

РАСЧЕТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ВВЭР-1000 В АВАРИЯХ С ПОТЕРЕЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ*

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

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



Рассмотрены методические вопросы и элементы теории расчета термомеханического поведения ТВС в составе активной зоны ВВЭР-1000 в аварийных ситуациях, сопровождающихся повышением температур в конструкциях. Анализируются ситуации, в которых под действием приложенных внешних нагрузок (нагружение через пружинный блок, а также силовое взаимодействие ТВС между собой) реализуется упруговязкопластическое деформирование конструкции, провоцируемое разупрочнением материалов при высоких температурах и ускоренной термической ползучести.

Особенностью данной задачи является неизотермический характер нагружения, что требует применения специальных расчетных методов.

Деформирование ТВС рассматривается в ансамбле, составляющем активную зону, с учетом взаимодействия кассет между собой [1-3].

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ПРЕДПОСЫЛКИ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ МЕТОДА РАСЧЕТА ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ВВЭР-1000 В АВАРИЯХ С ПОТЕРЕЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Исходными предпосылками являются следующие обстоятельства:

- ряд рассматриваемых проектных аварий так же, как и запроектные аварии, сопровождаются значительным повышением температуры оболочек твэлов и элементов несущего каркаса ТВС (направляющие каналы, дистанционирующие решетки) вплоть до температур, превышающих 1000°C;

- в процессе развития аварии каждая из ТВС в активной зоне испытывает нагружение осевой силой от пружинного блока, поперечными силами от взаимодействия кассет между собой и, в отдельных случаях, поперечное нагружение от перепада давления, вызванного аварийной ситуацией в одной из петель;

- значительное повышение температуры сопровождается существенным изменением механических свойств материалов, а именно - снижением мгновенных пределов текучести и ростом скоростей термической ползучести;

- в особенности значительно высокотемпературное разупрочнение и ускорение ползучести проявляются для циркониевых сплавов, в том числе сплавов Э-110 и

© В.М.Троянов, Ю.И.Лихачев, В.И.Фоломеев, 2002

* Работа выполнялась при содействии ОАО "ТВЭЛ".

Э-635, что вызывает опасение потери несущей способности циркониевого каркаса ТВС, которая может приводить к потере устойчивости при осевом нагружении, что, в свою очередь, может приводить к значительным формоизменениям кассет в аварийной ситуации;

- масштаб формоизменений теряющих устойчивость кассет может быть очень большим в случае, если активная зона содержит достаточно большое количество таких ТВС; это связано с возможностью однонаправленной поперечной деформации кассет, когда искривленные кассеты вкладываются одна в другую;

- последствием значительных формоизменений кассет в аварийной ситуации может быть нарушение условий теплосъема и отвода тепла от разогретых конструкций активной зоны, а также возникновение трудностей в разборке деформированной активной зоны при ликвидации последствий аварии. Трудности в разборке зоны могут усугубляться охрупчиванием циркониевых труб НК из-за взаимодействия их с водяным паром. При этом не исключен отрыв головок ТВС при разборке.

Проводимый в рамках настоящей работы анализ позволяет определить ожидаемые масштабы деформирования активной зоны.

В рамках разработки методики и алгоритмов расчета для указанной задачи были рассмотрены различные теоретические подходы и установлены основные физические зависимости, определяющие кинетику напряженно-деформированного состояния ТВС при неизотермическом вязкопластическом течении в аварийной ситуации.

Проанализированы виды испытаний физико-механических свойств, необходимых для расчетов кинетики напряженно-деформированного состояния ТВС в аварийной ситуации.

Рассмотрено применение двух различных подходов:

- исследование формоизменения тепловыделяющих сборок в аварийной ситуации на базе теории неизотермического вязкопластического течения;
- решение задачи о деформациях ТВС с использованием изохронных кривых деформирования.

Для быстропротекающих аварийных ситуаций, когда общую неупругую деформацию затруднительно разделить на вязкую и "мгновенную" пластическую, решение задачи целесообразно проводить на базе теории ползучести старения с использованием изохронных кривых вязкоупругопластического деформирования.

