

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ТВС В СОСТАВЕ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ВВЭР-1000\*

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

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



Представлено описание процедуры выполнения расчетов термомеханического поведения топливных кассет в составе активной зоны ВВЭР-1000. Исходными данными для расчетов служат измерения кривизны ТВС в составе активной зоны, выполняемые во время очередной перегрузки топлива, а также результаты нейтронно-физических и теплогидравлических расчетов. Обсуждаются приближения, используемые для получения полноты необходимых исходных данных, и интерпретация расчетных результатов. Приводятся характерные результаты расчетов термомеханики активной зоны, отражающие искривления ансамбля ТВС в составе активной зоны с учетом взаимодействия кассет между собой при их деформировании под действием эксплуатационных нагрузок.

Деформирование ТВС в составе активной зоны в нормальных условиях эксплуатации обуславливается следующими нагружающими факторами:

- весовая и гидравлическая распределенная осевая нагрузка;
- осевая сжимающая сила, приложенная к головке ТВС от пружинного блока;
- контактные поперечные силы взаимодействия соседних ТВС при нарушениях идеальной геометрии собственно кассет и посадочных мест во внутрикорпусных устройствах реактора;
- неоднородные поля температур в объеме ТВС, вызывающие деформирование кассет;
- неоднородные поля энерговыделения в твэлах топливной сборки, вызывающие их деформирование и как следствие – деформирование ТВС;
- неоднородные поля нейтронного потока, вызывающие неоднородный радиационный рост циркониевых сплавов, неоднородную релаксацию упругих натягов в конструкции ТВС, терморadiационную ползучесть конструкционных материалов в составе ТВС;
- термомеханические нагрузки в конструкции кассеты при разогреве-расхолаживании реактора.

Методические основы расчета термомеханического поведения ТВС в составе активной зоны ВВЭР-1000 под действием перечисленных нагрузок изложены в [1,2].

В качестве исходной информации для расчета термомеханики очередной кампании используются результаты измерений кривизны ТВС после предшествующей пе-

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

\* Работа выполнялась при содействии ОАО "ТВЭЛ".

регрузки топлива или результаты расчетного моделирования термомеханики предшествующей кампании и перегрузки. Наличие данных об измерениях кривизны ТВС в процессе перегрузки повышает точность расчетного прогноза.

В 1990-х гг. измерения кривизны ТВС во время перегрузок на различных блоках проводились регулярно [3], однако никогда не выполнялись измерения по всему объему активной зоны.

Типичный объем измерений приводится на рис. 1 [4]. Этих данных оказывается достаточно, чтобы обнаружить, во-первых, характерную величину искривлений ТВС (в данном случае – 10 мм в начале кампании), и, во-вторых, характерные направления векторов прогиба – преимущественно с образованием вихря вокруг центра активной зоны.

На рис. 2 приводятся типичные формы искривления кассет в начале и конце топливной кампании [4].

Для выполнения термомеханических расчетов активной зоны выполняется процедура дополнения недостающих данных по деформациям кассет. Используется гипотеза сдвиговой 60-градусной симметрии, согласно которой необмеренным кассетам приписываются такие же формы, как и обмеренным, с соответствующим изменением направления вектора прогиба.

Эта процедура приводит обычно к нарушению условий совместности деформации ТВС в составе активной зоны. Для устранения этого противоречия выполняется расчет термомеханики активной зоны по коду РАНДЕВУ-3 [1], исправляющий формы ТВС. Следствием этой операции является появление контактных сил взаимодействия между

