

670 млрд руб., достичь существенного (двукратного) превышения накопленной выручки и инвестиционного ресурса в 2014—2035 гг., избежать изыскания финансовых средств на консервацию и вывод из эксплуатации, сохранить экономическую устойчивость АО «Концерн Росэнергоатом», а также загрузку мощностей предприятий ядерного топливного цикла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Потребление** электроэнергии в ЕЭС России в 2016 году увеличилось на 1,8% по сравнению с 2015 годом. Пресс-релиз. М.: СО ЕЭС, 2017.
2. **Адамов Е.О.** Вопрос о срочном выводе реакторов типа РБМК больше не актуален. — Nucl. Saf., 2013, № 2, с. 14—17.
3. **Адамов Е.О., Михайлов М.Н., Петров А.А. и др.** Восстановление ресурсных характеристик реакторной установки 1-го энергоблока Ленинградской АЭС. — В сб.: Годовой отчет НИКИЭТ-2014. М., НИКИЭТ, 2014, с. 72—78.
4. **Анализ** показателей балансов электрической энергии и мощности ЕЭС России за IV квартал 2015 года. М.: СО ЕЭС, 2016.
5. **Анализ** информации о нарушениях в работе АЭС России в 2016 г. М., ВНИИАЭС, 2017.

УДК 621.039.526

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ КЛАДКИ РБМК-1000 ПРИ РАЗРЫВЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КАНАЛА

*Рябов А.А., Романов В.И., Куканов С.С., Циберев К.В. (РФЯЦ — ВНИИЭФ, г. Саров),
Европин С.В., Рахманов А.П. (АО «НИКИЭТ», г. Москва)*

Надежное решение проблем безопасности ядерных энергетических установок в нормальных условиях и возможных аварийных ситуациях лежит в основе успешного развития атомной отрасли. Для канальных водографитовых реакторов в качестве одной из проектных аварий рассматривается разрыв технологического канала и последствия разрушения для окружающих графитовых колонн и каналов. Эта задача решалась для недеформированной кладки реактора как расчетными методами, так и экспериментально в стендовых условиях без учета формоизменения колонн. После регистрации на 1-м энергоблоке Ленинградской АЭС искривления технологических каналов свыше установленного регламентом эксплуатации была разработана технология и осуществлен ремонт кладки с частичным выпрямлением каналов. Таким образом, разрыв канала вновь стал актуальным, но уже для отремонтированной кладки с разрезанными графитовыми блоками и искривлением каналов. В данной постановке анализ возможных последствий разрыва потребовал расчетного моделирования эксплуатационных и аварийных процессов, протекающих в активной зоне РБМК-1000, на суперкомпьютере в объемной постановке.

Ранее расчеты прочности графитовой кладки реакторных установок типа РБМК-1000, в основном, ограничивались анализом локальных эффектов (усадка—распухание, терморадационное деформирование графитовых блоков, об-

разование в них трещин). Расчет всей кладки реакторной установки с учетом взаимодействия составляющих элементов затруднен по объективным причинам:

большое число взаимодействующих элементов кладки — более 50 тыс. графитовых блоков, почти 2,5 тыс. каналов разного типа, графитовые кольца и др.;

зависящие от зазоров контакты между элементами конструкции активной зоны, значительно изменяющиеся как при нормальной эксплуатации, так и в большей степени в аварийных условиях;

связность термодинамических и деформационных процессов, особенно в условиях аварийного разрыва технологического канала.

При аварийном разрыве технологического канала, сопровождающемся истечением теплоносителя, зазоры между элементами активной зоны в области разрыва могут возрастать в сотни раз за счет смещения графитовых блоков и деформации кладки в объеме активной зоны, что необходимо учитывать в расчетах. В настоящее время благодаря развитию кластерных вычислительных ресурсов и отечественных высокопараллельных программных средств появилась возможность компьютерного моделирования деформации графитовой кладки всей активной зоны.