Математические модели и алгоритмы определения формоизменения ТВС на основе теории ползучести старения, изложенные в [2], были реализованы в виде расчетной программы ТЕРЕМОК-А. Программа ТЕРЕМОК-А представляет собой модифицированную версию программы ТЕРЕМОК, позволяющую производить расчеты поведения отдельно взятой кассеты ВВЭР-1000 с учетом ее реального состояния к моменту аварии, определяемого радиационными эффектами в конструкционных материалах (радиационный рост и ползучесть), расслаблением натягов в ячейках ДР, искривлениями кассет в процессе работы, действующими на кассеты нагрузками.

В процессе аварии в дополнение к вышеназванным факторам в расчетной программе учитывается термическая ползучесть и пластическое деформирование конструкции, являющиеся определяющими факторами для деформирования ТВС в условиях резкого повышения температур в аварийной ситуации.

Расчетная программа ТЕРЕМОК-А в виде самостоятельного модуля входит в состав расчетного комплекса РАНДЕВУ-А подобно тому, как это реализовано в комплексе РАНДЕВУ-3 [1].

Комплекс РАНДЕВУ-А позволяет производить расчет усилий взаимодействия и деформаций ансамбля тепловыделяющих сборок активной зоны ВВЭР-1000 в любых проектных авариях. Необходимой входной информацией проведения расчетов явля-

ется кинетика температур оболочек твэлов, НК и ДР в различных сечениях по высоте для всего процесса аварии.

Проведены демонстрационные расчеты термомеханического поведения ТВС-2 в составе активной зоны ВВЭР-1000 в максимальной проектной аварии с разрывом Ду 850.

Получены результаты развития вязкопластического деформирования ТВС-2 в составе активной зоны в процессе аварии.

ОПИСАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АВАРИЙНОГО ПРОЦЕССА

Развитие процесса деформирования ТВС в активной зоне при максимальной проектной аварии (МПА) в значительной мере определяется стартовым состоянием активной зоны, предшествующим аварии.

Исходное термомеханическое состояние активной зоны перед аварией характеризуется искривлениями тепловыделяющих сборок, усилиями взаимодействия между ними, расслаблением усилий зажимов твэлов и НК в ячейках ДР, изменением осевых сил поджатия кассет пружинными блоками. Это состояние должно быть получено из рассмотрения термомеханики активной зоны в нормальных условиях эксплуатации. Для этого необходимо выполнить комплекс расчетов, включающих в себя определение нейтронных и температурных полей для заданного состава загрузки активной зоны, определение прогибов и сил взаимодействия кассет в составе зоны. Расчеты необходимо выполнять по состоянию на заданный момент времени начала аварийной ситуации с учетом режимных факторов. Авария может произойти на любой стадии топливного цикла (в начале цикла, в конце и в промежутке). Поскольку весь опыт расчетных исследований термомеханического поведения зон свидетельствует, что деформации ТВС развиваются в течение топливного цикла, достигая максимальных значений в конце каждого цикла, наиболее консервативными будут оценки последствий аварии, происходящей в конце топливного цикла.

При проведении трехмерных расчетов термомеханического поведения ТВС в активной зоне рассматривается полный объем активной зоны – 163 ТВС.

Температурные условия для оболочек твэлов и направляющих каналов в ТВС активной зоны ВВЭР-1000 в аварийной ситуации представляются в качестве исходных данных. Для проведения демонстрационных расчетов термомеханического поведения ТВС в активной зоне рассмотрена проектная авария с разрывом

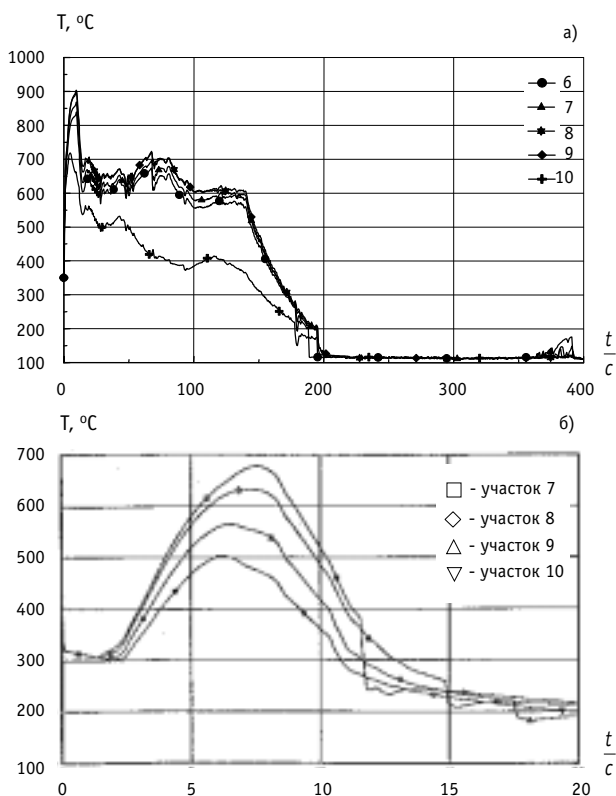


Рис. 1. Температура оболочек твэлов (а) и НК (б) на различных участках по высоте ТВС (участки обозначены номерами, отсчет снизу)

трубопровода Ду 850.

