

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА МАКСИМАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ БЫСТРОГО РЕАКТОРА, ОХЛАЖДАЕМОГО ВОДОЙ СВЕРХКРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

К.В. Карташов, Г.П. Богословская

ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск



Представлена программа МИФ-СКД поканального теплогидравлического расчета тепловыделяющей сборки активной зоны реактора на воде сверхкритических параметров. Результаты расчета по программе верифицированы в экспериментах по течению воды сверхкритических параметров в круглой трубе и фреона-12 сверхкритических параметров в 7-стержневой сборке.

Разработана процедура статистической оценки влияния случайных отклонений параметров активной зоны на температуру оболочек твэлов в активной зоне реактора с водой сверхкритических параметров. Проведены расчеты факторов перегрева оболочек твэлов по методу Монте-Карло.

Ключевые слова: вода сверхкритических параметров, быстрый реактор, теплогидравлический расчет, поканальный метод, температура оболочек твэлов, факторы перегрева, статистические неопределенности, метод Монте-Карло.

Key words: supercritical water, fast reactor, prediction of thermohydraulics, subchannel method, fuel-element cladding temperature, hot spot factors, statistical uncertainty, Monte-Carlo method.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема повышения экономических и экологических показателей водоохлаждаемых реакторов может быть решена путем увеличения давления в контуре.

В настоящее время на основании многолетнего опыта тепловой энергетики и ряда проектов АЭС проводятся оценки физических и теплогидравлических характеристик реактора на быстрых нейтронах, охлаждаемого водой сверхкритических параметров (СКП).

При давлении выше критического отсутствует фазовый переход жидкость-пар. Тепло отводится, в основном, в области псевдокритической температуры, которая определяется как соответствующая максимуму теплоемкости. Для сверхкритического давления в 25 МПа эта температура равна ~ 385°C. При СКП отсутствует такое явление, как критический тепловой поток, который в ВВЭР (PWR, BWR) может привести к пережогу твэлов.

Повышение начальных параметров теплоносителя влечет за собой более жесткие требования к конструкции и материалам. Одной из задач, решение которой необходимо в первую очередь, является корректная оценка максимальной температуры оболочек твэлов, чтобы не допустить превышения эксплуатационных значений. Оценку максимальной температуры оболочек твэлов предпочтительнее проводить на базе поканального метода теплогидравлического расчета.

Максимальная температура оболочек твэлов формируется под воздействием всякого рода инженерных неопределенностей.

Причины этих неопределенностей многообразны – погрешности изготовления и сборки узлов реактора, расчетных формул, используемых экспериментально полученных зависимостей и констант, точности поддержания режимных параметров в условиях эксплуатации, обработки данных, методологические и метрологические погрешности и т.д. Методы расчета случайных отклонений параметров, влияющих на температуру оболочек твэлов, постоянно совершенствуются, в том числе и для нового типа реакторов – на воде сверхкритических параметров.

Для проведения предпроектных расчетов крайне необходимо разработать процедуру статистической оценки влияния случайных отклонений параметров активной зоны на температуру оболочек твэлов.

ПОКАНАЛЬНЫЙ МЕТОД ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСЧЕТА. ПРОГРАММА МИФ-СКД

В рамках поканального метода решается система уравнений сохранения массы, импульса и энергии, записанных для элементарных ячеек, на которые разбивается сечение ТВС. Входными данными являются геометрические параметры сборки и отдельных твэлов, распределение энерговыделения по длине и радиусу ТВС, расход теплоносителя.

Программа поканального теплогидравлического расчета, модифицированная для течения воды сверхкритических параметров в пучках стержней МИФ-СКД, позволяет рассчитать температуры теплоносителя в любом сечении по высоте в каждой ячейке ТВС и оболочки твэлов, распределение температуры чехла ТВС, учитывая при этом переменность свойств теплоносителя по длине ТВС и скорости теплоносителя, неравномерность энерговыделения по длине и в поперечном сечении ТВС, наличие дистанционирующих устройств и другие факторы.

