

# МЕТОД РАСЧЕТА НА СЕЙСМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ВВЭР-1000\*

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

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



Рассмотрен метод и результаты модельного расчета деформирования активной зоны ВВЭР-1000 при горизонтальном сейсмическом воздействии. Приведены основные положения расчета, основанные на применении линейно-спектрального метода. Трехмерный расчет деформирования ансамбля ТВС в активной зоне выполняется с помощью кода РАНДЕВУ-С.

## ВВЕДЕНИЕ

При сейсмическом воздействии на АЭС наиболее опасным для активной зоны является горизонтальное направление ударного нагружения. Поэтому именно оно рассматривается в статье.

При горизонтальном сейсмическом воздействии на активную зону происходит совместная деформация ансамбля кассет в пределах зазоров между ДР отдельных ТВС и между ДР периферийных ТВС и выгородкой. Под действием сейсмической нагрузки ТВС изгибаются в определенном направлении и собираются возле выгородки, максимально нагружая крайнюю к выгородке кассету. Сжимающие ТВС усилия могут вызвать недопустимые деформации дистанционирующих решеток, твэлов или НК. Поэтому необходимо определить возможные усилия, сжимающие ТВС при сейсмическом воздействии на активную зону при различных интенсивностях землетрясения.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Расчет ансамбля ТВС, составляющих активную зону, на сейсмическое воздействие может быть проведен линейно-спектральным методом или методом динамического анализа [1, 2].

При использовании метода динамического анализа для проведения расчетов должны быть известны акселерограммы движения опорных конструкций реактора, которые задают внешнее сейсмическое воздействие. При выполнении проектных работ активной зоны серийных АЭС (В-320) такие акселерограммы отсутствуют.

Для проведения расчетов на горизонтальное сейсмическое воздействие линейно-спектральным методом необходимо знать обобщенные спектры ответа горизонтальных колебаний при определенной величине относительного демпфирования и заданной балльности сейсмичности площадки АЭС. Такие обобщенные спектры ответа, рекомендованные для оборудования и трубопроводов в составе унифицированных АЭС с ВВЭР-1000, приведены в «Нормах расчета на прочность...» [3]. Поэтому расчет на

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

\* Работа выполнялась при содействии ОАО "ТВЭЛ".

сейсмическое воздействие ТВС активных зон ВВЭР-1000 проводится линейно-спектральным методом, согласно «Нормам...» [3].

Для определения сейсмических нагрузок в направлении, перпендикулярном оси ТВС (при горизонтальном сейсмическом воздействии на активную зону), необходимо определить собственные частоты и формы колебаний кассеты в соответствующем направлении. Указанные параметры колебаний кассеты находятся из модального анализа, в котором решаются уравнения линейных систем

$$[K]\{X_j\} = \omega_j^2 [M]\{X_j\} \quad (1)$$

где  $[K]$  и  $[M]$  – матрицы жесткостей и масс,  $\{X_j\}$  – вектор форм колебаний для моды  $j$ ,  $\omega_j$  – собственная окружная частота моды  $j$ .

Для бесчехловой кассеты ВВЭР-100, представляющей собой сложную многосвязную стержневую систему, указанная задача решается с помощью конечно-элементных кодов, например, “UZOR” (разработан в РНЦ «КИ» [4]), “ANSYS” (США) и др. При проведении модального анализа кассеты граничные условия на ее концах должны имитировать штатные закрепления головки и хвостовика ТВС. Необходимо также учитывать присоединенную массу теплоносителя.