Характерные изменения температуры оболочек твэлов и направляющих каналов в указанной аварийной ситуации для наиболее теплонапряженных ТВС приведены на рис. 1.

КОММЕНТАРИИ К РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ

В процессе аварии и повышения температур в активной зоне основной активной нагрузкой для ТВС будут являться осевые силы от пружинных блоков и весовые нагрузки.

Поперечные силы, действующие на ТВС, являются силами контактного взаимодействия кассет между собой и вызваны, в основном, изгибами от продольных сил. Они не являются активными нагрузками и их уровень невелик, поскольку податливость материалов резко возрастает при высоких температурах. Не ожидается дополнительных искривлений кассет от температурных неоднородностей по сечению ТВС, от неоднородных удлиненных твэлов и НК от радиационных эффектов и термомеханических хрупких процессов.

Вследствие этого основной вклад в прогибы кассет при высокотемпературном нагружении дает продольный изгиб, вызываемый осевой силой. Вклад поперечного изгиба в искривления ТВС ожидается небольшим из-за малости поперечных сил. Поэтому в настоящем рассмотрении вклад поперечного изгиба в деформирование кассет учитывается приближенно следующим образом. Ведется расчет в упругом приближении с выполнением принципа суперпозиции при вычислении псевдоупругих деформаций от продольного и поперечного изгибов в твэлах и НК до появления псевдопластических деформаций в стержнях от продольного изгиба, после чего в зонах появления пластических деформаций от продольного изгиба сопротивлением стержней поперечному изгибу пренебрегаем (для получения пессимистических оценок). Это достигается путем уменьшения числа работающих стержней при определении собственной изгибной жесткости твэлов и НК в задаче поперечного изгиба [2].

Собственная изгибная жесткость твэлов, которые располагаются в области псевдоупругих деформаций, определяется теперь из следующей зависимости:

$$D_u^* = E^* J^* n_{\Sigma}^* \frac{F(A)}{F}, \quad (1)$$

где J^* - осевой момент инерции оболочки твэла; $n_{\Sigma}^* = 312$ - число твэлов в сечении ТВС; $F(A)$ - площадь псевдоупругой области A [2]; F - общая площадь сечения ТВС.

Усредненный по рассматриваемому сечению балки приведенный модуль псевдоупругости $E^*(\Delta t_j)$ материала оболочек твэлов для j -го шага счета Δt_j находится из соотношения

$$E^*(\Delta t_j) = \frac{E_y(T_j)}{1 + \frac{E_y(T_j)}{E(T_j, t_j)} - \frac{E_y(T_j)}{E(T_{j-1}, t_{j-1})}}, \quad (2)$$

где $E_y(T_j)$, $E(T_j, t_j)$ - упругий модуль и модуль псевдоупругости для конца j -го шага; $E(T_{j-1}, t_{j-1})$ - псевдоупругий модуль в начале j -го шага.

Аналогичным образом определяются собственная изгибная жесткость НК.

При расчете продольно-поперечного изгиба балки используются модели продольного изгиба, а также методология расчета поперечного изгиба и алгоритмы взаимосвязанного расчета продольного и поперечного изгибов, изложенные [2].

В настоящей работе была разработана теоретическая модель термомеханическо-

го поведения кассет ВВЭР-1000 в условиях монотонно изменяющихся температур и силовых нагрузок. Модель рассматривает вязкопластическое деформирование каждой из кассет в активной зоне с развитием зон пластического деформирования по объему ТВС и с одновременным учетом проскальзывания твэлов и НК в ячейках ДР, расслабляющихся вследствие релаксационных процессов и формоизменений элементов конструкции.