Закритическое давление снимает некоторые проблемы теплоотвода из реактора, присущие докритическому. В частности, при закритическом давлении отсутствует область совместного существования паровой и жидкой фазы – во всем используемом интервале вода представляется одной фазой, что позволяет проводить расчеты в гомогенном приближении.

В обзоре процессов теплообмена при СКП, представленного в [1], показано, что особенности этих процессов связаны с тремя моментами:

- в околокритической области наблюдается сильное, немонотонное изменение теплофизических свойств с температурой, особенно теплоемкости, плотности, коэффициента объемного расширения и числа Прандтля;
- вследствие изменения плотности по длине канала при подогреве наблюдается ускорение потока;
- происходит развитие естественной конвекции за счет архимедовых сил в связи с разницей плотностей в различных точках сечения потока.

Анализ гидравлического сопротивления и теплообмена в пучках стержней (с проволочной навивкой и без нее) с учетом влияния переменности свойств теплоносителя позволил разработать систему замыкающих соотношений.

Так для неизотермического режима (с учетом изменения свойств по длине канала) в работе [2] рекомендована формула

$$\xi = \left[\frac{0,55}{\lg \frac{Re_x}{8}} \right]^2 \left(\frac{\rho_w}{\rho_f} \right)_x^{0,2} \left(\frac{\mu_f}{\mu_{in}} \right)_x^{0,2} \left(\frac{\rho_f}{\rho_{in}} \right)_x^{0,1} \pm 20\%. \quad (1)$$

Здесь индекс *in* указывает на то, что свойства берутся при температуре воды, *f* – при температуре пара, *w* – при температуре стенки, *x* указывает на значения параметров в сечении, отстоящем от начала пучка на расстоянии *x*.

Согласно обработке данных эксперимента, проведенного на пучке из семи стержней с витыми ребрами при $P = 24,5$ МПа [2], коэффициенты теплообмена подчиняются зависимости

$$Nu = 0,021 Re_x^{0,8} Pr_x^{0,7} \cdot \left(\frac{\rho_w}{\rho_f} \right)^{0,45} \left(\frac{\mu_f}{\mu_{in}} \right)^{0,2} \left(\frac{\rho_f}{\rho_{in}} \right)^{0,1} \left(1 + \frac{2,5}{x/d_f} \right) \quad (2)$$

(точность формулы $\pm 20\%$). Здесь Re_x – число Рейнольдса в сечении; Pr_x – число Прандтля в сечении; ρ_{in} , ρ_w и ρ_f – плотность теплоносителя на входе, на стенке твэла и в ячейке соответственно; μ_{in} и μ_f – кинематическая вязкость теплоносителя на входе и в ячейке соответственно; *x* – расстояние от входа в зону энерговыделения до расчетного сечения; d_f – гидравлический диаметр ячейки.

Программа поканального теплогидравлического расчета МИФ-СКД является модифицированной версией кода МИФ (межканальный обмен и формоизменение), разработанного ранее в ГНЦ РФ-ФЭИ для расчета полей скорости и температуры в формоизмененных ТВС с жидкометаллическим теплоносителем [3].

Программа позволяет учитывать наличие дистанционирующих устройств, деформацию чехла ТВС и твэльной решетки, локальные неравномерности геометрических размеров и энерговыделения, стохастические отклонения параметров твэлов от номинального значения и другие факторы.

Программа МИФ-СКД построена по блочному принципу, каждая подпрограмма позволяет решать отдельные подзадачи. В частности, на каждом расчетном шаге для расчета свойств теплоносителя в зависимости от температуры используется «система уравнений IAPWS-IF97 для вычисления термодинамических свойств воды и водяного пара в промышленных расчетах 1997 г.» [4].

Во входном файле задаются геометрические параметры ТВС и отдельных твэлов, расход теплоносителя через ТВС и в межкассетном зазоре, распределение энерговыделения по длине и в поперечном сечении ТВС.