В настоящей работе на основе расчетного трехмерного моделирования на супер-ЭВМ исследуется напряженно-деформированное состо-

яние необлученной и облученной кладки через один год эксплуатации после ремонта энергоблоков АЭС с РБМК-1000 при аварийном разрыве технологического канала.

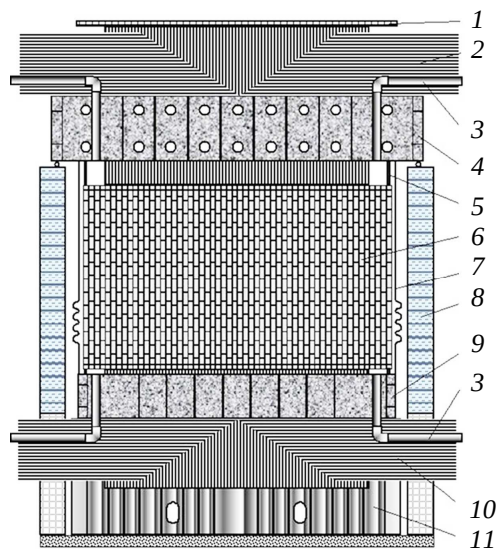
Постановка задачи. Общий вид реакторной установки РБМК-1000 показан на рис. 1. По внешней форме графитовая кладка близка к цилиндру радиусом около 7 м. В нее входят 2488 вертикальных графитовых колонн высотой 8 м. Каждая колонна набирается из 14 графитовых блоков высотой 200—600 мм, сечением 250×250 мм. Аксиальные стыки между соседними блоками в соседних колоннах находятся на разной высоте. Технологический канал представляет собой составную трубную конструкцию длиной 18,34 м, массой 260 кг. Он состоит из верхней и нижней стальных и средней циркониевой частей. Внешний диаметр циркониевой трубы 88 мм, толщина стенки с учетом допусков 3,8—4,6 мм. Циркониевая труба и стальные части стыкуются методом диффузионной сварки. Верхняя часть технологического канала крепится к верхнему тракту сварным швом, нижняя соединяется с трактом теплоносителя через сильфон. Температура циркониевой части в нормальных условиях может достигать 285 °С при внутреннем избыточном давлении 7 МПа.

Графитовая кладка сверху замыкается на стальной блок, который соединен с фланцем цилиндрического переходника, образующего

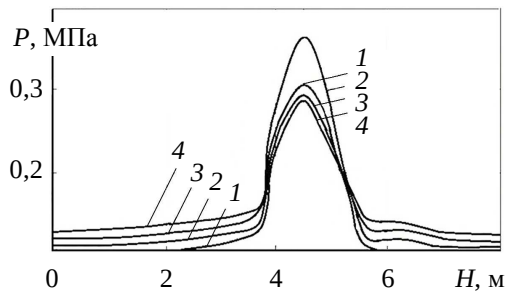
скользящий по вертикали стык с приваренной к нижней плите верхнего перекрытия цилиндрической трубой. Телескопический стык является компенсатором вертикальных тепловых смещений графитовых колонн, обусловленных высокой температурой при работе реактора. В средней части для улучшения теплоотвода от графитовой колонны к технологическому каналу на каждый канал в пределах активной зоны устанавливаются разрезные графитовые кольца двух типоразмеров, которые последовательно чередуются в вертикальном направлении: одно кольцо — с натягом по трубе канала, другое — с натягом в отверстии графитового блока. Внизу каждая графитовая колонна устанавливается на металлический опорный стакан, приваренный к верхней плите нижнего перекрытия.

Анализ силовой схемы активной зоны показывает, что основные элементы конструкции имеют независимое крепление. Технологические каналы закреплены по верхнему перекрытию, графитовые колонны устанавливаются на нижнее перекрытие. Термосиловая связь в горизонтальном направлении между технологическими каналами и графитовыми колоннами осуществляется через разрезные графитовые кольца.