Согласно линейно-спектральному методу сейсмическая нагрузка, соответствующая  $j$ -й форме собственных колебаний системы, определяется по формуле

$$S_{ij} = m_{ij} \ddot{\Phi}_j \Phi_j X_{ij}, \quad (2)$$

где  $\ddot{\Phi}_j$  – ускорение, определяемое по спектру ответа горизонтальных колебаний (см. рис. П.9.1 из “Норм...” [3]) для собственной круговой частоты  $\omega_j = 2\pi f_j$ ;

$$\Phi_j = \frac{\sum_{i=1}^N m_{ij} X_{ij}}{\sum_{i=1}^N m_{ij} X_{ij}^2} \quad (3)$$

– постоянная  $j$ -й формы колебаний;  $\{X_{ij}\} = \{X_{1j} \dots X_{ij} \dots X_{Nj}\}$  –  $j$ -й собственный вектор, соответствующий собственной частоте  $\omega_j$ ;  $j$ -ой формы колебаний, определяемый согласно формам собственных колебаний ТВС, полученным из модального анализа;  $m_{ij}$  – масса  $i$ -го элемента системы;  $N$  – число элементов в системе (число участков, на которые разделяется ТВС при рассмотрении одной кассеты,  $N \approx 30$ ).

При определении сейсмических нагрузок в расчете следует учитывать только “ $S$ ” низших форм колебаний, собственная частота которых  $f$  не превышает наибольшую частоту  $f_{max}$ , для которой заданы спектры ответа ( $f_{max} = 25$  Гц, согласно “Нормам...” [3]).

Внутренние усилия в  $K$ -ых элементах расчетной модели ТВС определяют от действия статически приложенных сейсмических нагрузок  $S_{ij}$  отдельно и суммируют для каждой  $j$ -ой формы колебаний по формуле

$$N_K = \sqrt{\sum_{j=1}^S N_{Kj}^2}, \quad (4)$$

где  $S$  – номер максимальной частоты,  $N_K$  – расчетное усилие в  $K$ -ом рассматриваемом сечении;  $N_{Kj}$  – усилие в  $K$ -м сечении для  $j$ -й формы колебаний.

Относительные перемещения расчетной модели ТВС для  $j$ -ой формы колебаний определяют по следующей зависимости:

$$V_{ij} = \frac{1}{\omega_j^2} \ddot{\Phi}_j \cdot \Phi_j \cdot X_{ij}. \quad (5)$$

Расчетное значение результирующего перемещения  $i$ -го элемента ТВС определяется по формуле

$$V_i = \sqrt{\sum_{j=1}^S V_{ij}^2}. \quad (6)$$

При этом должно выполняться следующее условие:

$$\frac{\omega_K - \omega_{K-1}}{\omega_K} > 0,1. \quad (7)$$

Если условие (7) не выполняется, то результирующее перемещение ТВС находят как

$$V_i = \sqrt{\sum_{j=1}^S V_{ij}^2 + \sum_{r=1}^P \left\{ \sum_{m=1}^{nr} |V_{mr}| \right\}^2}, \quad (8)$$

где  $P$  – количество групп собственных частот, для которых выполняется условие

$$\frac{\omega_K - \omega_{K-1}}{\omega_K} < 0,1. \quad (9)$$

Для проведения расчетов сейсмических нагрузок, действующих на ТВС при землетрясениях, разработан специальный блок к программе “ТЕРЕМОК” [5]. Новая версия программы названа “ТЕРЕМОК-С”. Она внедрена в расчетный код “РАНДЕВУ-С”, позволяющий рассчитывать усилия и деформации ансамбля ТВС в активной зоне при

