

ОБЩАЯ ПОСТАНОВКА ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ВВЭР-1000

В.М.Троянов, Ю.И.Лихачев, В.И.Фоломеев

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



В статье рассмотрена общая постановка задачи исследования термомеханического поведения активной зоны реактора ВВЭР-1000. Обсуждаются предпосылки для разработки соответствующей методологии, связанные с имевшими место искривлениями и деформациями тепловыделяющих сборок при эксплуатации, застреванием кластерных поглощающих стержней и образованием увеличенных межкассетных зазоров, влияющих на локальное энерговыделение в топливе. Описана схематизация конструкции тепловыделяющих сборок (ТВС) ВВЭР-1000 и активной зоны, с помощью которой разработаны методики расчета термомеханического поведения ТВС в составе активной зоны ВВЭР-1000. Приводится описание расчетных моделей, с помощью которых выполняется обоснование термомеханического поведения активных зон ВВЭР-1000 и разрабатываются рекомендации по усовершенствованию конструкции.

ВВЕДЕНИЕ

В начале 1990 годов на ряде энергоблоков, эксплуатирующих реакторы PWR и ВВЭР-1000, были зафиксированы случаи нештатной работы органов регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ). Проблемы выразились в том, что в одной или нескольких ТВС активной зоны время падения ОР СУЗ при срабатывании аварийной защиты превышало нормативное время и кроме того наблюдалось неполное погружение отдельных ОР СУЗ, не достигающих нижних проектных положений. Первые публикации о нештатной работе ОР СУЗ на реакторах PWR появились в 1996 г. [1-3]. В 1998 г. на семинаре (г. Ржеж, Чехия), посвященном проблеме изгиба ТВС в реакторах PWR и ВВЭР, информация о состоянии дел на энергоблоках с реакторами ВВЭР-1000 была представлена российскими, украинскими и болгарскими специалистами [4-7]. В результате было достигнуто понимание, что нештатная работа ОР СУЗ на реакторах PWR и ВВЭР-1000 обусловлена искривлением ТВС в условиях длительной эксплуатации. Искривление ТВС вызывает и другие проблемы при работе реактора, в первую очередь, – образование увеличенных водяных зазоров между ТВС, приводящих к изменению водоуровневых соотношений в активной зоне и локальным всплескам энерговыделения в топливе.

Обнаруженные факты нештатной работы ОР СУЗ, а также искривления ТВС в составе активных зон действующих реакторов вызвали беспокойство органов надзора в тех странах, где подобные случаи имели место (Швеция, Бельгия, Франция, США,

страны, эксплуатирующие российские реакторы) [3]. Были выдвинуты требования к эксплуатирующим организациям по периодической проверке работоспособности ОР СУЗ. Возникла необходимость проведения мероприятий по устранению негативных явлений, связанных с искривлением ТВС в составе активных зон PWR и ВВЭР-1000, а также разработки методов и программ для расчетного моделирования термомеханического поведения ТВС при их эксплуатации.

В статье рассматриваются основные положения методики расчета термомеханического поведения ТВС в составе активной зоны ВВЭР-1000. Работа выполнялась при содействии ОАО "ТВЭЛ".

ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЙ, КОНСТРУКЦИИ И ИСХОДНЫХ ПРЕДПОСЫЛОК

Активная зона ВВЭР-1000 содержит 163 ТВС гексагональной формы, закрепленных в посадочных местах внутрикорпусных устройств внизу (хвостовик) и вверх (головка ТВС) [8]. Сборочный зазор между ободами соседних ТВС при комнатной температуре составляет 2 мм; в случае применения циркониевых дистанционирующих решеток при разогреве активной зоны до уровня рабочих температур зазоры увеличиваются до величины 2,8 мм.

Если по каким-либо причинам в эксплуатационных условиях ТВС имеют тенденцию к изгибу, то свободный изгиб возможен в пределах зазоров между соседними кассетами. Во многих случаях при эксплуатации энергоблоков обнаруживали согласованные (однонаправленные) изгибы ТВС, при которых прогибы кассет намного превышают единичный зазор между ними, кассеты вкладываются друг в друга. Пример таких искривлений ТВС в активной зоне приведен на рис. 1, где в плане поперечного сечения активной зоны показаны модули векторов смещения центров кассет относительно их проектных положений для 10 топливной кампании одного из блоков Запорожской АЭС [4].

Измерения кривизны ТВС в составе активных зон выполнялись по специальной методике с применением специально разработанного оборудования специалистами ОКБ "Гидропресс" [6].

Тепловыделяющая сборка реактора ВВЭР-1000 представляет собой многостержневую конструкцию [6], состоящую из стержней двух типов: тепловыделяющих элементов (ТВЭЛОВ) в количестве 312 шт. и направляющих каналов (НК) в количестве 18 шт. вместе с центральным измерительным каналом в количестве 1 шт. Все стержни закреплены в опорной решетке нижнего хвостовика, а НК и центральный канал закреплены каким-либо образом в головке ТВС – такая система закрепления стержней связывает конструкцию в единое целое. Схематичное изображение конструкции ТВС приведено на рис. 2.