Исследуется нестационарное напряженно-деформированное состояние конструкции активной зоны реакторной установки с исходной необлученной и облученной графитовой кладкой, деградированной кладкой через один год после ремонта при воздействии пароводяной смеси из единичного разрыва технологического канала в различных областях активной зоны. Рассматривается разрыв канала на середине высоты (между отметками 4,325 и 4,925 м от верхней грани нижнего металлического блока). Предполагается, что в результате разрыва технологического канала графитовый блок разрушается, струя истекает в воздушные зазоры между соседними блоками, наиболее нагруженным является «крест» 3, на угловую колонну которого непосредственно воздействует струя. «Кресты» 1, 2 и 4 менее нагружены. Давление пароводяной смеси рассчитано на основе методики [1] для двух случаев: разрыв технологического канала в необлученной кладке проектных размеров и разрыв технологического канала в облученной кладке, графитовые блоки которой деформированы в результате радиационной ползучести и имеют трещины шириной от 1 до 10 мм.



Р и с. 1. Общий вид реакторной установки РБМК-1000: 1 — плитный настил; 2 — пароводяные коммуникации; 3 — трубопроводы системы защиты реакторного пространства; 4 — верхняя металлоконструкция; 5 — каналы охлаждения отражателя; 6 — графитовая кладка; 7 — кожух; 8 — боковая биологическая защита; 9 — нижняя металлоконструкция; 10 — нижние водяные коммуникации; 11 — опорная металлоконструкция



Р и с. 2. Изменение давления по высоте графитовой колонны (облученная кладка, «крест» 3): 0,25 (1); 0,5 (2); 1 (3); 1,5 с (4)

Анализ показывает, что максимальное расчетное давление реализуется в окрестности точки разрыва между отметками $H = 4,325$ м и $H = 4,925$ м от верхней грани нижнего металлического блока в «кресте» 3 и составляет $P_{\max} \sim 0,43$ МПа. Распределение давления по высоте графитовой колонны в разное время показано на рис. 2. В зоне разрыва канала в течение примерно 300—350 мс формируется область повышенного давления шириной $\sim 1,5$ м. Высокое давление в этой области сохраняется на уровне $P_{\text{ср}} \sim 0,3\text{—}0,35$ МПа в течение 1,5 с. В это же время вдали от разрыва технологического канала давление на соседние колонны почти линейно возрастает до $\sim 0,13$ МПа.

В случае разрыва технологического канала в исходной необлученной кладке максимальное давление в «кресте» 3 снижается до $P_{\max} \sim 0,38$ МПа вследствие больших зазоров между графитовыми колоннами по сравнению с облученной. Пространственно-временное распределение давления при этом близко к расчетному в кладке в деградированном состоянии.

Метод решения. Динамическое деформирование конструкции активной зоны при импульсном нагружении описывается уравнением движения, записанным на основе вариационного принципа виртуальной работы [2]:

$$\delta\pi = \int_{\Omega} \rho \ddot{U}_i \delta U_i dV + \int_{\Omega} \sigma_{ij} \delta \epsilon_{ij} dV - \int_{\Omega} \rho f_i \delta U_i dV + \int_{\Gamma_p} P_i \delta U_i d\gamma = 0 \quad (i, j = \overline{1, 3}),$$

где Ω — область, занимаемая конструкцией; ρ — плотность; ϵ_{ij} , σ_{ij} — компоненты тензоров деформаций и напряжений; U_i — перемещения в общей системе координат X ; f_i , P_i — распределенная массовая и поверхностная нагрузка соответственно; Γ_p — область действия внешнего давления, точка над символом означает частную производную по времени t . Кинематические со-

отношения определяются в метрике текущего состояния:

$$\dot{\epsilon}_{ij} = (\dot{U}_{i,j} + \dot{U}_{j,i})/2 \quad (i, j = \overline{1, 3});$$