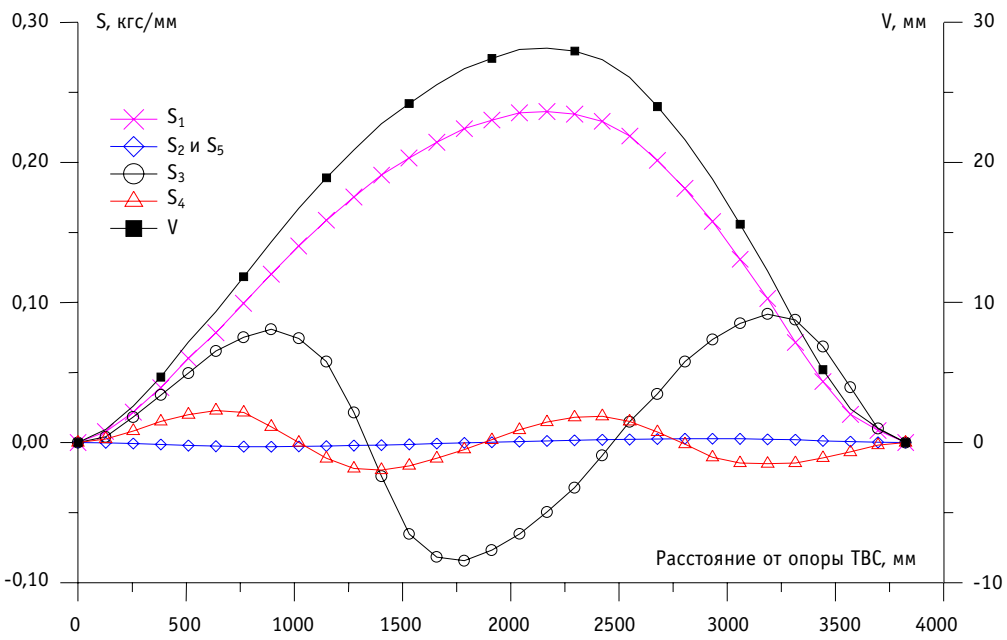


Рис.1. Распределение по длине ТВС-2 сейсмических нагрузок и результирующие перемещения кассеты для интенсивности землетрясения  $\ddot{\Phi} = g$  (8-балльное землетрясение)

сейсмическом воздействии, разработанный на основе кода "РАНДЕВУ-3" [6].

На рис. 1 показаны результаты проведенных по программе "ТЕРМОК-С" расчетов сейсмических нагрузок для пяти форм колебаний и результирующего перемещения кассеты, имеющей собственные частоты  $f_1 = 3,383$  Гц,  $f_2 = 7,505$  Гц,  $f_3 = 11,643$  Гц,  $f_4 = 17,025$  Гц и  $f_5 = 22,602$  Гц, определенные по коду "UZOR" [4] в РНЦ "КИ".

В расчетах получены значения  $\Phi_1 = 1,291$ ;  $\Phi_2 = -0,016$ ;  $\Phi_3 = 0,501$ ;  $\Phi_4 = 0,126$ ;  $\Phi_5 = -0,01$ .

Поскольку для различных реальных реакторных установок будут различные кривые обобщенных спектров ответа горизонтальных колебаний, то реальные значения ускорений, соответствующие согласно спектрам ответа различным собственным частотам  $f_1 \div f_5$  в обобщенном для ряда реакторов расчете, определить не представляется возможным.

Поэтому для расчетных оценок принят консервативный подход, состоящий в том, что для всех частот  $f_1 \div f_5$  берется одинаковое приведенное ускорение  $\ddot{\varphi}$ , равное максимальному значению ускорения согласно спектру отклика для этих частот.

На рис. 1 даны сейсмические нагрузки и перемещения кассеты для интенсивности землетрясения с приведенным ускорением  $\ddot{\varphi} = g$  (8-балльное землетрясение).

Как видно из рис. 1, основной вклад в сейсмическую нагрузку дает первая форма, вклады второй и пятой форм ничтожно малы, а третья и четвертая формы дают постепенно затухающие вклады.

Для проведения расчетов при заданной балльности землетрясения площадки АЭС можно использовать зависимости обобщенных спектров ответа горизонтальных колебаний, рекомендованных в "Нормах..." [3] для оборудования в составе унифицированных АЭС с ВВЭР-1000.

Для сейсмичности площадки 8 баллов и отметки расположения реактора 0 м из рис. П.9.1 и табл. П.9.1 "Норм..." [3] имеем значение приведенного ускорения  $\ddot{\varphi} \approx g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>.

## ДЕФОРМИРОВАНИЕ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Для оценки горизонтального сейсмического воздействия на активную зону ВВЭР-1000 с ТВС-2, имеющей жесткий каркас НК и ДР, рассматриваются последствия действия землетрясения в конце кампании для установившегося 4-годового топливного цикла.

Деформации ансамбля ТВС, составляющих активную зону реактора, под действием сейсмического нагружения с учетом начального стартового состояния активной зоны рассчитывались с помощью версии кода "РАНДЕВУ-С".