По длине ТВС расположены 15 дистанционирующих решеток (ДР) высотой 20 мм, содержащих определенной формы ячейки толщиной 0,25 мм, предназначенные для размещения стержней. Дистанционирующие решетки связывают пучок стержней посредством упругих натягов, создаваемых в процессе сборки ТВС за счет разности диаметров ячеек ДР и стержней. Номинальные диаметры ТВЭЛОВ в настоящее время составляют 9,1 мм, диаметры НК и центрального канала – 13,0 мм (возможны варианты конструкции и с другими размерами стержневых элементов). Натяги в ячейках ДР могут достигать нескольких десятых долей миллиметра, обеспечивая конструкции определенные начальные характеристики изгибной жесткости.

В процессе работы реактора при воздействии внешних сил изгиб ТВС как многостержневой многосвязной пространственной конструкции является суммой изгибов двух форм: продольного изгиба – от действия осевой силы, сопровождающегося из-

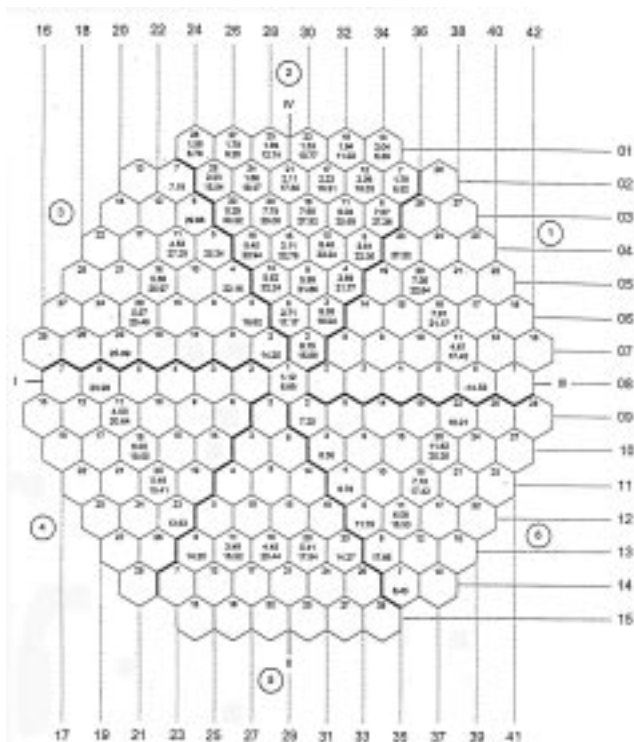


Рис.1 Картграмма максимальных искривлений ТВС в 10 топливной кампании:



- номер ТВС в секторе 60-градусной симметрии
- максимальный изгиб в начале 10 топливной кампании
- максимальный изгиб в конце 10 топливной кампании

менением длины стержней (удлинением или укорочением – по разные стороны нейтральной поверхности изгиба), и поперечного изгиба – от действия нагрузок на ДР (со стороны ДР соседних ТВС), сопровождающегося изгибами стержней в промежутках между ДР. Продольный изгиб возрастает при проскальзывании стержней (всех или части) в одной или нескольких (всех) ДР, а поперечный изгиб возрастает в случае, когда условия закрепления стержней в ДР допускают поворот их осей относительно осей ячеек ДР.

Конструктивно ТВС выполняется так, чтобы условия закрепления стержней в ДР обеспечивали ей в исходном состоянии такую изгибную жесткость, при которой типичные внешние нагрузки (осевая сила, поперечные реактивные силы от соседних ТВС, гидравлические силы) не приводили бы к существенному изгибу ТВС. Однако такое состояние сохраняется только на начальном этапе работы ТВС.

В результате длительного воздействия эксплуатационных факторов, в первую очередь нейтронного потока и рабочих температур, характеристики изгибной жесткости ТВС существенно уменьшаются (в пределе более чем в 300 раз).

Причиной этого является релаксация упругих натягов (до полного их исчезновения) в парах «твэл – ячейка ДР» вследствие терморадационной ползучести материала ДР и даже образование в них зазоров из-за обжатия оболочек твэлов внешним давлением. Также имеет место релаксация натягов в парах «НК – ячейка ДР».