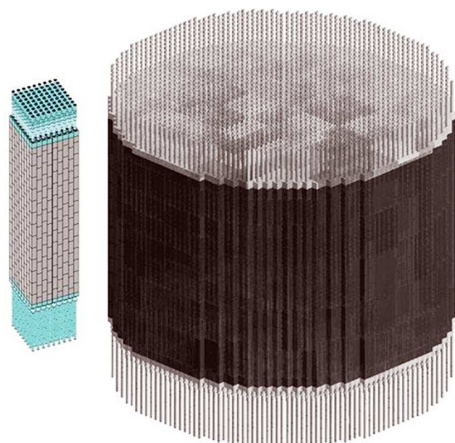
$$\dot{U}_{i,j} = \partial \dot{U}_i / \partial X_j; \quad X_j = |X_j|_{t=0} + \int_0^t \dot{U}_j dt.$$

Уравнение состояния для металлических элементов записывается в форме теории течения с трансляционно-изотропным упрочнением. Деформирование графита упругое.

Численное моделирование нестационарного напряженно-деформированного состояния графитовой кладки с технологическими каналами проводится на основе явной схемы интегрирования по времени и метода конечных элементов, программно реализованных в отечественном комплексе ЛОГОС, модуль «Прочность» [3]. Используются восьмиузловые конечные элементы сплошной среды и четырехузловые оболочечные конечные элементы.

Динамическое деформирование графитовой кладки с каналами рассчитывается с учетом физической и геометрической нелинейностей. Взаимодействие между элементами конструкции моделируется путем интегрирования по времени нестационарной контактной задачи с переменными границами с учетом проскальзывания и силы трения. Начальное статическое напряженно-деформированное состояние конструкции от действия избыточного внутреннего давления в технологическом канале $P = 7$ МПа и собственной массы каналов определяется также по явной схеме на предварительном этапе нагружения путем относительно медленного линейного увеличения квазистатических нагрузок до номинальных за время $t = 50$ мс, что позволяет исключить динамические эффекты. Наличие теплоносителя в трубах технологического канала учитывается его присоединенной массой, равномерно распределенной по корпусу канала.

На первом этапе на основе ранее верифицированной модели необлученной кладки создаются локальные конечно-элементные модели фрагмента активной зоны, включающие сборку 9×9 графитовой кладки исходной и облученной после ремонта [4]. Размерность конечно-элементной модели фрагмента активной зоны из 81 колонны с каналами составляет ~ 7 млн элементов (рис. 3). Разрушается канал, расположенный в центре сборки. При разработке локальной модели облученной кладки после ремонта используют каталог формоизмененных графитовых блоков РБМК (1-го энергоблока



Р и с. 3. Локальная и полная модели активной зоны РБМК-1000

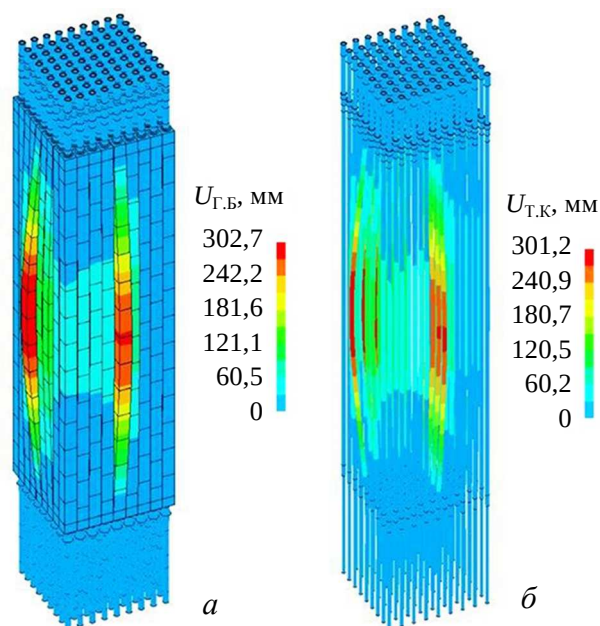
Ленинградской АЭС), разработанный НИЦ «Курчатовский институт», и прогнозная карта прогибов графитовых колонн по сечениям активной зоны через один год после ремонта, а также схемы расположения ячеек под резку при ремонте.