При рассмотрении кратковременного нагружения активной зоны в аварийной ситуации, когда разделить неупругую деформацию на пластическую часть и на деформацию ползучести не представляется возможным, необходимы изохронные кривые деформирования $\sigma = f(\epsilon, t, T)$, которые могут быть получены из кратковременных испытаний при определенных температурах (в нужном интервале температур) и заданных временах нагружения (согласованных с длительностью аварийной ситуации). Такие наборы изохронных кривых должны быть известны для ряда значений температуры в интервале $T_{\text{раб}} \div T_{\text{max}}$, где $T_{\text{раб}}$ - рабочая температура материала (оболочки твэла, трубок НК и дистанционирующих решеток), а T_{max} - наибольшая температура материала в аварийной ситуации.

Для инженерных расчетов изохронные кривые могут быть аппроксимированы зависимостями

- 1) материала с линейным упрочнением (штрихпунктирная линия на рис. 2) или
- 2) идеально упругопластического материала (пунктирная линия на рис. 2).

Для стадии псевдоупругого деформирования ОА-деформации прямо пропорциональны напряжениям:

$$\epsilon = \frac{1}{E} \sigma. \quad (3)$$

Для стадии псевдопластического деформирования АВ-деформации и напряжения связаны следующей зависимостью:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E_K} - \epsilon_{om}, \quad (4)$$

где $\epsilon_{om} = \sigma_m \left(\frac{1}{E_K} - \frac{1}{E} \right).$

Здесь $E(T, t)$; $E_K(T, t)$; $\sigma_m(T, t)$ - модуль псевдоупругости, модуль псевдопластичности и предел псевдотекучести материала для заданных температуры T и временного интервала t . Указанные зависимости могут быть заданы аналитически или в виде таблиц. В процессе расчетов величины для нужных значений T и t находятся линейной интерполяцией по специально разработанной процедуре.

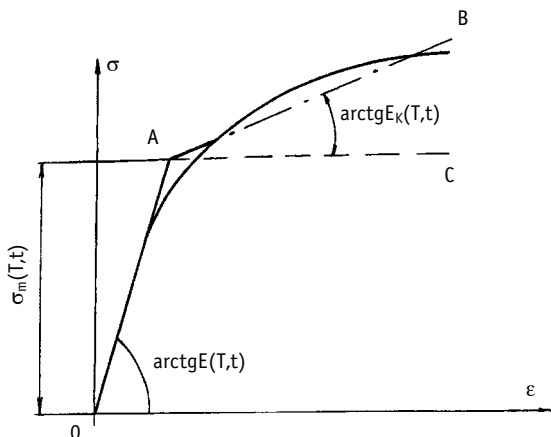


Рис. 2. Схема аппроксимации диаграммы деформирования

КРАТКОВРЕМЕННЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ ТВС ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ, ХАРАКТЕРНЫХ ДЛЯ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ

Необходимые для проведения расчетов термомеханики в аварийной ситуации изохронные кривые деформирования сплава Э-110 для интервала температур 450 ÷ 1200°С и времен нагружения до 300 секунд были построены по результатам кратковременных испытаний на растяжение с различными скоростями деформирования и кратковременных испытаний на ползучесть.