Столь значительное уменьшение изгибной жесткости ТВС принципиально меняет характер ее поведения в активной зоне при длительной эксплуатации: возникают изгибы ТВС сложной пространственной формы с отклонениями осей ТВС от исходного положения на величину, достигающую предельно разрешенной, исходя из геомет-

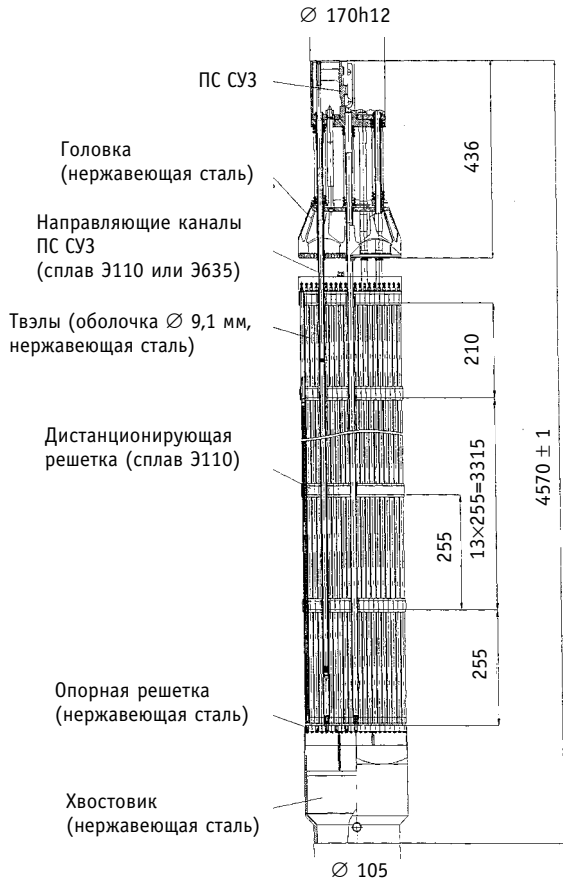


Рис. 2. Схематичное изображение конструкции ТВС ВВЭР-1000

рических возможностей упаковки ТВС в активной зоне с учетом конструктивных сборочных зазоров. При этом возможно появление больших зазоров между периферийными твэлами соседних искривленных ТВС, что нарушает теплотехническую надежность этих твэлов вследствие всплеска в них энерговыделения. Большая свобода для перемещения в тангенциальном направлении вызывает преимущественно вихреобразную закрутку активных зон и, следовательно, максимальное искривление ТВС в рабочих условиях. Имеются экспериментальные данные об искривлении ТВС в действующих реакторах, например, [4].

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ И РАСЧЕТНЫЕ СРЕДСТВА

Активная зона, располагающаяся внутри цилиндрической обечайки (выгородки), каждый элемент которой (ТВС) зафиксирован в посадочном месте в опорной плите и вверху в плите блока защитных труб (БЗТ) с осевым нагружением, моделируется набором элементов с определенными неоднородными свойствами, испытывающих нейтронное и температурное воздействие. Каждая из ТВС имеет возможность механически взаимодействовать с соседними ТВС или выгородкой в 15 уровнях по высоте шестью гранями через дистанционирующие решетки.

Реактивные силы взаимодействия между кассетами и деформации кассет определяются из решения задачи о совместной деформации и равновесного состояния всего ансамбля кассет.

Положения модели расчета термомеханического поведения зоны в целом.

1. Изгибные деформации тепловыделяющих сборок моделируются в рамках балочной модели:

- тепловыделяющая сборка представляется балкой с запрещенными перемещениями в верхней и нижней точках;
- эта балка имеет шестигранное сечение и переменную по длине жесткость, меняющуюся в процессе нагружения с учетом осевой силы и проскальзывания твэлов.

2. Силы действуют на грани (решетки) только перпендикулярно к ним (силы трения между сборками не учитываются).

3. Кручение сборок не учитывается.

4. Контакты между сборками могут иметь место в фиксированных точках по высоте сборок (на уровнях расположения решеток).

5. Изменения размеров под ключ решеток от контактных сил моделируются специальными элементами (пружинками), имеющими определенную жесткость и условно расположенными в центрах граней на уровнях контакта.

6. Деформации радиационной ползучести учитываются согласно теории ползучести старения.

Решение задачи ползучести сводится к решению ряда псевдоупругих задач с введенными модулями. При этом имеется возможность рассчитывать механическое состояние активной зоны за один шаг или при необходимости за несколько шагов. Применение пошагового метода расчета деформаций ползучести в приращениях является по существу реализацией неявной схемы расчета деформаций ползучести по теории течения. Такое решение, когда на каждом шаге определяется приращение деформации к деформациям, накопленным на предыдущих шагах и учитываемым в свободных членах уравнений совместности деформаций, позволяет учитывать изменение напряжений в процессе деформации активной зоны и перестраивать матрицу жесткости с учетом изменения состояния кассет и условий нагружения.

Положение элемента зоны (ТВС) складывается из трех составляющих: номинальное вертикальное положение, отклонение от него вследствие свободного изгиба и смещение оси от последнего под действием контактных сил в процессе работы реактора.

Все элементы зоны нумеруются последовательно начиная с центрального элемента зоны по спирали, раскручивающейся по часовой стрелке от центра по гексагональным рядам. Этот номер полностью характеризует положение сборки в номинальной геометрии и позволяет при необходимости перейти к координатам недеформированной оси сборки (X и Y) в глобальной системе координат, начало которой совпадает с центром сечения центрального шестигранника, а ось Z - с осью центральной сборки.

Смещения осей сборок в процессе работы реактора отсчитываются от этого номинального положения.