Учитывались искривления кассет, силы взаимодействия между ними и их состояния в момент, предшествующий землетрясению.

Рассматривалось сейсмическое деформирование кассет активной зоны для двух направлений ударов:

- по оси ОХ, когда сейсмические нагрузки действуют по линии с угла на угол кассеты;
- по оси ОУ, когда сейсмические нагрузки направлены по линии, перпендикулярной граням кассет.

Были проведены расчеты деформирования ансамбля кассет реактора ВВЭР-1000 под действием сейсмических нагружений различной интенсивности для ряда значений приведенных ускорений  $\ddot{\varphi} = 0,25g; 0,5g; 0,75g; g; 1,25g; 1,5g; 1,6g; 1,75g$  и  $2,0g$ .

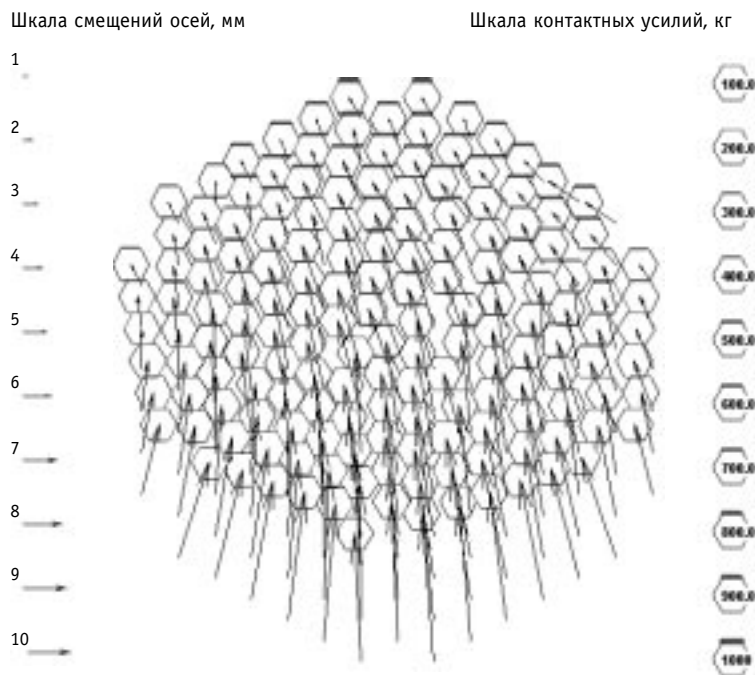


Рис.2. Расчетная картограмма смещения кассет, векторы смещений центров ТВС относительно проектных положений, усилия взаимодействия и зазоры между гранями ДР кассет на уровне 7 ДР. Для ускорения  $\ddot{\varphi}_x = g$

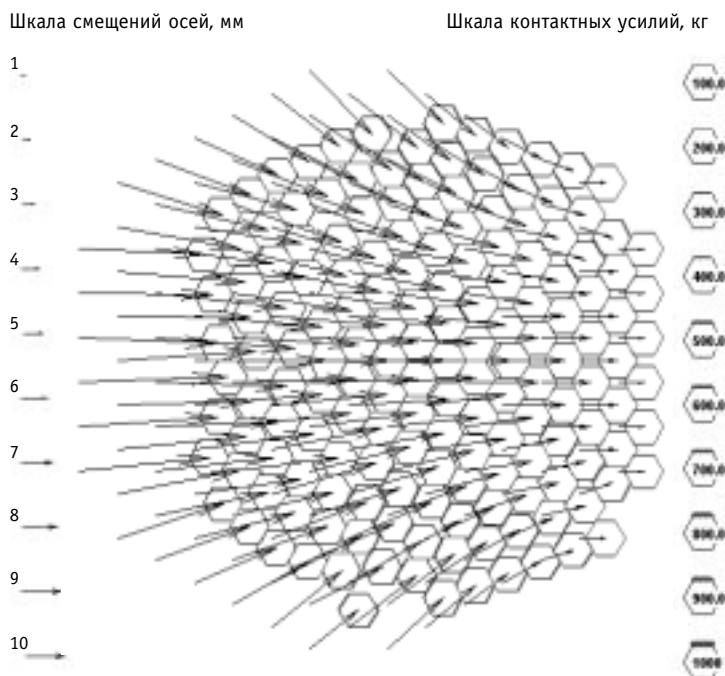


Рис.3. Расчетная картограмма смещения кассет, векторы смещений центров ТВС относительно проектных положений, усилия взаимодействия и зазоры между гранями ДР кассет на уровне 7 ДР. Для ускорения  $\ddot{\varphi}_y = g$