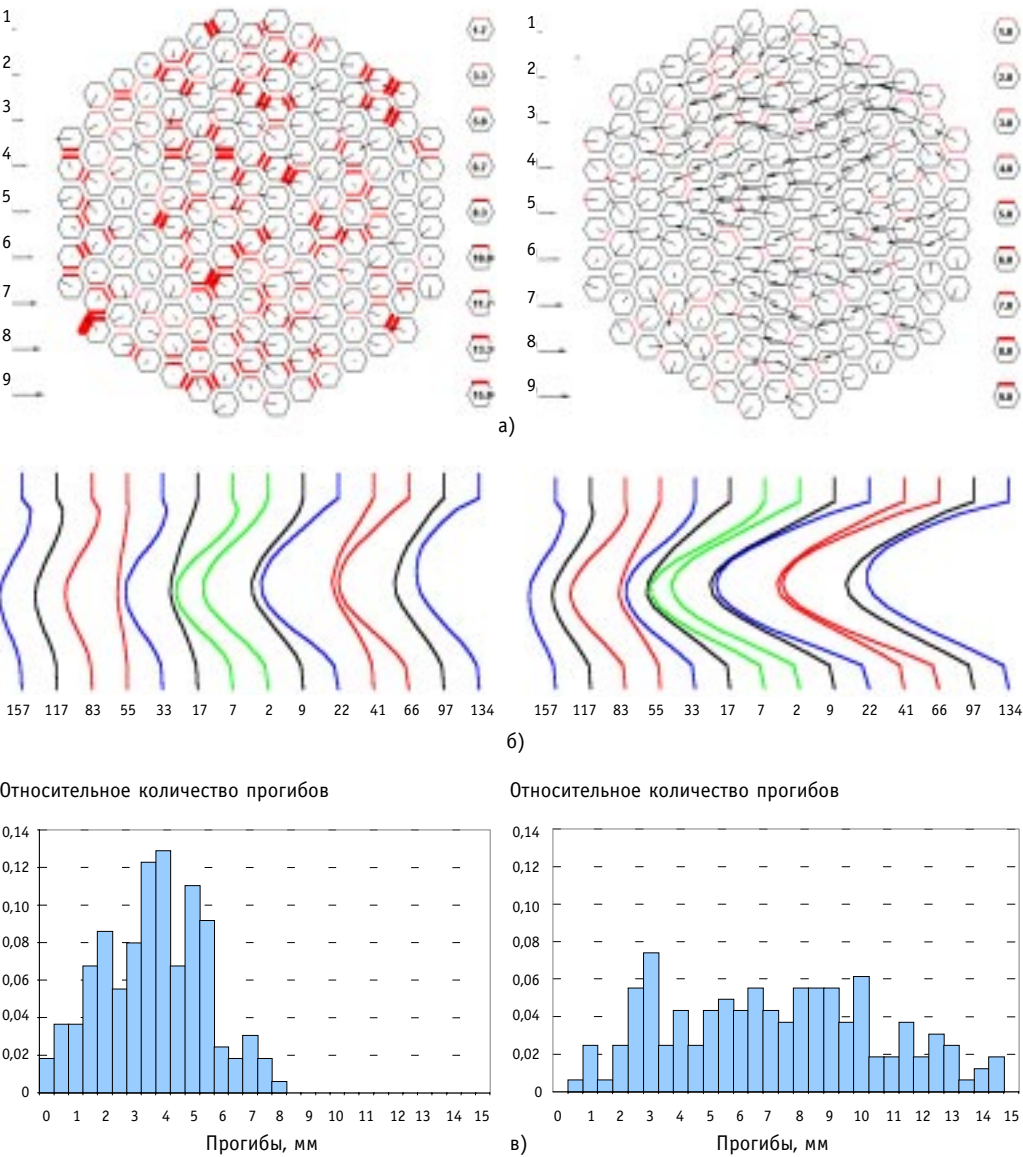


Рис.3. Результаты расчетного моделирования термомеханического поведения активной зоны в процессе аварии с разрывом трубопровода Ду 850: а) векторы смещений центров ТВС относительно проектных положений и усилия для 7-й ДР в конце топливного цикла для начала аварии и после аварии; б) проекции изогнутых осей в конце топливного цикла для начала аварии и после аварии; в) гистограмма прогибов кассет на уровне 7-й ДР в конце топливного цикла для начала аварии и после аварии

Согласно работе [4] влияние облучения на кратковременные механические свойства имеет место при температурах испытания, меньших 500°C. При температуре испытания выше 500°C условные пределы текучести облученного и необлученного материалов практически совпадают. Поэтому применение данных, полученных по результатам испытаний необлученных образцов, для исследования термомеханического поведения облученных ТВС в аварийной ситуации при температурах, превышающих 500°C, вполне правомерно.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛЬНЫХ РАСЧЕТОВ

Результаты демонстрационных расчетов термомеханического поведения активной зоны ВВЭР-1000 в аварии с разрывом трубопровода Ду 850, имеющей в своем составе загрузку так называемых ТВС-2 с жестким каркасом, приведены на рис. 3.

На рис. 3, а в горизонтальной плоскости, проходящей через центр активной зоны, показаны картограммы векторов смещений центров ТВС относительно проектных положений до (слева) и после (справа) аварии. Масштабы смещения (мм) кассет обозначены на рисунке шкалой масштабов. Контактные усилия между гранями ДР обозначены жирными линиями, шкала масштабов (кгс) которых также приведена на рисунках.

На рис. 3, б приведены проекции на вертикальную плоскость изогнутых осей ТВС в одном из рядов до и после аварии.

На рис. 3, в приведены гистограммы прогибов ТВС в том же поперечном сечении активной зоны до и после аварии.