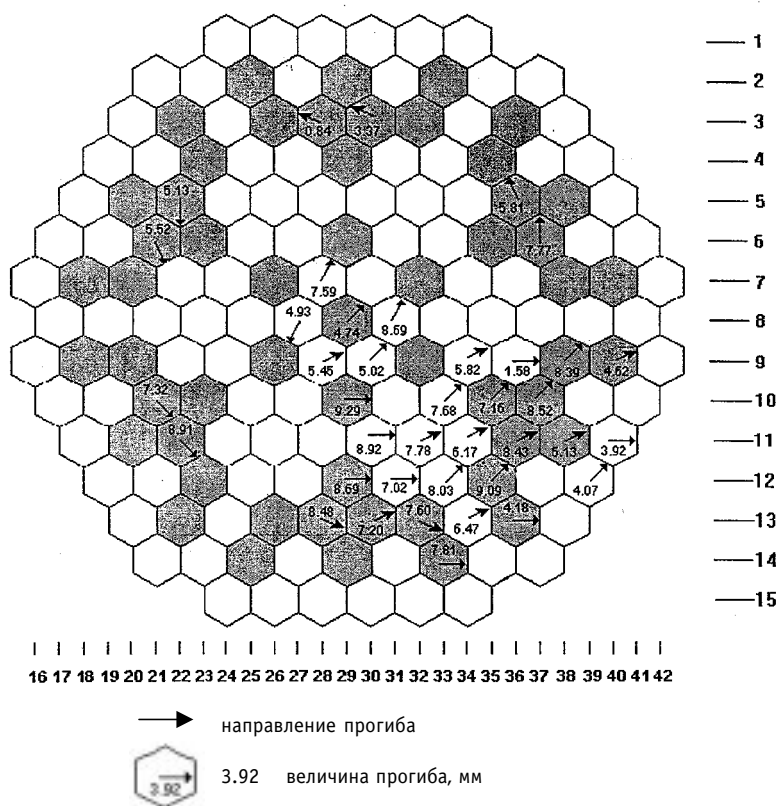


Рис. 1. Векторы прогиба ТВС в центральном сечении активной зоны. Начало 10-й топливной кампании, блок №1 Запорожской АЭС. В темных ТВС расположены кластерные поглощающие стержни

кассетами, учитываемых далее при расчете кампании.

Процедура проведения расчетов предусматривает следующее:

- расчет нагружения ТВС осевыми силами при нагружении пружинных блоков плитой БЗТ;
- расчет полей нейтронов, повреждающих доз, энерговыделения и температур в начале топливного цикла ( $t = 0$ );
- расчет деформаций ТВС при выходе реактора на мощность;
- расчет изменений нейтронных и тепловых полей за определенный интервал времени ( $\Delta t$ );
- расчет изменений усилий взаимодействия и деформаций ТВС в течение указанного шага по времени ( $\Delta t$ );
- выполнение процедуры пошагового расчета кампании с учетом дополнительного формоизменения ТВС, вызываемого циклическими переходными процессами;
- по завершении кампании проводится расчет изменения сил взаимодействия и деформаций ТВС при расхолаживании реактора и затем – снятии осевых усилий поджатия ТВС плитой БЗТ.

Результаты расчетов термомеханического поведения ТВС в составе активной зоны представляются в виде картограмм поперечных сечений активной зоны с изображением вектора смещения центральной оси ТВС и в виде проекций продольных осей ТВС на вертикальную плоскость, проходящую через ось активной зоны. Для анализа влияния водных зазоров между кассетами на локальные изменения энерговыделе-

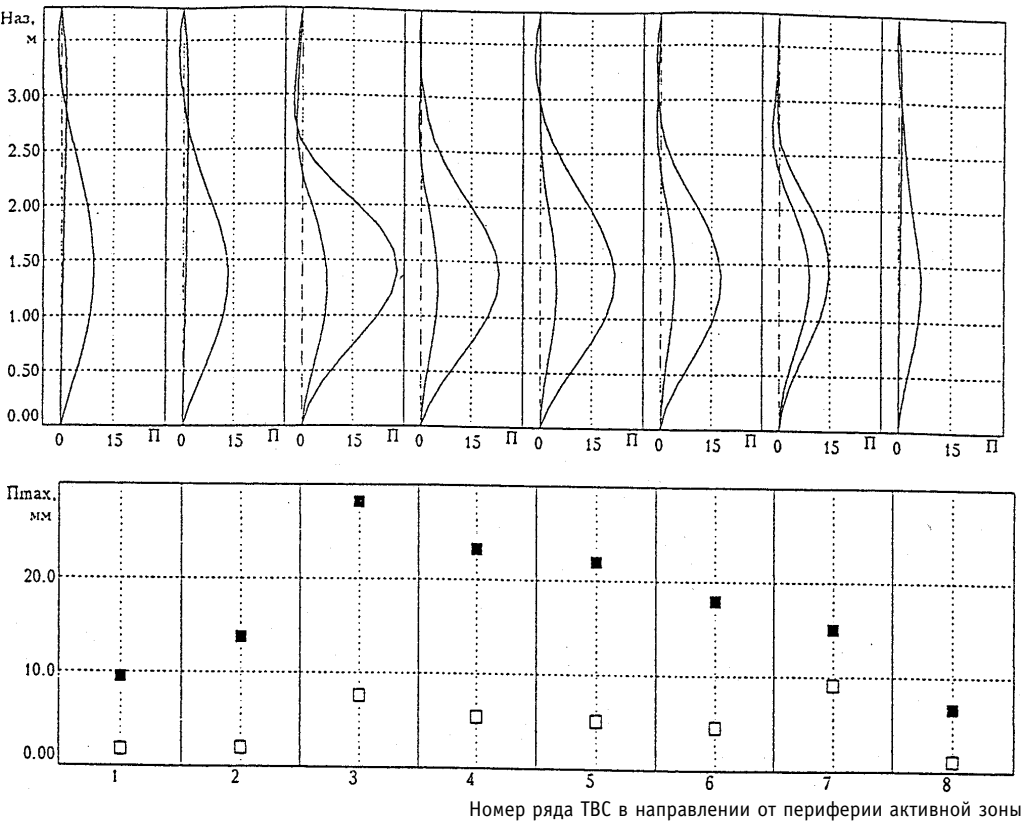


Рис.2. Формы искривлений направляющих каналов ТВС и значения максимальных изгибов в начале и конце 10-й топливной кампании. Блок №3 Ровенской АЭС