Грани шестигранника нумеруются цифрами от 1 до 6.

В соответствии с положением об ограниченном числе возможных уровней контакта между сборками (уровни расположения дистанционирующих решеток) в работе используется также следующая индексация: уровни возможного контакта нумеруются сверху вниз, при этом величины, соответствующие верхнему уровню, имеют индекс 1, а величины, соответствующие нижним уровням, - от 2 до n , где количество уровней n определяется конструкцией сборки.

Уравнениями равновесия для системы ТВС активной зоны будут уравнения, обеспечивающие равенство изгибных сил, действующих на сборку, равнодействующей контактных сил по граням:

$$\begin{cases} P_{x,i} = \frac{\sqrt{3}}{2} (q_{5,i} + q_{6,i} - q_{2,i} - q_{3,i}); \\ P_{y,i} = q_{4,i} - q_{1,i} + \frac{1}{2} (q_{3,i} + q_{5,i} - q_{2,i} - q_{6,i}), \end{cases} \quad (1)$$

где $P_{x,i}$, $P_{y,i}$ - изгибные силы, действующие на сборку по X и Y направлениям на уровне i ($i=1, n$); $Q_{m,i}$ ($m=1, \dots, 6$) - контактная сила, действующая на m -ю грань дистанционирующей решетки на уровне i .

Кроме этого на каждом возможном уровне контакта должно выполняться условие равенства контактных сил на противоположных гранях двух соседних сборок А и В

$$Q_{m,i}^A = Q_{(m+3)_{\text{mod } 6}, i}^B. \quad (2)$$

Расчетная схема деформирования и нагружения ТВС контактными силами на двух ДР показана на рис. 3.

Условие совместности деформаций для двух сборок А и В выражает тот факт, что контуры граней балок в местах контактов (дистанционирующих решеток) этих сборок не могут перекрываться, т.е. зазор между осями ТВС в данном сечении должен быть больше или равен сумме половин размеров под ключ контактирующих сборок с учетом осаживания двух смежных граней за счет контактных сил.

Рассмотрим две соседние сборки (среди N сборок, составляющих исследуемую упаковку активной зоны).

Расстояние между осями двух соседних ТВС после деформации равно

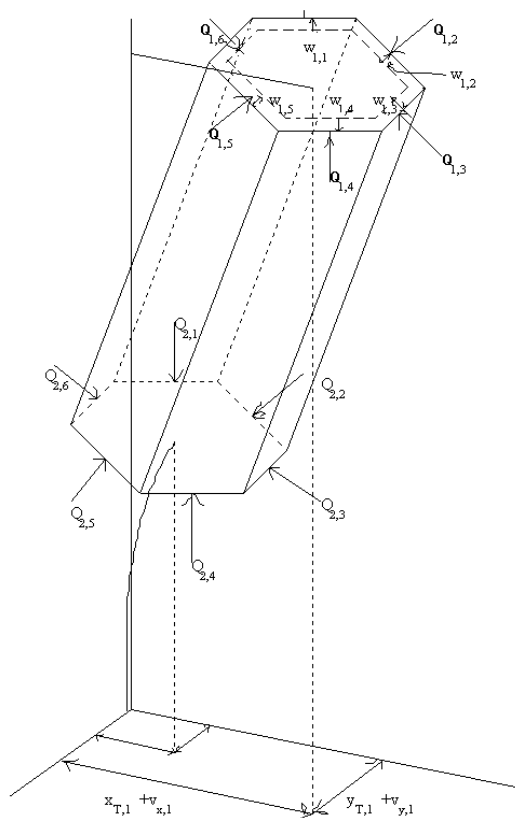


Рис.3. Схема нагружения двух ДР ТВС поперечными силами взаимодействия с соседними ТВС

$$\vec{AB} = \{x_{T,i}^A - x_{T,i}^B + v_{x,i}^A - v_{x,i}^B; y_{T,i}^A - y_{T,i}^B + v_{y,i}^A - v_{y,i}^B\} \quad (3)$$

где $x_{T,i}^j, y_{T,i}^j$ - координаты свободного изгиба j -той сборки на уровне i ($j = A, B; i = 1, n$); $v_{x,i}^j, v_{y,i}^j$ - перемещение оси j -той сборки (центра шестигранника) на уровне i от положения свободного изгиба по осям X и Y , вызванное действием изгибных сил.

Пусть $\vec{\Psi}$ - единичный вектор прямой O_1O_2 , соединяющей центры соседних сборок и проходящей через m -тую грань шестигранника A и $(m+3)_{\text{mod } 6}$ -ую грань шестигранника B в недеформированной решетке, тогда

$$AB' = AB \cdot \vec{\Psi} = |AB| \cdot |\vec{\Psi}| \cos(AB, \vec{\Psi}), \quad (4)$$

и условие неперекрывания сечений будет выглядеть следующим образом:

$$AB' \geq \frac{S_i^A + S_i^B}{2} - w_{m,i}^A - w_{(m+3)_{\text{mod } 6},i}^B,$$

где $w_{m,i}^A$ - изменение размера под ключ (условно называемое далее по тексту прогибом) m -той грани сборки A на уровне i от действия контактных сил; $w_{(m+3)_{\text{mod } 6},i}^B$ - прогиб грани сборки B , примыкающей к m -той грани сборки A на уровне i ; S_i - размер под ключ шестигранников A и B на уровне i до начала деформирования на данном шаге.