В результате расчета в выходной файл записываются следующие данные:

- исходные геометрические и режимные параметры;
- рассчитанные геометрические характеристики (зазор между периферийными твэлами и чехлом у каждой грани без учета выпуклостей граней, диаметр твэлов и средний шаг твэльной решетки) на каждом высотном шаге;
- относительное энерговыделение, усредненные по сечению ТВС значения чисел Рейнольдса;
- по желанию пользователя в интересующем сечении по высоте могут быть выведены в виде картограмм твэлов или каналов
 - энерговыделение твэлов и в каналах;
 - площади сечений каналов и средний шаг решетки твэлов (относительные);
 - скорость теплоносителя (относительная);
 - параметры межканального теплообмена;

- температуры теплоносителя в каналах;
- максимальные температуры оболочек твэлов (без факторов перегрева);
- максимальные неравномерности подогрева по периметру твэла;
- относительные подогревы теплоносителя в каналах;
- максимальные относительные подогревы на каждом твэле.

Сравнительные расчеты проводились для тепловыделяющей сборки ВВЭР-СКД и SCFR, параметры которых показаны в табл. 1.

Таблица 1

Параметры тепловыделяющей сборки ВВЭР-СКД и SCFR

Параметр	ВВЭР-СКД	SCFR
Тепловая мощность, МВт	3830	3832
Электрическая мощность, МВт	1700	1698
Давление теплоносителя, МПа	25.0	25.0
КПД, %	44.3	44.3
Температура теплоносителя на входе и выходе, °С	280/530	280/523
Расход теплоносителя через реактор, т/ч	6750	6830
Материал оболочки твэла	Ni – сплав	Ni – сплав
Размер оболочки твэла, мм	Ø10.7x0.55	Ø10.2x0.55
Шаг треугольной решетки твэлов, мм	12.0	11.5
Топливо	UO ₂ +PuO ₂	UO ₂ +PuO ₂
Количество твэлов в ТВС, шт	252	163
Количество чехловых ТВС в АЗ, шт	241	270
Количество ТВС с бланкетом, шт	–	163
Размер чехла под ключ, мм	205	160
Материал чехла	Ni – сплав	Ni – сплав
Толщина чехла, мм	2.25	3.0
Размер ячейки ТВС под ключ, мм	207	162
Высота/диаметр АЗ, м	4.00/3.38	3.76/3.50
Средняя энергонапряженность АЗ, Вт/см ³	107	106
Средний линейный тепловой поток с твэла, Вт/см	158	232

ВЕРИФИКАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА

Верификация программы МИФ-СКД проводилась на результатах двух серий экспериментов: 1) при течении воды сверхкритических параметров в электрообогреваемой трубе внутренним диаметром 10 мм и длиной 1 и 4 м, установленной на стенде СКД ГНЦ РФ-ФЭИ [5, 6], 2) при течении фреона-12 сверхкритических параметров в 7-стержневой сборке с диаметром трубок 9,5 мм, шагом решетки 11,3 мм и длиной обогрева 1000 мм [7].

В работе [8] на основании обширных экспериментов, выполненных в пучках различной геометрии, была рекомендована обобщенная зависимость для расчета теплообмена в продольно обтекаемых пучках труб или стержней, охлаждаемых газами и неметаллическими невязкими жидкостями:

$$\frac{Nu_{\text{пучка}}}{Nu_{\text{тр}}} = 1 + 0,91 Re^{-0,1} Pr^{0,4} [1 - 2 \exp(-B)], \quad (3)$$

где для треугольной решетки $B = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \left(\frac{S}{d}\right)^2 - 1$.

Сравнение опытных и расчетных данных для одного режима течения воды сверхкритических параметров в соответствии с этой методикой представлено на рис.1.

Для верификации программы на опытных данных, полученных в пучке стержней при омывании фреоном сверхкритических параметров, были выбраны три группы характерных режимов: 1) температура теплоносителя на входе и выходе рабочего участка ниже псевдокритической; 2) температура теплоносителя достигает критического значения между входом и выходом рабочего участка; 3) температура теплоносителя на протяжении хода в рабочем участке больше псевдокритической. При расчете свойства фреона-12 брались с официального сайта NIST.