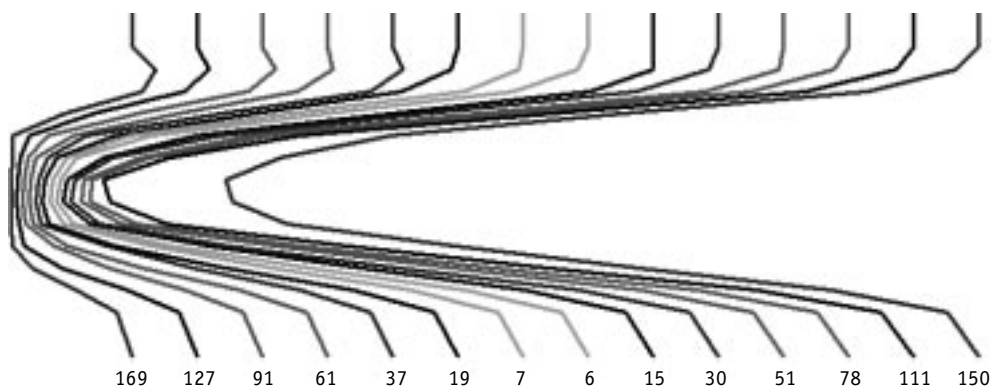


Рис. 4. Проекция изогнутых осей. Для ускорения  $\ddot{\varphi}_y = g$

На рис. 2-4 приведены результаты расчетов для приведенного ускорения при сейсмическом воздействии, равного  $\ddot{\varphi} = g$ . Расчетные картограммы смещений кассет, векторы смещений центров ТВС относительно проектных положений, усилия взаимодействия и зазоры между гранями ДР-кассет в центральной по высоте активной зоны сечения для двух направлений ударов приведены на рис. 2, 3.

Проекция изогнутых осей кассет на вертикальную плоскость, проходящую через проектные положения центров ТВС с обозначенными номерами, для направления удара по оси ОУ даны на рис. 4. Масштабы прогибов осей ТВС и зазоров между гранями ДР определяются расстоянием между верхними концами осей, равным 2,8 мм в горячем состоянии.

Из сравнения результатов расчетов поведения ТВС активной зоны при горизонтальном сейсмическом воздействии с различными значениями приведенных ускорений  $\ddot{\varphi} = 0,25g \div 2,0g$  можно сделать следующие заключения.

Для больших значений  $\ddot{\varphi}$  ( $1,0g \div 2,0g$ ) картограммы смещений кассет и проекция изогнутых осей аналогичны приведенным на рис. 2-4, но нагрузки на ТВС существенно возрастают с ростом  $\ddot{\varphi}$ .

Из рассмотрения рис. 2-4 видно, что при значениях приведенных ускорений  $\ddot{\varphi} > g$  кассеты при сейсмическом воздействии собираются в плотную упаковку, давя друг на друга и на часть выгородки, на которую направлен удар.

Прилегающие к ударяемой части выгородки ТВС выгибаются вдоль выгородки; при этом они оказываются наиболее нагруженными сжимающими усилиями.

Для приведенных ускорений  $\ddot{\varphi} < g$  кассеты при сейсмическом воздействии не полностью собираются в плотную упаковку, часть из них остается висеть. Только ряды крайних к выгородке кассет выбирают зазоры между гранями ДР и выгородкой и ударяют по выгородке.