Подставив в последнее неравенство значение AB' из (3) и (4), окончательно получаем следующий вид условия совместности деформаций ДР для двух соседних сборок A и B :

$$\begin{aligned} & (v_{x,i}^A - v_{x,i}^B) \Psi_m^1 + (v_{y,i}^A - v_{y,i}^B) \Psi_m^2 - w_{m,i}^A - w_{(m+3)_{\text{mod } 6},i}^B + \\ & + \frac{S_i^A}{2} + \frac{S_i^B}{2} + (x_{T,i}^A - x_{T,i}^B) \Psi_m^1 + (y_{T,i}^A - y_{T,i}^B) \Psi_m^2 \leq 0, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\vec{\Psi}_m = \{\Psi_m^1, \Psi_m^2\}$ - направляющие косинусы прямой O_1O_2 в номинальной геометрии.

Наряду с описанными уравнениями равновесия и совместности деформаций, записанными для всех элементов зоны, для решения задачи необходимо использовать соотношения, выражающие связь между перемещениями и силами, а именно:

$$Q_{m,i} = 2\chi_i w_{m,i}; \quad (6)$$

$$\begin{cases} v_{x,i} = \sum_{j=1}^n k_{ij} P_{x,j}; \\ v_{y,i} = \sum_{j=1}^n k_{ij} P_{y,j}, \end{cases} \quad (7)$$

где χ_i - половина жесткости грани на прогиб на уровне i ; k_{ij} - коэффициенты влияния Максвелла, представляющие собой смещения оси балки на уровне i под действием единичной силы, приложенной на j -том уровне. В матричном виде последнее соотношение запишется как

$$\begin{cases} \vec{v}_x = [K] \vec{P}_x; \\ \vec{v}_y = [K] \vec{P}_y. \end{cases} \quad (8)$$

Полученная замкнутая система уравнений позволяет определить контактные силы и смещения осей сборок, вступивших во взаимодействие. При этом соотношения со-

вместности деформаций в зависимости от распределения зазоров становятся точными равенствами, если контакт между сборками есть, или заменяются условием равенства нулю соответствующей контактной силы в случае отсутствия контакта. Поскольку распределение зазоров между сборками заранее не известно, задача становится нелинейной. Для ее решения используется энергетический метод.

Поиск равновесного положения системы ТВС активной зоны проводится в соответствии с вариационным принципом Лагранжа [9], когда уравнения равновесия заменяют условием минимума потенциальной энергии системы при выполнении условий совместности деформаций.

Потенциальная энергия системы ТВС активной зоны является суммой потенциальных энергий деформирования отдельныхборок, которые, в свою очередь, складываются из энергии изгиба сборки за счет сил реакции со стороны соседних ТВС и энергии прогиба граней под действием контактных сил на всех уровнях контакта:

$$2U = P_x V_x + P_y V_y + \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^6 Q_{m,i} w_{m,i} + U(N_z). \quad (9)$$

Осевые силы, действующие на сборку, определяются воздействием на нее пружинных блоков и несущественно меняются в процессе работы на данном шаге, поэтому вариация потенциальной энергии деформирования балки, связанной с влиянием осевой силы, определяется изменением осевых деформаций балки. Величины осевого удлинения существенно меньше (более чем на порядок) боковых смещений оси сборки при изгибе, поэтому членом $U(N_z)$ в итерациях можно пренебречь.

Решение задачи в каждом шаге сводится к определению значений усилий взаимодействия между всеми кассетами $Q_{m,i}$, удовлетворяющих условию минимума потенциальной энергии деформации всей системы кассет (9) и условиям совместности деформаций (5) всех кассет.

Используя зависимости (1), (6)-(8), можно выразить потенциальную энергию для кассеты в виде квадратичной формы от прогибов граней на всех уровнях контактов:

$$U = \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^6 \chi_i w_{m,i}^2 + \frac{1}{2} \bar{\beta}_x [K] \bar{\beta}_x + \frac{1}{2} \bar{\beta}_y [K] \bar{\beta}_y, \quad (10)$$

где

$$\begin{Bmatrix} \bar{\beta}_{x,i} \\ \bar{\beta}_{y,i} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 2\chi_i \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} (w_{2,i} + w_{3,i} - w_{5,i} - w_{6,i}) \\ 2\chi_i \cdot \left(w_{1,i} + \frac{1}{2} w_{2,i} - \frac{1}{2} w_{3,i} - w_{4,i} - \frac{1}{2} w_{5,i} + \frac{1}{2} w_{6,i} \right) \end{Bmatrix}.$$

Эту квадратичную форму можно записать в матричном виде:

$$U = \frac{1}{2} \bar{w}^T C' \bar{w},$$

где $\bar{w}^T = \{w_{1,1}, w_{2,1}, \dots, w_{6,n}\}$ - вектор, состоящий из прогибов граней на n уровнях возможного контакта; C' - симметричная, положительно определенная матрица энергии размерности $(6n \times 6n)$.