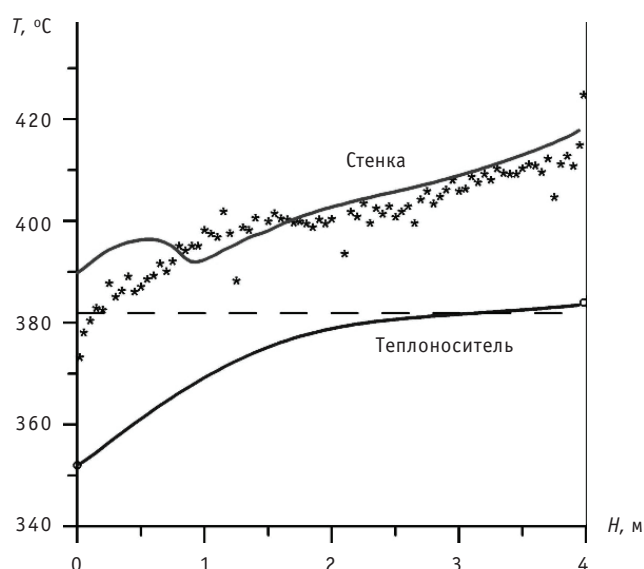


Рис. 1. Сравнение экспериментальных и расчетных распределений температуры стенки по высоте канала для следующих параметров: $P_{\text{вх}} = 24,5$ МПа; $\rho W = 506$ кг/м²с; $t_{\text{вх}} = 352^\circ\text{C}$; $q = 237,5$ кВт/м² (точки – эксперимент, сплошная линия – расчет, пунктир – псевдокритическая температура)

На рисунке 2 представлено сравнение расчетных и опытных данных для одного из режимов течения фреона в 7-стержневом пучке.

Расхождение опытных и расчетных данных на выходе связано с наличием отложений, образовавшихся в верхней части рабочего участка в ходе проведения опытов.

РАСЧЕТ МАКСИМАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБОЛОЧКИ С ФАКТОРАМИ ПЕРЕГРЕВА

Максимальная температура оболочек твэлов формируется под воздействием целого ряда инженерных неопределенностей, причинами которых являются

- погрешности изготовления и сборки узлов реактора;
- погрешности расчетных формул;
- погрешности используемых экспериментально полученных зависимостей и констант;

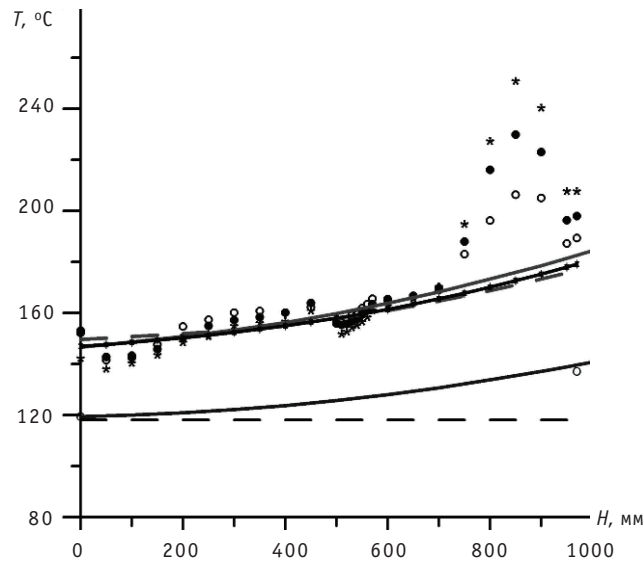


Рис. 2. Сравнение экспериментальных и расчетных распределений температуры стенки по высоте центрального стержня в пучке стержней: $P_{вх} = 4,5$ МПа; $\rho W = 515,6$ кг/м²; $t_{вх} = 119,3^\circ\text{C}$; $q = 243,51$ кВт/м² (точки – эксперимент, сплошная линия – расчет, пунктир – псевдокритическая температура)

- точность поддержания режимных параметров в условиях эксплуатации;
- методологические и метрологические погрешности;
- погрешности обработки данных и т.д.