При построении конечно-элементной модели деформированных графитовых блоков в РФЯЦ — ВНИИЭФ разработана компьютерная программа, позволяющая трансформировать модели необлученных графитовых блоков в модели деформированных 81 типа в соответствии с каталогом.

На втором этапе на основе локальной модели разрабатывается конечно-элементная модель, включающая все колонны активной зоны с каналами (за исключением отражателя). Размерность полной модели достигает 160 млн конечных элементов (см. рис. 3). В этой постановке рассматриваются варианты разрыва канала в различных областях активной зоны.

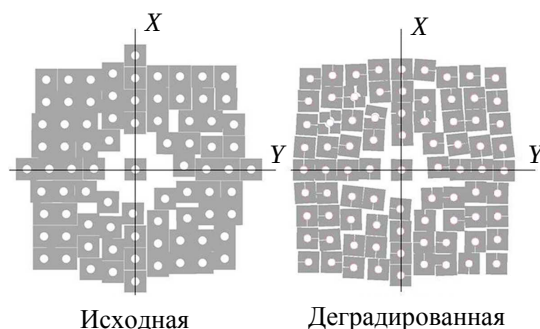
В качестве граничных условий в разработанных моделях задается жесткая заделка на узлы конечных элементов, непосредственно примыкающие к нижнему и верхнему перекрытиям.

Результаты расчетов и их анализ. Динамическое деформирование фрагмента графитовой кладки из 81 колонны рассчитывается до времени $t = 1,5$ с, когда проходят основные пики напряжений и деформаций в графитовых блоках и технологических каналах. Максимальное расчетное горизонтальное перемещение в необлученной кладке технологического канала реализуется в зоне разрыва канала и достигает $U_{\max} \sim 300$ мм (рис. 4).



Р и с. 4. Горизонтальные перемещения графитовых блоков (а) и технологических каналов (б) в необлученной кладке

На рис. 5 видно, что характер деформирования исходной и деградированной кладки после ремонта существенно отличается. В необлученной кладке разрыв технологического канала приводит к образованию заметной свободной полости вокруг разрушившегося канала в результате больших смещений центральных рядов колонн по осям X и Y . Максимальное смещение в облученной кладке в зоне ремонта и на границе ремонтной зоны составляет 215 и 209 мм соответственно, что в 1,5 раза ниже максимального прогиба исходной кладки. В деградированной кладке прогиб колонн центральных и соседних с ними рядов близок. Распухание графитовых блоков кладки при эксплуатации приводит к выборке проектных зазоров между колоннами, что стесняет их смещение при деформировании. Одной из причин снижения смещений облученной кладки по сравнению с исходной кладкой является зацепление колонн при деформировании.



Р и с. 5. Горизонтальное смещение кладки в сечении разрыва технологического канала ($t = 1,5$ с)

Максимальное расчетное напряжение для исходной и облученной кладки в зоне ремонта и на ее границе приведено в таблице. Расчеты локальной модели 9×9 показывают, что в результате разрыва центрального канала максимальная интенсивность напряжений реализуется в циркониевых секциях технологического канала, имеющих наибольший прогиб, и для необлученной кладки достигает $\sigma_{i \max} = 204$ МПа, для облученной $\sigma_{i \max} = 189$ МПа. В обоих случаях циркониевые секции деформируются пластически, однако интенсивность деформаций не превышает $\epsilon_{i \max} = 4,8\%$, что существенно ниже $\delta = 15\%$, и прочность циркониевых секций технологического канала обеспечивается [5]. Стальные части наиболее нагруженного канала, расположенные в верхней и нижней его частях, также деформируются за пределом упругости. В этих элементах $\epsilon_{i \max} = 0,7\%$ при $\delta = 26\%$, что также указывает на сохранение прочности стальных секций технологического канала [5].