Общая энергия деформирования системы элементов активной зоны реактора будет являться суммой таких квадратичных форм и в матричном виде может быть представлена как

$$U = \frac{1}{2} \bar{w}^T C \bar{w},$$

где $\bar{w}^T = \{w_{1,1}^1, \dots, w_{6,n}^1, w_{1,1}^2, \dots, w_{6,n}^N\}$; N - число элементов в зоне; C - матрица энергии системы ТВС зоны размерности $(6nN \times 6nN)$.

Используя (6)-(8), уравнение совместности деформаций (5) можно записать в следующем виде:

$$\sum_{j=1}^n [(k_{ij} \beta_{x,j})^A - (k_{ij} \beta_{x,j})^B] \Psi_m^1 + \sum_{j=1}^n [(k_{ij} \beta_{y,j})^A - (k_{ij} \beta_{y,j})^B] \Psi_m^2 - w_{m,i}^A - w_{(m+3) \bmod 6, i}^B + \frac{S_i^A}{2} + \frac{S_i^B}{2} + (x_{T,i}^A - x_{T,i}^B) \Psi_m^1 + (y_{T,i}^A - y_{T,i}^B) \Psi_m^2 \leq 0, \quad (11)$$

где i - номер уровня, для которого записываются уравнения совместности.

В матричной форме для всей системы ТВС зоны это условие совместности деформаций примет вид

$$B \bar{w} - \bar{b} \leq 0,$$

где B - матрица коэффициентов; \bar{b} - вектор свободных членов.

Таким образом, задача определения равновесного состояния системы элементов активной зоны реактора сводится к следующей задаче нелинейного программирования:

$$\text{минимизировать } \frac{1}{2} \bar{w}^T C \bar{w},$$

$$\text{при условиях } B \bar{w} - \bar{b} \leq 0.$$

Основы решения указанной задачи градиентным методом [10] разрабатывались ранее применительно к исследованию деформаций ТВС в активной зоне быстрого реактора [11].

Наряду с энергетическим методом был разработан метод прямого итерационного решения замкнутой системы уравнений равновесия (1), (2), упрощенных условий совместности деформаций (5), в которых исключены прогибы граней w , и соотношений (7), (8), записанных для всех кассет зоны.

Для решения рассмотренных задач разработан код РАНДЕВУ-3, в котором равновесное состояние элементов активной зоны находится итерационным путем на каждом шаге счета. Энергетический метод расчета усилий взаимодействия кассет с использованием балочной модели реализован в коде АСМЕ, разработанном в ФЭИ для расчета поведения активных зон быстрых реакторов [12]. Код АСМЕ был верифицирован в рамках координационной исследовательской программы МАГАТЭ [13] и показал практически полное совпадение результатов расчетов тестовых задач с зарубежными конечно-элементными кодами. Код АСМЕ прошел процедуру верификации в ГАН РФ (паспорт ПС № 41 от 23.05.96 г.). Следует отметить, что в коде РАНДЕВУ-3 применяется методология и пошаговая расчетная процедура для анализа поведения ансамбля ТВС в активной зоне реактора, аналогичная верифицированной методологии и процедуре, использованной в коде АСМЕ. В свою очередь, вторая методика прямых итерационных расчетов была тестирована по результатам расчетов, проведенных энергетическим методом.

Отметим, что типичное количество итераций на каждом шаге счета составляет $\sim 10^3$, что соответствует количеству обращений к каждой кассете для определения ее деформации.

Из сказанного следует, что для решения задачи о расчете зоны в целом должна использоваться достаточно простая модель расчета отдельно взятых кассет, не требующая больших затрат машинного времени на определение ее реакции на приложенные нагрузки.

Рассмотрены две возможности создания расчетной модели для одиночной ТВС: конечно-элементная и балочно-стержневая. Для вышеназванных целей использована балочно-стержневая модель расчета одиночных ТВС, т.к.

- балочно-стержневая модель позволяет иметь существенно меньшую размерность задачи по сравнению с подробным конечно-элементным описанием;
- в балочно-стержневой схеме проще ввести физические модели проскальзывания твэлов и НК в отдельных ячейках некоторых ДР, расслабления натягов и образования зазоров в ячейках ДР с течением времени, сопротивления повороту твэлов и НК в ячейках ДР, связанном с искривлением ТВС;
- балочно-стержневая модель дает существенный выигрыш во времени счета и необходимых ресурсах ЭВМ по сравнению с конечно-элементным подходом.