Фактор перегрева F – это случайная величина, характеризующая максимальное относительное отклонение некоторого параметра P , определяющего температуру (температурный перепад), от его номинального значения, т.е. $F = \bar{\delta}_P / P_{ном}$.

Метод статистических испытаний (метод Монте-Карло) применяется в случае, если зависимость температуры от определяющих параметров многомерна и нелинейна, а случайные отклонения параметров значительны по величине и имеют произвольные законы распределения.

Статистический расчет ТВС заключается в следующем:

- последовательно рассчитывается ряд вариантов температурного поля ТВС с распределенными случайным образом исходными параметрами;
- результаты расчетов обрабатываются (находится математическое ожидание, дисперсии параметров и функции распределения).

Максимальное значение номинальной температуры внутренней поверхности оболочки твэла наиболее корректно рассчитывается как суперпозиция среднего значения температуры теплоносителя в окружающих каналах ($t_{вх} + \overline{\Delta t_{тн}}$); среднего по периметру оболочки температурного напора «стенка-жидкость» ($\overline{\Delta t_{\alpha}}$); половины локальной неравномерности температуры по периметру оболочки ($((t_w^{\max} - t_w^{\min})/2)$); перегрева оболочки под дистанционирующей проволокой (если таковая имеется) (Δt_p) и перепада температуры на оболочке топливного элемента ($\Delta t_{об}$):

$$t_{об} = t_{вх} + \overline{\Delta t_{тн}} + \overline{\Delta t_{\alpha}} + \frac{t_w^{\max} - t_w^{\min}}{2} + \Delta t_p + \Delta t_{об}. \quad (4)$$

В этом случае для коррелированных величин отклонение температуры, вызванное влиянием факторов перегрева, может быть определено из соотношения

$$\delta t_i = \sqrt{\delta t_{i-1}^2 + A_i \Delta t_i^2 + 2 \sum_{j=1}^{i-1} A_{i,j} \Delta t_i \Delta t_j} \quad (5)$$

Здесь δt_{i-1} – отклонение температуры, предшествующей в расчетной цепочке искомой; Δt_i – номинальное значение i -го температурного перепада; Δt_j – номинальное значение j -го температурного перепада, отклонение которого под влиянием факторов перегрева связано линейной связью с отклонением перепада Δt_i ; $A_i = \sum_m (K_m \cdot a_m \cdot F_m)^2$ – сумма квадратов произведений коэффициентов относительного рассеивания (K_m), коэффициентов a_m (a_m – показатель степени, в которую возводится m -й параметр i -го температурного перепада) и факторов перегрева, определяющих температурный перепад Δt_i (F_m); $A_{i,j} = \sum_{m_1 < m} (K_{m_1} \cdot a_{m_1} \cdot F_{m_1})^2$ – сумма квадратов произведений коэффициентов относительного рассеивания, коэффициентов a_{m_1} и факторов перегрева, воздействующих одновременно на температурные перепады Δt_i и Δt_j ($j < i$).

Основываясь на методике, предложенной для быстрых реакторов, определено относительное влияние факторов перегрева на отклонение температуры теплоносителя [9].

$$\delta t_1 = 1.2 \Delta t_1 \sqrt{F_B^2 + F_{G_{\text{роп}}}^2 + 0.143^2 \cdot F_v^2 + 0.714^2 \cdot F_{d_2}^2 + 0.571^2 \cdot F_L^2 + 0.429^2 \cdot F_{\gamma_{\text{на}}}^2 + 1.714^2 \cdot F_f^2 + F_{C_p}^2 + 0.571^2 \cdot F_{\Delta P}^2} \quad (6)$$

Оценки вклада погрешностей в температуру теплоносителя приведены в табл. 2.