Обращает на себя внимание тот факт, что в рассмотренных условиях протекания аварии деформирование ТВС-2 в составе зоны не носит катастрофического характера, несмотря на высокое пиковое значение температур твэлов (более 900°C) и направляющих каналов (до 700°C).

Причиной этого в целом положительного результата является то, что высокие температуры в НК при аварии действуют кратковременно (до 10 секунд) и, кроме того, создается благоприятное высотное распределение температур в активной зоне: как в нижней, так и в верхней части ТВС температуры в кассете оказываются существенно меньше, чем в центральной ее части. В этих условиях релаксация упругих натягов и деформирование элементов конструкции ТВС в верхней и нижней частях ТВС оказываются существенно меньшими, чем в центре. Концы ТВС “держат” конструкцию от изгиба, который резко возрос бы, если бы температура верхней части ТВС увеличилась.

В рассмотренном случае потери устойчивости кассет ТВС-2 под действием приложенных к ним нагрузок не происходит, а накопление деформаций ползучести каркаса ТВС оказывается ограниченным.

Литература

1. Троянов В.М., Лихачев Ю.И., Фоломеев В.И. Общая постановка исследований термомеханического поведения активной зоны ВВЭР-1000//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2002. - №2. - С.33-43.
2. 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. - С. 44-53.
3. Троянов В.М., Лихачев Ю.И., Фоломеев В.И. Моделирование термомеханического поведения ТВС в составе активной зоны ВВЭР-1000//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2002. - №3. - С.14-18.
4. Кобылянский Г.П., Новоселов А.Е. Радиационная стойкость циркония и сплавов на его основе. Справочные материалы. - Димитровград, 1996.

Поступила в редакцию 25.05.2002

ABSTRACTS OF THE PAPERS

УДК 621.039.586

Modeling of Corium Components Stratification at Severe Accident \ M.V. Kachtcheev; Editorial board of Journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2002. – 11 pages, 4 illustrations. – References, 13 titles.

The closed model of the stratification named a homogeneous and diffusion mathematical model of corium interaction with reactor vessel has been proposed. Heterogeneous mathematical model of corium interaction with reactor vessel under severe accident has been developed. The analysis of a possibility of its application for description of the corium components stratification has been made. According to the results of calculations a notable stratification of the mixture is observed. It is shown that the complete stratification, accepted in a number of publications, is impossible. Assumption of complete stratification is idealization, but it can be considered as an extreme, limiting occurrence.

УДК 621.039.54

Simulation of Thermomechanical Behaviour of Fuel Assemblies in 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. – 5 pages, 4 illustrations. – References, 4 titles.

A description is given for calculating the thermomechanical behaviour of fuel assemblies in the WWER-1000 reactor core. Input data is acquired both by measurement of the in-core FSA bowing during planned refueling as well as by neutronics and thermohydraulic calculations. Approximations, implemented to acquire complete input data needed, and calculation findings are presented. Typical results of the thermomechanics of the core are offered to depict in-core FSAs set bowing taking into account inter-FSAs interaction during their bending due to operation load impact.

УДК 621.039.54

Computational Simulation of Thermomechanical Behaviour of the WWER-1000 Reactor Core under Loss-of-Coolant Accidents \ 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. – 7 pages, 3 illustrations. – References, 4 titles.

Computation philosophy and components for calculating the thermomechanical behaviour of fuel assemblies (FSAs) in the WWER-1000 reactor core under loss-of-coolant accidents (LOCA), accompanied by structure temperature rise, are outlined. Situations with applied external loads (loading by a spring unit and by inter-FSAs interaction forces) are reviewed for elastic and viscous/plastic structure straining, induced softening under elevated temperature and accelerated thermal creep. The problem is featured by non-isothermal loading mode, therefore dedicated computation procedures should be implemented. The FSAs straining is analyzed within a set contributing to the reactor core; inter-FSAs interaction is taken into consideration [1, 2, 3].

УДК 621.039.54

The Procedure for Calculating Seismic Impact on 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. – 8 pages, 2 tables, 4 illustrations. – References, 6 titles.

Simulating calculation procedure and findings for straining the WWER-1000 reactor core under horizontal seismic impact are presented. Major statements, based on a linear-spectral method, are outlined. 3-D calculation of straining the in-core FSAs set has been carried out by implementing the RENDEZVOUS-S code.