Максимальное расчетное напряжение в элементах конструкции, МПа

Напряжение	Исходная кладка	Облученная кладка	
		Зона ремонта	Граница зоны ремонта
Интенсивность напряжений в технологическом канале	204	189	189
Главное растягивающее напряжение σ_1 в графитовом блоке	32	57	48
Главное сжимающее напряжение σ_3 в графитовом блоке	-51	-87	-70

По расчетам максимальное напряжение в деградированной кладке значительно возрастает по сравнению с исходной. Зацепление соседних колонн деградированной кладки при деформировании приводит к повышению напряжений в графитовых блоках. Максимальные главные напряжения реализуются в деградированных блоках зоны ремонта. Максимальное растягивающее напряжение составляет $\sigma_1 = 57$ МПа, максимальное сжимающее $\sigma_3 = 87$ МПа. Моделирование показывает значительное местное превышение пределов прочности в отдельных графитовых блоках как на растяжение, так и на сжатие, что может привести к образованию локальных трещин в блоках, не приводящих к нарушению интегральной целостности кладки.

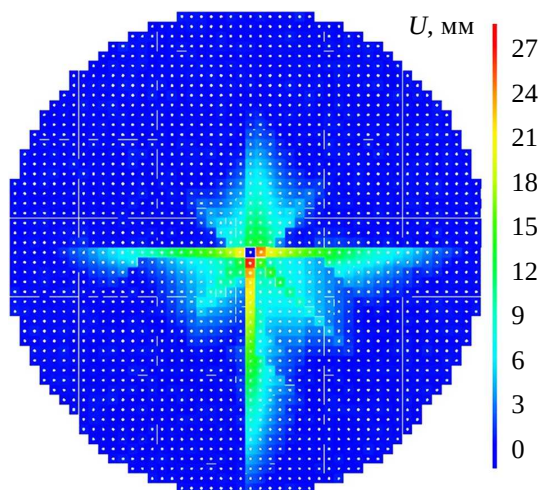
Расчеты деформирования графитовой кладки с технологическими каналами активной зоны в целом в проектной геометрии при разрыве одиночного канала в четырех зонах активной зоны проведены в параллельном режиме на супер-ЭВМ ВЦ РФЯЦ — ВНИИЭФ. Число задействованных процессоров варьировалось от 1250 до 2000. Общее время расчета одной задачи составляет 18—25 сут. Всего выполнено пять вариантов расчетов, отличающихся положением разрушившегося канала в кладке. Выбор мест разрыва технологического канала для расчетов обусловлен уменьшением числа колонн от места разрыва до внешней поверхности активной зоны: от 23 в центре до 3 колонн на краю.

Расчеты показывают, что максимальный прогиб технологического канала при разрыве в центре (23 колонны до края) и зоне с 16 колоннами до края активной зоны почти одинаков и составляет $U_{\max} \sim 27$ —28 мм. При уменьшении числа колонн до свободной границы до восьми прогиб возрастает до $U_{\max} \sim 70$ мм. При трех колоннах до края прогиб возрастает до $U_{\max} \sim 350$ мм (ограничение динамического прогиба со стороны кожуха активной зоны не моделируется в запас прочности технологического канала и графитовых блоков). Полученный результат на полной модели кладки для разрыва с тремя колоннами до края согласуется с расчетами локальной модели исходной кладки 9×9, в которой число деформируемых колонн до свободной границы равно четырем, при этом максимальный прогиб $U_{\max} \sim 300$ мм.

Смещение необлученных графитовых блоков в среднем сечении активной зоны при разрыве центрального технологического канала на момент реализации максимального прогиба ($t = 0,4$ с) показано на рис. 6. В результате разрушения канала наиболее сильно деформируются колонны, которые расположены в направлениях, перпендикулярных граням графитового блока разрушающегося технологического канала. В этом случае максимальное перемещение не превышает 30 мм.

