

УДК 539.3

Компьютерный анализ динамической прочности исходной и восстановленной кладки РУ РБМК-1000 при сейсмических воздействиях

**А. А. Рябов, В. И. Романов,
С. С. Куканов, С. В. Европин,
А. П. Рахманов**

В работе представлено описание постановки задачи, методики решения и результатов численного моделирования напряженно-деформированного состояния элементов исходной и восстановленной после многолетнего облучения и ремонта конструкции АЗ реакторной установки РБМК-1000 при заданных динамических нагрузках, обусловленных сейсмическим воздействием при землетрясении.

Введение

Важнейшим требованием, предъявляемым к конструкциям ядерных энергетических установок, является их безопасность при нормальной эксплуатации и в возможных аварийных условиях. Одним из нормативных требований безопасности ядерного реактора является сохранение его прочности при сейсмических воздействиях в условиях землетрясения. В нашей стране сейсмические нагрузки для ядерных реакторных установок регламентируются нормами [1–4]. В настоящей работе исследуется напряженно-деформированное состояние графитовой кладки и технологических каналов (ТК) активной зоны (АЗ) энергоблоков АЭС с РБМК-1000 при нагрузках землетрясений в 6 и 7 баллов по шкале MSK-64.

При эксплуатации реакторных установок РБМК-1000 в результате многолетнего облучения меняются механические свойства графита, развивается радиационная ползучесть графитовых блоков, приводящая к изменению исходной формы графитовых колонн и, как следствие, к искривлению ТК и каналов системы управления и защиты (СУЗ), установленных внутри колонн. Для решения этой проблемы разработана уникальная ремонтно-восстановительная технология, в основе которой лежит выборочная вертикальная разрезка отдельных графитовых блоков с последующим спрямлением колонн и каналов силовым воздействием специальных устройств – «натяжителей» [5]. На основе созданной технологии успешно проведены ремонтно-восстановительные работы на энергоблоках № 1 Ленинградской и № 2 Курской АЭС с реакторами РБМК-1000. Так как в результате применения этой технологии в отремонтированной кладке часть графитовых блоков, сохраняя свое положение в АЗ, фрагментируется вертикальными резами, то возникает задача подтверждения прочности восстановленной графитовой кладки и обоснования безопасности ее дальнейшей эксплуатации, в том числе при сейсмических воздействиях.

1. Постановка задачи

Общий вид реакторной установки (РУ) РБМК-100 показан на рис. 1. Основными элементами конструкции являются графитовая кладка 1, верхнее 2 и нижнее 3 перекрытия, кожух 4. В колонне графитовой кладки установлен ТК с теплоносителем, омывающим тепловыделяющую сборку (ТВС). Графитовая кладка включает 2488 вертикальных графитовых колонн высотой 8 м. Каждая колонна набрана из 14 графитовых блоков. Высота отдельных блоков различна, и каждая колонна набирается так, чтобы аксиальные стыки между соседними блоками в соседних колоннах находились на разной высоте. Между боковыми гранями графитовых блоков в исходной конфигурации кладки возможны зазоры от 1,0 до 1,6 мм. ТК представляет собой комбинированную циркониево-стальную трубную конструкцию диаметром 88 мм и длиной 18,34 м.

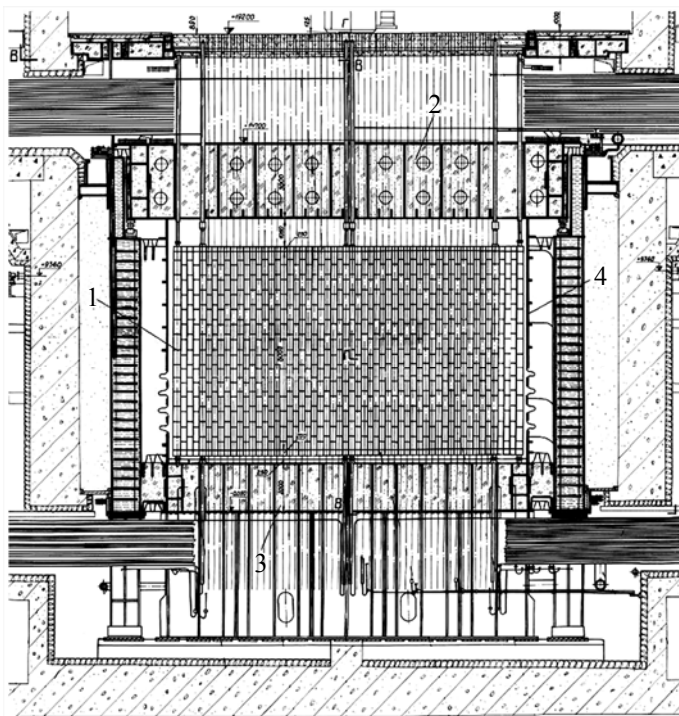


Рис. 1. Общий вид реакторной установки РБМК-1000

Температура циркониевой части ТК в нормальных условиях может достигать $T = 285\text{ }^{\circ}\text{C}$ [5] при избыточном внутреннем давлении $p = 7\text{ МПа}$. Эти нагрузки должны учитываться при проведении расчетов динамического деформирования конструкции от сейсмического воздействия.