Для реакторов с жидкометаллическим охлаждением наиболее сильное влияние на отклонение температуры теплоносителя (следовательно, и оболочки) сверх номинальной оказывает разброс гидравлических и физических характеристик топливной сборки и активной зоны (проходное сечение ячейки, вес топливного сердечника), вклад остальных параметров незначителен. При течении воды сверхкритических параметров особое влияние на формирование температурного поля в ТВС будут оказывать отклонения теплофизических свойств теплоносителя.

Распределение проходных сечений каналов реализуется по закону Вейбулла с использованием генератора случайных чисел на отрезке от нуля до единицы:

Таблица 2

Оценки вклада погрешностей в температуру теплоносителя

Параметры	Вклад погрешностей в подогрев теплоносителя
Физические характеристики активной зоны	0.129
Вес топливного сердечника	0.185
Наружный диаметр оболочки	0.001
Длина топливного элемента	–
Перепад давления на длине твэла	0.106
Проходное сечение ячейки	0.541
Плотность теплоносителя	0.02
Удельная теплоемкость теплоносителя	0.13
Кинематическая вязкость теплоносителя	0.02

$$\omega_i = \omega_{\min} + \omega_p^{\min} \cdot a \cdot \left(\ln \frac{1}{1-\gamma} \right)^{1/b}, \quad (7)$$

ω_{\min} – минимальное проходное сечение канала, реализующееся в данной сборке;
 ω_p^{\min} – минимально возможное расчетное проходное сечение канала; a, b – параметры распределения.

Отклонения весового содержания топлива в твэлах и свойств теплоносителя твэлов распределяются по нормальному закону.

Критерии окончания расчета (n – номер итерации):

$$\left| t_i^n - t_i^{n-1} \right| \leq 0,001 \cdot t_i^n, \quad \left| t_{\text{обол}}^{\max, n} - t_{\text{обол}}^{\max, n-1} \right| \leq 0,001 \cdot t_{\text{обол}}^{\max, n}. \quad (8)$$

Предварительные оценки, сделанные по поканальной методике теплогидравлического расчета с использованием метода Монте-Карло, показали, что превышение максимальной температуры оболочек твэлов за счет случайных распределений параметров составляет около $54,7^\circ\text{C}$, $t_{\text{обол}} \cong 620^\circ\text{C}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате модификации поканальной программы МИФ разработана новая версия МИФ-СКД, позволяющая рассчитывать теплогидравлику тепловыделяющих сборок, охлаждаемых водой при сверхкритическом давлении.

Программа учитывает особенности теплообмена и гидродинамики при сверхкритических параметрах, переменность свойств в околоскритической области, неравномерное энерговыделение по высоте активной зоны, наличие дистанционирующих устройств, возможную деформацию ТВС и другие факторы.

Программа позволяет рассчитать температуру теплоносителя в любом сечении по высоте в каждой ячейке ТВС, распределение температуры оболочки твэлов по периметру, распределение температуры чехла ТВС.

Проведены оценки максимальной температуры оболочек твэлов с учетом статистических отклонений параметров. Предварительные расчеты показали, что максимальная температура оболочек твэлов с учетом факторов перегрева не превышает допустимых значений для сталей, используемых в ТВС активных зон быстрых реакторов.

Данная работа выполнена в рамках государственного контракта от 23 апреля 2010 г. № П230 в рамках реализации федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг.», по направлению «Ядерно-энергетические установки нового поколения» в рамках мероприятия 1.3.2 «Проведение научных исследований целевыми аспирантами».