Выводы. Численные расчеты на основе этих моделей позволили установить следующее:

в результате динамического деформирования локальной сборки 9×9 колонн необлученной кладки при разрыве центрального канала максимальные прогибы колонн достигают $U_{\max} \sim 300$ мм. В облученной отремонтированной кладке в результате изменения формы графитовых блоков, уменьшения зазоров между



Р и с. 6. Смещение графитовой кладки в среднем сечении при разрыве центрального технологического канала ($t = 0,4$ с)

блоками и контактного взаимодействия блоков при динамическом деформировании максимальный прогиб колонн при разрыве технологического канала снижается до $U_{\max} \sim 215$ мм;

при разрыве центрального канала в деградированной кладке из 81 колонны после ремонтно-восстановительных работ циркониевые и стальные части технологического канала деформируются пластически. Максимальные деформации в цирконии $\epsilon_{i \max} = 4,8\%$ при $\delta = 15\%$, в стали $\epsilon_{i \max} = 0,7\%$ при $\delta = 26\%$, что свидетельствует о достаточной прочности технологического канала. В локальных зонах графитовых блоков главные растягивающие и сжимающие напряжения превышают предел прочности, что может привести к появлению местных трещин в

блоках, интегральная целостность кладки при этом сохраняется;

расчеты полной модели активной зоны показывают, что максимальный динамический прогиб колонн существенно зависит от области разрыва технологического канала. Если разрушающийся канал отделяет от внешней поверхности активной зоны 16—23 колонны, то максимальный прогиб не превышает $U_{\max} \sim 27$ —28 мм, если до поверхности три колонны, то прогиб возрастает до $U_{\max} \sim 350$ мм.

В целом численные исследования разрыва технологического канала позволяют сделать вывод о достаточной прочности облученной кладки после ремонтно-восстановительных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новосельцев О.Ю. и др. Комплексный анализ механических и теплогидравлических процессов в графитовой кладке канальных реакторов при аварийном разрыве топливного канала. — Атомная энергия, 2003, т. 94, вып. 2, с. 26—28.
2. Василдзу К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности. М.: Мир, 1987.
3. Спиридонов В.Ф., Циберев К.В., Дьянов Д.Ю. и др. Пакет программ ЛОГОС. Функциональные возможности для решения задач прочности. — В сб.: Супервычисления и математическое моделирование. XIII Межд. сем. Саров, 2012, с. 541—549.
4. Рябов А.А., Романов В.И., Куканов С.С. и др. Компьютерный анализ динамической прочности исходной и восстановленной кладки РУ РБМК-1000 при сейсмических воздействиях. — В сб.: Труды РФЯЦ — ВНИИЭФ, 2017, т. 22, ч. 1, с. 160—169.
5. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. ПНАЭ Г-7-002—86. М.: Энергоатомиздат, 1989.

УДК 621.039.526

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ ПОЛНОМАСШТАБНОГО МАКЕТА ГРАФИТОВОЙ КЛАДКИ РБМК-1000 С ПОСЛЕРЕМОНТНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Европин С.В., Баранов И.М., Новиков В.С., Малышев А.В., Роменков А.А.,
Ермошин Ф.Е., Семенихин В.И. (АО «НИКИЭТ», г. Москва)

Сейсмостойкость восстановленной графитовой кладки рассчитывали в НИЦ «Курчатовский институт», РФЯЦ — ВНИИЭФ и АО «НИКИЭТ» с использованием разного программно-математического обеспечения. Полученные результаты подтвердили ее сейсмостойкость и имели хорошую сходимость по параметрам отклика конструкции на сейсмическое воздействие (собственные частоты, виброперемещения и

др.). Для верификации результатов и подтверждения расчетного обоснования было принято решение об экспериментальном исследовании сейсмостойкости полномасштабного макета фрагмента графитовой кладки с послеремонтными характеристиками. При разработке макета использовалась система автоматизированного проектирования Creo, которая позволяет создавать 3D-модель изделия и сократить при этом