На основе балочно-стержневой модели одиночной кассеты создан расчетный код ТЕРМОК, учитывающий радиационное распухание и анизотропный рост материалов, радиационно-термическую ползучесть, температурные деформации, индивидуальное формоизменение твэлов, изменение натягов в ячейках ДР и образование зазоров, свободные повороты твэлов в твэльных ячейках с зазорами при искривлении ТВС, изменение сил трения и проскальзывание твэлов и НК в ячейках ДР, сопротивление ДР повороту твэлов и НК при искривлении ТВС, неоднородность свойств материалов и облучения по объему ТВС и во времени.

Описание балочно-стержневой модели деформирования бесчехловой ТВС приведено в [14].

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают благодарность за вклад в работу по созданию расчетной модели и кода РАНДЕВУ-3 бывшему сотруднику ГНЦ РФ-ФЭИ Л.В. Матвеевко.

Литература

1. *Jacobson S. and Francillon E.* Incomplete Control Rod Insertion due to Extreme Fuel Element Bow // Nuclear fuel and control rod: operation experience, design evolution and safety aspects. OECD Meeting, Madrid, November 1996.
2. *Wilson H. W.* Incomplete RCCA Insertion. Observations in Westinghouse – Fueled Plants // Nuclear fuel and control rod: operation experience, design evolution and safety aspects. OECD Meeting, Madrid, November 1996.
3. *Hollasky N. A.* Belgian Licensing Requirements: Mixed Cores and Control Rods Insertion Problem Aspects. // Nuclear fuel and control rod: operation experience, design evolution and safety aspects. OECD Meeting, Madrid, November 1996.
4. *Afanasyev A. A., Ignatenko I.* The Summary Experience of the Ukrainian Reactor Core (WWER-1000) Operation with Fuel Assembly Bow. PWR and WWER fuel assembly bow. Workshop in Rez. February 1998.
5. *Gueroguiev I. A.* FA Deformation in the Core, Problems and Solutions at Unit 5 and 6 Kozloduy NPP. PWR and WWER fuel assembly bow. Workshop in Rez. February 1998.
6. *Федоров В. Г. и др.* Опыт эксплуатации ТВС ВВЭР-1000 и мероприятия по обеспечению безопасности и теплотехнической надежности. PWR and WWER fuel assembly bow. Workshop in Rez. February 1998.
7. *Trojanov V.* The Results of Calculation Analysis of Mechanisms and Causes of Fuel Assembly Bending in the Reactor. PWR and WWER fuel assembly bow. Workshop in Rez, February 1998.
8. Design and Performance of WWER Fuel. Technical Reports Series № 379/IAEA, Vienna, 1996.
9. *Работнов Ю. Н.* Механика деформируемого твердого тела. - М.: Наука, 1979.

10. *Васильев Ф.И.* Численные методы решения экстремальных задач. - М.: Наука, 1985.
11. *Лихачев Ю.И., Матвеев Л.В.* Метод расчета усилий взаимодействия и деформаций ТВС быстрого реактора // Атомная энергия. - 1985. - Т. 58. - Вып. 4.
12. *Забудько Л.М., Лихачев Ю.И., Прошкин А.А.* Работоспособность ТВС быстрых реакторов. - М.: Энергоатомиздат, 1988.
13. *Anderson R.G., Maeda K.* Verification and validation of LMFBR static core mechanic codes, report on an IWGFR coordinated research programme. // Proc. of int. conf. «Fast reactor core and fuel structural behaviour», 4-6 June 1990. // British Nuclear Energy Society, Inverness, 1990.
14. *Троянов В.М., Лихачев Ю.И., Фоломеев В.И.* Метод расчета продольно-поперечного изгиба бесчехловой ТВС ВВЭР-1000 при эксплуатационных нагрузках // Известия вузов. Ядерная энергетика. - 2002. - № 2.

Поступила в редакцию 25.05.2002

ABSTRACTS OF THE PAPERS

УДК 621.039.568.007.4

Analysis of Influence of Layout of NPP Control Room Displays on Efficiency of Information Perception \ A.N. Anokhin, E.N. Alontseva; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2002. - 9 pages, 2 tables, 2 illustrations. - References, 8 titles.

The purpose of presented research is to carry out an experimental comparison of duration and reliability of perception of displays ordered under some layout principles. The following layout principles were studied: ordered by display's form, ordered by functional assignment, disordered, disordered and accentuated, shared and presented by one after another. 135 participants (students and post-graduate students of the INPE) took part in experiments. The following main conclusions were drawn. High reliability and large duration of perception are resulted from shared layout. The quickness of perception of graphical accentuated displays decreases on about third in comparison with unaccentuated ones. The disordered layout result to extremely low correctness. The functional layout isn't effectual under deficiency of knowledge about problem area. Horizontally ordered layout is preferable beside vertically ordered displays. During perception participants read about half of all information in ordered layout and above 70 percent of all information in disordered layout

УДК 621.039.58

Date Accidents Analysis of WWR-c reactor \ O.Y. Kochnov, Y.V. Volkov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2002. - 9 pages, 1 table, 8 illustrations. - References, 6 titles.