ния в твэлах представляется информация о величинах зазоров между кассетами.

Типичная картина формоизменения кассет в начале и в конце топливного цикла представлена на рис. 3. В процессе проведения расчетов с целью верификации расчетных методов неоднократно проводилось сравнение расчетных результатов с экспериментальными, полученными при измерениях кривизны ТВС в процессе перегрузки. В результате этих сравнений было установлено следующее:

- при проведении практических расчетов не представляется возможным учесть индивидуальные особенности отдельных кассет (например, сборочные натяги в твэльных ячейках дистанционирующих решеток, геометрические несовершенства кассет, жесткость пружинного блока), а также геометрические несовершенства посадочных мест внутрикорпусных устройств реактора, поэтому прогноз формоизменения отдельных кассет может быть сделан с довольно большой погрешностью;

- удается получить довольно хорошее статистическое совпадение расчетных результатов искривлений кассет и межкассетных зазоров с экспериментальными результатами.

Это статистическое совпадение хорошо иллюстрируется с помощью гистограмм распределения прогибов ТВС для отдельных сечений активной зоны.

На рис. 4 представлены гистограмма прогибов ТВС в активной зоне в плоскости поперечного сечения, а так же гистограмма межкассетных зазоров.

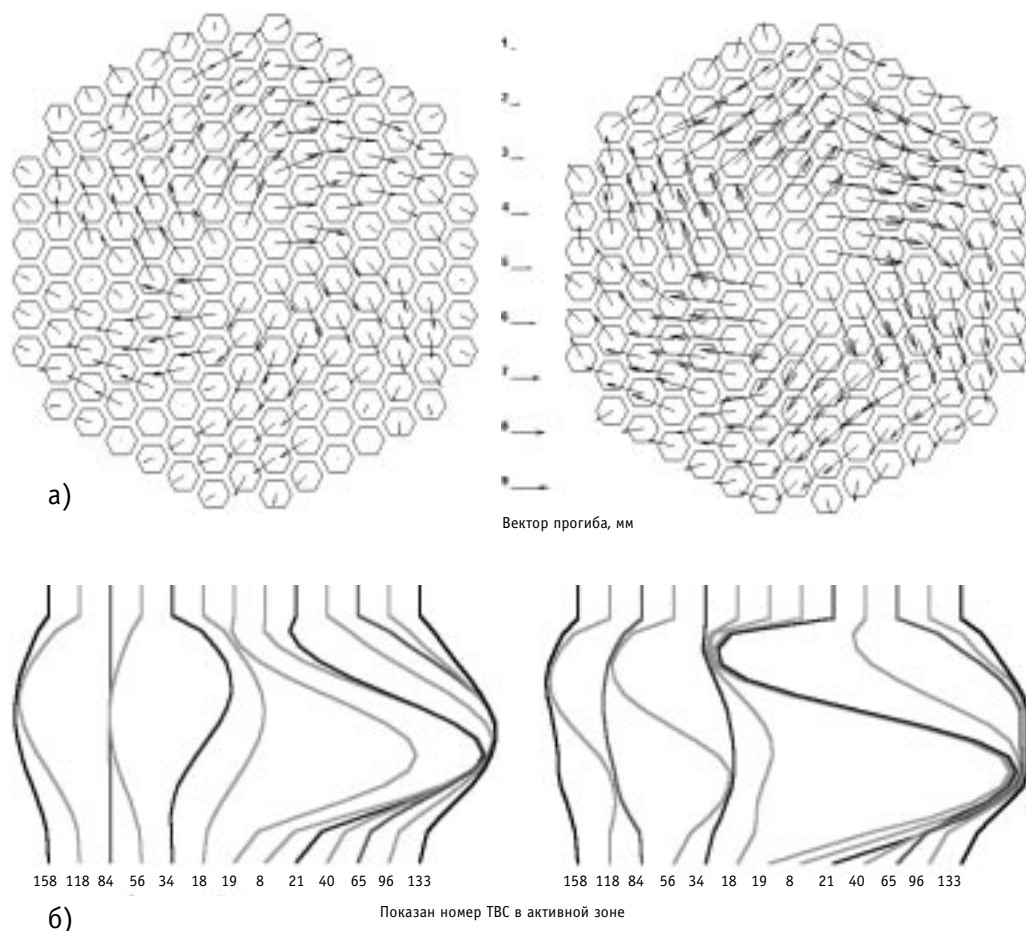


Рис. 3. Типичная картина формоизменения ТВС в составе активной зоны ВВЭР-1000 в начале топливной кампании (слева) и в конце (справа) в плоскости поперечного сечения (а) и продольного (б)