Литература

1. Грабежная В.А., Кириллов П.Л. О расчетах теплообмена в трубах и пучках стержней при течении воды сверхкритического давления: Обзор ФЭИ-0297, ЦНИАтоминформ. 2003.
2. Дядякин Б.В., Попов А.С. Теплоотдача и гидравлическое сопротивление тесного семистержневого пучка, охлаждаемого потоком воды при закритических параметрах состояния/Труды Всесоюзного теплотехнического НИИ. – 1977. – №11. – С. 244-253.
3. Жуков А.В., Сорокина А.П., Мантлик Ф. и др. Теплофизическое обоснование температурных режимов ТВС быстрых реакторов с учетом факторов перегрева. Методики и программы теплогидравлического расчета ТВС быстрых реакторов/Препринт №1817. – Обнинск: ФЭИ, 1986.
4. Александров А.А., Григорьев Б.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. Справочник. Рек. Гос. службой стандартных справочных данных. ГСССД Р-776-98. – М.: Издательство МЭИ, 1999.

5. Кириллов П.Л., Колосов А.А., Петрова Э.А., Смирнов А.М., Судницын О.А. Распределение температуры в турбулентном потоке воды при сверхкритических давлениях (круглая труба)/Препринт ФЭИ-1766. – Обнинск: ФЭИ, 1986.

6. Кириллов П.Л., Ложкин В.В., Смирнов А.М. Исследование границ ухудшенных режимов канала при сверхкритических давлениях/Препринт ФЭИ-2988. – Обнинск: ФЭИ, 2003.

7. Шелегов А.С., Лескин С.Т., Чусов И.А., Слободчук В.И. Экспериментальное исследование теплообмена в пучке из семи стержней при сверхкритических параметрах фреона-12/Препринт ИАТЭ-001-2010. – Обнинск, 2010.

8. Marcoczy G. Konvektive Wärmeübertragung in langsangestromten Stabbündeln bei turbulenter Stromung. – Wärme- und Stoffübertrag. 1972. Bd.5. №4. – p. 204-212

9. Курбатов И.М., Тихомиров Б.Б. Расчет случайных отклонений температур в активной зоне реактора/Препринт ФЭИ-1090, Обнинск, ГНЦ РФ ФЭИ, 1980.

Поступила в редакцию 25.10.2010

in the paper by example of the projects of BREST-OD-300 and SVBR-100 reactors. Key specifications of these reactors are given. Results of preliminary thermohydraulic calculation of a central fuel assembly of the BREST-OD-300 core (triangular lattice of fuel elements) are demonstrated. Also the design of a thermohydraulic model for planned experimental research of the SVBR-100 core is in detail described.

УДК 621.039.51: 536.24

Statistical Estimation of Maximum Fuel-Element Cladding Temperature in Supercritical Water-Cooled Fast Reactor \K.V. Kartashov, G.P. Bogoslovskaya; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 9 pages, 2 tables, 2 illustrations. – References, 9 titles.

The analysis of programs subchannel, currently used to estimate the parameters of fuel assemblies of a new generation of reactors cooled by supercritical water. The possibility of the use of programs subchannel at the stage of preliminary calculations, the definition and optimization of design and operational parameters. A comparison of programs, shows the benefits of the program MIF, previously developed to calculate the thermal hydraulic parameters of fast reactors with liquid metal coolant. Shows how to estimate the maximum temperature of fuel cladding of the reactor, taking into account factors of overheating. The possibility of evaluation hot spot factors on the basis of the Monte-Carlo method.

УДК 621.039.531

Radiation-Induced Structural Effects Observing in VVER-1000 RPV Steels under Operation, Recovery Annealing and Accelerated Re-Irradiation \B.A. Gurovich, E.A. Kuleshova, O.O. Zabusov, S.V. Fedotova, K.E. Prikhodko, A.S. Frolov, D.A. Maltsev, M.A. Saltykov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 11 pages, 4 tables, 7 illustrations. – References, 12 titles.

In this paper evolution of radiation-induced structure elements and level of grain-boundary segregation in VVER-1000 welds during operation, recovery annealing and accelerated re-irradiation were studied using high-resolution methods of transmission and scanning electron microscopy and Auger electron spectroscopy.

The level of grain-boundary segregations in various states was established as well as the fast neutron fluence and flux dependence of the density of radiation defects and radiation-induced precipitates. It is shown that the radiation-induced structure effects correlate with the results of mechanical tests.