Из рис. 2 и 3 также видно, что характер деформирования ансамбля кассет при сейсмическом воздействии в направлениях осей ОХ и ОУ различен. При нагружении вдоль оси ОХ кассеты ансамбля как бы "встают в распор" и в большей степени нагружают две "боковые" (верхнюю и нижнюю) стороны выгородки, нежели "заднюю" сторону выгородки, на которую направлен удар. Поэтому наибольшие сжимающие нагрузки испытывают ТВС, прижатые к "боковым" сторонам выгородки, а не к "задней" стороне.

При нагружении вдоль оси ОУ кассеты ансамбля нагружают, в основном, "заднюю" сторону выгородки, и наибольшие сжимающие нагрузки испытывают ТВС, прижатые к этой стороне.

Таблица 1

**Значения сжимающих усилий (Н) на гранях ТВС при сейсмическом воздействии в направлении от угла к углу кассеты**

$\ddot{\varphi}$ /g	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,60	1,75	2,00
ДР №4	0	0	0	0	173	244	456	1042
ДР №5	12	467	1437	3057	5181	6130	7526	10019
ДР №6	336	1894	3899	6205	7613	8429	9276	9736
ДР №7	448	1031	2759	4825	6584	7337	8350	9307
ДР №8	189	826	1812	3046	4935	5680	6825	8710
ДР №9	0	0	92	395	814	983	1328	2036

Таблица 2

**Значения сжимающих усилий (Н) на гранях ТВС-2 при сейсмическом воздействии в направлении от грани к грани кассеты**

$\ddot{\varphi}$ /g	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,60	1,75	2,00
ДР №4	0	0	0	183	417	588	840	1426
ДР №5	44	801	2462	4460	7043	8103	9827	12904
ДР №6	1194	3139	5941	8691	10422	10946	11868	12905
ДР №7	1655	2781	4770	7517	9744	10599	11713	13497
ДР №8	310	1521	3097	5140	7450	8461	9938	12449
ДР №9	0	0	223	616	1199	1496	2018	3086

Максимальные значения сжимающих грани ДР ТВС усилий на уровнях 4-й, 5-й, 6-й, 7-й, 8-й, 9-й ДР для сейсмического нагружения вдоль осей ОХ и ОУ при различных значениях приведенных ускорений  $\ddot{\varphi}$  даны в табл. 1, 2.

ДР №6 и №7 расположены вблизи от среднего сечения по высоте активной зоны.

Указанные значения сжимающих ДР усилий могут быть использованы для проектного обоснования прочности ТВС при сейсмическом нагружении с заданными значениями приведенных ускорений  $\ddot{\varphi}$ , соответствующими максимальному расчетному и проектному землетрясениям конкретного блока АЭС.

Для обоснования целостности конструкции ТВС при таком нагружении необходимо провести испытания моделей ТВС на смятие при воздействии максимальной поперечной нагрузки, полученной из расчетного прогнозирования.

В процессе динамического сейсмического воздействия на активную зону на первом этапе происходит однонаправленное деформирование ТВС, вызывающее одностороннее нагружение выгородки в направлении сейсмического удара, и возникновение сжимающих сил взаимодействия между кассетами. Характерная длительность этого этапа сейсмического воздействия 0,1 секунды.

Затем на последующих этапах нагружения происходит упругая отдача продеформированных и прижатых к выгородке кассет, которые получают обратное движение с возникновением затухающих осцилляций. При этом искривления кассет на первом этапе сейсмического нагружения максимальны по величине. В последующих осцилляциях искривления уменьшаются за счет диссипации энергии, вызываемой силами трения внутри кассет и кассет между собой, а также сопротивлением среды (теплоносителя).

### **Литература**

1. Бирбаер А.Н., Шульман С.Г. Прочность и надежность конструкций АЭС при особых динамических воздействиях. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
2. Бирбаер А.Н. Расчет конструкций на сейсмичность. – С.-Пб.: Наука, 1998.
3. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. ПНАЭ Г-7-002-86. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
4. Киселев А.С., Киселев А.С., Даничев В.В. аннотация программы "UZOR"//Вант. Сер. Физика ядерных реакторов. – 1999. - Вып. 1. - С. 109-113.
5. 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.
6. 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.

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.