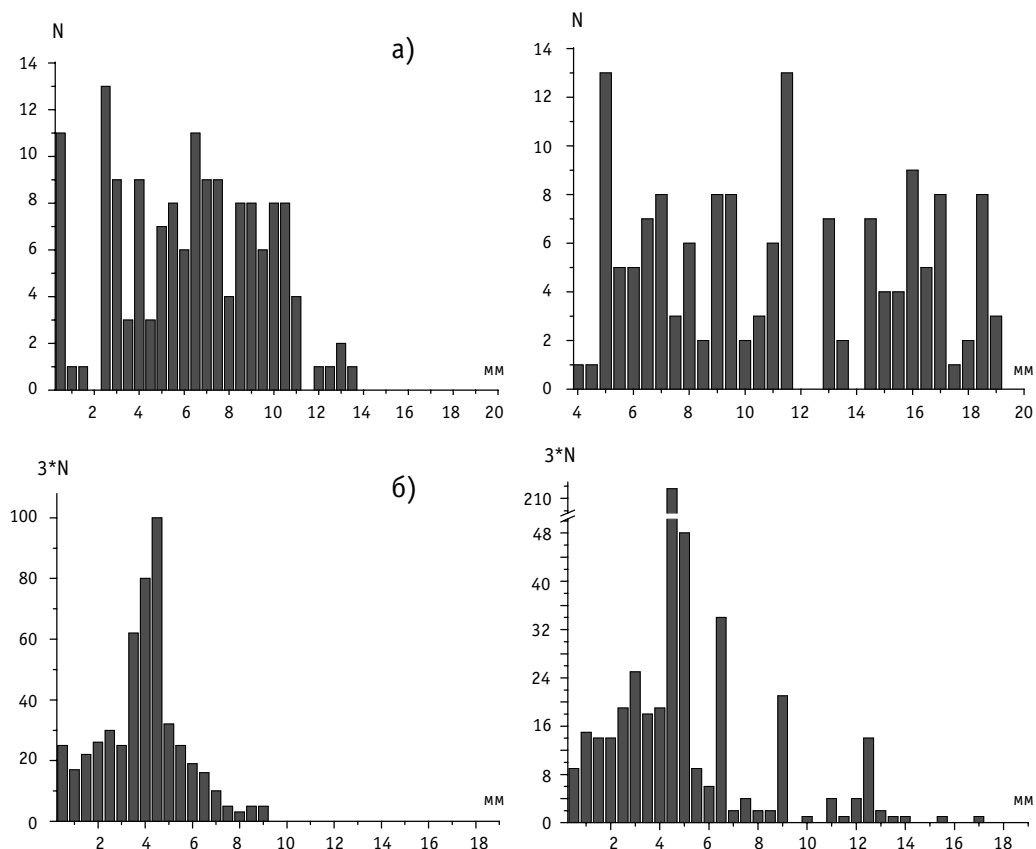


Рис. 4. Гистограммы прогибов ТВС в активной зоне (а) и межкассетных зазоров (б) в начале топливной кампании (слева) и в конце (справа)

Практика показывает, что именно такие статистические результаты наиболее правильно характеризуют термомеханическое состояние активной зоны. Эти результаты позволяют выполнить сравнительную оценку состояния различных активных зон, оценить эффективность внедрения тех или иных мероприятий по совершенствованию конструкции ТВС, совершенствованию топливных циклов, применению различных схем перегрузок. Статистические данные по межкассетным зазорам позволяют выполнить оценку безопасности активной зоны при эксплуатации с позиций обеспечения приемлемых величин неравномерностей энерговыделения.

## 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. - № 2. – С. 44-53.
3. Schmelev V. Results and Analysis of Bow Measurements at NPP. PWR and WWR fuel assembly bow. Workshop in Rez, February 1998.
4. Afanasyev A.A., Ignatenko I. The Summary Experience of the Ukrainian Reactor Core (WWER-1000) Operation with Fuel Assembly Bow. PWR and WWR fuel assembly bow. Workshop in Rez, February 1998.

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.