles with High Fuel Burn-Up: Analysis of Reactivity Coefficients / E.F. Kryuchkov, A.N. Shmelev, M.Yu. Ternovyykh, G.V. Tikhomirov, Li Jinhong, M. Saito; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2004. – 9 pages, 5 tables, 11 illustrations. – References, 7 titles.

Fuel cycles of light-water reactors (LWR) with high fuel burn-up (above 100 MWd/kg), as a rule, involve large amounts of fissionable materials. It leads to forming the neutron spectrum harder than that in traditional LWR. Change of neutron spectrum and significant amount of non-traditional isotopes (for example, ^{237}Np , ^{238}Pu , ^{231}Pa , ^{232}U) in such fuel compositions can alter substantially reactivity coefficients as compared with traditional uranium-based fuel. The present work addresses the fuel cycles with high fuel burn-up which are based on Th-Pa-U and U-Np-Pu fuel compositions. Numerical analyses are carried out to determine effective neutron multiplication factor and void reactivity coefficient for different values of fuel burn-up and different lattice parameters. The algorithm is proposed for analysis of isotopes contribution to these coefficients. Various ways are considered to upgrade safety of nuclear fuel cycles with high fuel burn-up.

УДК 621.039.534: 533.6.011.3

Integral Jet Computation Model of Thermalhydraulic Parameters of a Coolant Flow in Bundles of a Vessel Type Reactors' Core / E.F. Avdeev, I.A. Chusov, A.A. Karpenko; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2004. – 11 pages, 9 illustrations. – References, 8 titles.

The model of a coolant flow in bundles of a water energy reactor. The model represents a flow in the reactor as a system of coaxial quasi-free turbulent jets is considered. To solve this problem the generalized conversion of Prandtl-Mises was used. This paper presents the possibility of getting a confident analytic solution. Moreover, some results of numerical computations of velocity and temperature fields throughout height of the reactor core allowing for blocking some bundles are given.

УДК 621.039.534: 533.6.011.3

Turbulent Exchange Coefficient Determination at Velocity and Temperature Fields Computation of Coolant in Reactor BREST-OD-300 Model Assembly / E.F. Avdeev, I.A. Chusov, A.A. Karpenko; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2004. – 10 pages, 11 illustrations. – References, 8 titles.

The paper describes a new method of velocity and temperature fields computation of a coolant in the bundles of a vessel type reactor. The method is used for computation of velocity and temperature fields of a coolant in the BREST-OD-300 model assembly. This paper treats the coefficient of turbulent exchange obtained on the base of jet model. The coefficients proposed were founded by comparing experimental data with the results of computation in converted coordinates. Some results of numeri-

cal computation of velocity and temperature fields of a coolant in the different cross sections throughout a model assembly height are presented.

УДК 621.039.51

The Study of the Mode of the Surface Boiling in Transport Active Zone \ V.I. Korolev, I.I. Loshchakov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2004. – 8 pages, 3 illustrations. – References, 5 titles.

The heat transfer in the active zone of transport reactor of the atomic icebreaker was investigated. The functions of the temperature change of the bare fuel shell depending on the heat power of the reactor were obtained at the time of performing maneuver by power of the ship energy installation.

УДК 532.58

Vibrations of Hydrodynamically Coupled Systems/ V.S.Fedotovskiy, T.N.Verestchagina; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2004. – 9 pages, 7 illustrations. – References, 7 titles.

One-dimension vibrations of a body with hole filled by liquid and another body are considered as an example of hydrodynamically coupled systems. Correlations of added mass matrix elements are obtained. The analysis of natural frequencies and forced amplitudes is developed. The parameters of system when the unlimited resonant oscillations are occurring in spite of liquid viscous are obtained. The experimental data of “tube in tube” hydrodynamically coupled vibrations are presented.

УДК 621.039.53: 621.311.25

Investigation of Single-Circuit NPP Turbomachine Rotor Stability. On the Possibility of Quadratic Nonlinearity Substitution by Cubic One for the System of Electromagnetic Rotor Suspension \ V.S. Vostokov, A.V. Khodykin; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2004. – 4 pages. – References, 7 titles.

Asymptotic stability of electromagnetic suspension non-linear system without bias currents is proven by Lyapunov method. The admissibility of quadratic non-linearity substitution by cubic one is proven from the point of view of zero equilibrium state stability.

УДК 621.039: 621.311.25

The Cooperations of “ROSENERGOATOM” and Ural State Technical University in the Area of Personnel Training for Servicing and Equipment Maintenance with Reference to Nuclear Power Plants \ S.E. Sheklein, O.L. Tashlikov, V.I. Velkin, A.G. Shastin, V.N. Dementev, N.I. Markelov, Yu. I. Sorokin; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2004. – 9 pages, 6 illustrations. – References, 4 titles.

Analyses of repairing downtime durations for different types of nuclear power plant's (NPP) power units as well as the forecasting of maintenance personnel up to year 2010 is carried out. The necessity of capacity factor growth due to reducing of the repairing downtime by means of repairing period's optimization and elimination of the off-scheduled stopping associated with low quality repairs is shown. The classification of NPP personnel violations, the ways to illuminate such violations including improvements in training of the personnel for servicing and equipment maintenance (SEM) at the institutions of higher education are considered. The experience in organization of the training of personnel for SEM in Ural State Technical University and the role of the training complex at “Nuclear power” sub-faculty in improving the training of personnel with higher education are considered.

УДК 621.039.534: 536.4

The Temperature Effect upon the Oxide Layer Growth Rate which Forms during Oxidation in the Eutectic Pb-Bi Alloy Stream \ Yu. V. Shumov, I.N. Gorelov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2004. – 11 pages, 2 tables, 2 illustrations. – References, 8 titles.

The results of X-ray examination of the model tube surface, made of the 16C12Cr2MoWSiNbVB ferritic-martensitic steel, after model lengthy testing in the stream of eutectic Pb-Bi alloy with temperature drop in from 300°C to 600°C on the length of 600 mm, are presented. Before testing the model tube did not have oxide film on the surface. X-ray researches were carried out in the surface