The operation protective system analyze of WWR-c (Obninsk) was presented in this article since reactor start up (1964). The accident reasons was considered. The conclusion about increasing safety exploitation of research reactor was done.

УДК 621.039

Decommissioning of NPP Units: Conception; State of Execution \ S.A. Nemytov, V.K. Zimin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2002. - 7 pages, 1 table.

The paper is devoted to actual problem of decommissioning of NPP units. The basic concepts, normative documents, stages of process and its feature are considered.

УДК 539.173.84

On the problem of the effective multiplication factor determination using statistical pulse methods \ V.A. Doulin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2002. - 5 pages. - References, 5 titles.

The approach for taking in account the detector position influence on the measured decay neutron density coefficient and other point kinetic parameters by using the pulse neutron source experiments in the multiplying subcritical media is proposed.

Instead the adjoint homogeneous equation (relative the asymptotic power) here is used the adjoint inhomogeneous equation (relative the such detector count rate). The obtained results may be useful by the neutron life time measurements analyses and the spatial correction factor calculation by the effective multiplication factor determination using Rossi-alfa methods – for the low multiplying subcritical media with neutron source especially.

УДК 621.039.54

General Study Statement on Thermomechanical Behaviour of the WWER-1000 Reactor Core \ V.M. Troyanov, Y.U. Likhachev, V.I. Folomeev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2002. - 11 pages, 3 illustrations. - References, 14 titles.

The paper reviews general study statement on thermomechanical behaviour of the WWER-1000

reactor core. Background for developing a correspondent methodology related with occurred bowing and deformation of fuel assemblies (FA) under operation, jamming of the rod cluster control assemblies (RCCA), and generation of enhanced inter-FA gaps impacting on local energy release in fuel, is under consideration. Schematization of WWER-1000 FA and reactor core design is outlined and implemented for developing the procedure for calculation of thermomechanical behaviour of the FA integrated into WWER-1000 reactor core. The description presents computational models, which are implemented for validation of thermomechanical behaviour of the WWER-1000 reactor cores and development of recommendations for the design improvement.

УДК 621.039.54

Calculation Method on the Longitudinal and Transversal Bowing of WWER-1000 Core Subassemblies under Operation \V.M. Troyanov, Y.U. Likhachev, V.I. Folomeev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2002. - 10 pages, 4 illustrations. - References, 2 titles.

The paper reviews calculation method on the longitudinal and transversal bowing of WWER-1000 core subassemblies under operation. The method is based on the beam-pivot modelling of the sub-assembly (FA) bowing. FA is simulated by the multi-tied pivot system. Calculation method of non-linear FA bowing takes into account irradiation effects for structure materials, friction and slipping of fuel rods within spacer grids, external forces, weight acting, hydraulic forces etc. The solution of non-linear equation system is realized by the computer code "TEREMOK".

УДК 629.76:629.78

Application of Nuclear Photon Engines for Deep-space Exploration \A.V. Gulevich, A.V. Zrodnikov, Eu.A. Ivanov, O.F. Kukharchuk, D.V. Evtodiev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2002. - 9 pages, 1 table, 3 illustrations. - References, 11 titles.

Conception of using the nuclear photon rocket engines for deep space exploration is proposed. Some analytical estimations have been made to illustrate the possibility to travel to 100 – 10000 AU using a small thrust photon engine. Concepts of high temperature nuclear reactors for the nuclear photon engines are also discussed.

УДК 502.3 (470.333)

Implementation of Neural Networks for Assessment of Surface Density Contamination with ^{90}Sr (For Territory of Bryansk Region as an Example) \R. Parkin, M. Kanevsky, E. Saveleva, I. Pichugina, B. Yatsalo; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2002. - 7 pages, 2 tables, 5 illustrations. - References, 10 titles.

The joint spatial analysis of surface density contamination of Bryansk region with radionuclides ^{90}Sr and ^{137}Cs is considered. Fallouts of these radionuclides as a result of the Chernobyl accident are correlated, that allows investigating their joint spatial structure and improving quality of spatial interpolation. The application of artificial neural network (Multilayer Perceptron) for an estimation of surface density contamination with ^{90}Sr is described. As a result of implementation of this approach the detailed maps of contamination with ^{90}Sr and ^{137}Cs for Bryansk region were created that is used in geoinformation decision support system for rehabilitation of radioactive contaminated territories.

УДК 574.4:502.3

Ecological Risk. 1. The Origin of Risk in Agrosphere and Natural Ecosystems under Pollution of the Environment \E.S. Fesenko, B.I. Synzynys; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2002. - 11 pages. - References, 21 titles.

The most fundamental problems for contaminated land risk assessment relate to bioavailability of contaminants relative to the study of bioavailability and toxicity criteria. Approach to risk assessment normally consist of three general components. Monitoring of biomarkers, bioconcentration, indicator species, changes in community structure. These indicators are seldom used in current risk