В качестве сейсмических нагрузок принимается набор поэтажных акселерограмм, рассчитанных в соответствии с [3, 4] для заданных точек шахты реактора на отметке крепления схемы «ОР» и схемы «Е». На рис. 2 показан характерный вид сейсмической акселерограммы для землетрясения в 6 баллов по шкале MSK-64. Продолжительность процесса сейсмического нагружения составляет $t = 8\text{ с}$, однако длительность воздействия повышенных сейсмических перегрузок не превышает $t = 3\text{--}3,5\text{ с}$. В указанных условиях сейсмического воздействия характерные точки металлоконструкции реактора получают знакопеременные ускорения в диапазоне от $n = -0,144g$ до $n = +0,1115g$ по вертикальному и горизонтальным направлениям соответственно: X , Y , Z . Ха-

ракетерные частоты колебаний ускорений находятся в диапазоне $f = 2 - 10$ Гц, а характерные длительности импульсов повышенных ускорений составляют $\Delta t = 100 - 500$ мс.

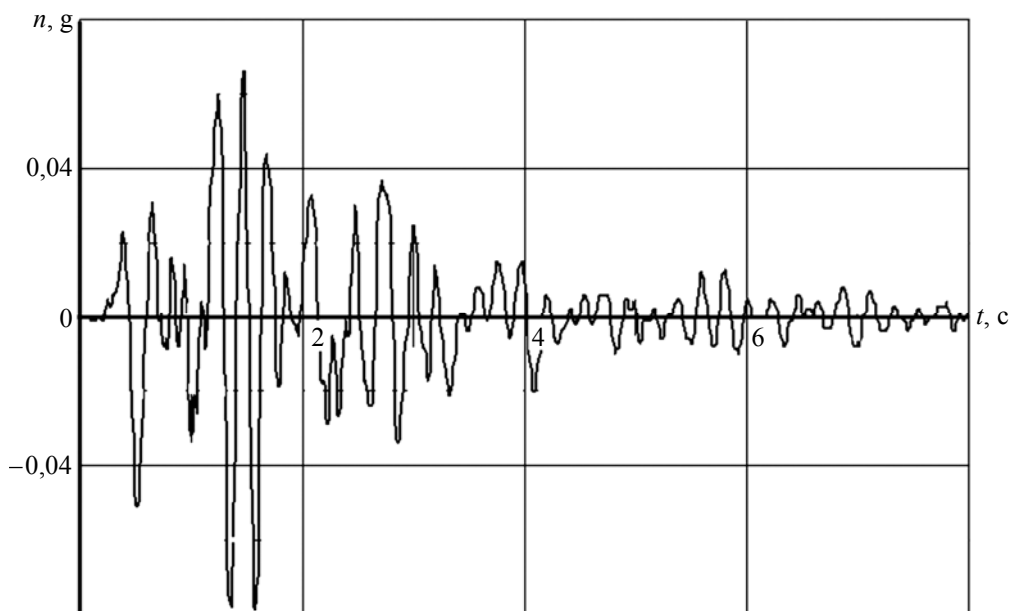


Рис. 2. Характерная акселерограмма, соответствующая сейсмической нагрузке 6 баллов по шкале MSK-64

При нагружении конструкции сейсмическим воздействием, соответствующим землетрясению в 7 баллов по шкале MSK-64, амплитуда ускорений увеличивается в 2,1 раза.

2. Метод решения

Для численного решения задачи о динамическом деформировании конструкции используется метод конечных элементов в сочетании с явной схемой интегрирования по времени, реализованный в отечественном высокопараллельном программном комплексе «ЛОГОС», модуль «Прочность» [6]. В конечно-элементные модели включаются все основные силовые элементы реальной конструкции АЗ. Пространственная дискретизация строится на основе восьмиузловых конечных элементов (КЭ) сплошной среды и четырехузловых оболочечных КЭ. Взаимодействие между элементами графитовой кладки моделируется путем решения на каждом шаге интегрирования по времени нестационарной контактной задачи с переменными границами с учетом проскальзывания и силы трения. Упругопластическое деформирование металлических деталей конструкции описывается на основе теории течения с трансляционно-изотропным упрочнением, для моделирования деформаций графита применяются соотношения теории упругости.

При численном решении сейсмических задач начальное статическое напряженно-деформированное состояние конструкции от действия внутреннего давления и веса ТК определяется на предварительном этапе нагружения по явной схеме интегрирования путем медленного линейного увеличения квазистатических нагрузок до номинальных значений за время $t = 50$ мс, что позволяет исключать динамические эффекты. Полученное статическое состояние учитывается в течение всего времени решения динамической задачи при действии сейсмических нагрузок. Наличие теп-

лоносителя в трубах ТК учитывается в форме присоединенной массы, равномерно распределенной по корпусу ТК. Расчеты проводятся до момента времени $t = 4$ с, когда основные пики сейсмической нагрузки уже пройдены.

Анализ конструкции АЗ показывает, что при заданных динамических нагрузках контактное взаимодействие колонн не должно оказывать существенного влияния на деформации отдельной колонны. Проверка этой гипотезы проводится путем численных экспериментов на расчетных моделях, включающих различное количество колонн. Последовательно рассматриваются четыре модели фрагментов АЗ, включающие 4 колонны (сборка 2×2), 16 колонн (4×4), 25 колонн (5×5) и 49 колонн (7×7), размерностью от 340000 до 4100000 КЭ. На рис. 3 показаны некоторые конечно-элементные модели, включающие сборки из 2×2 и 7×7 колонн для исходной кладки, а также сборки в виде креста 3×3 и сборку 9×9 для восстановленной после ремонта кладки.

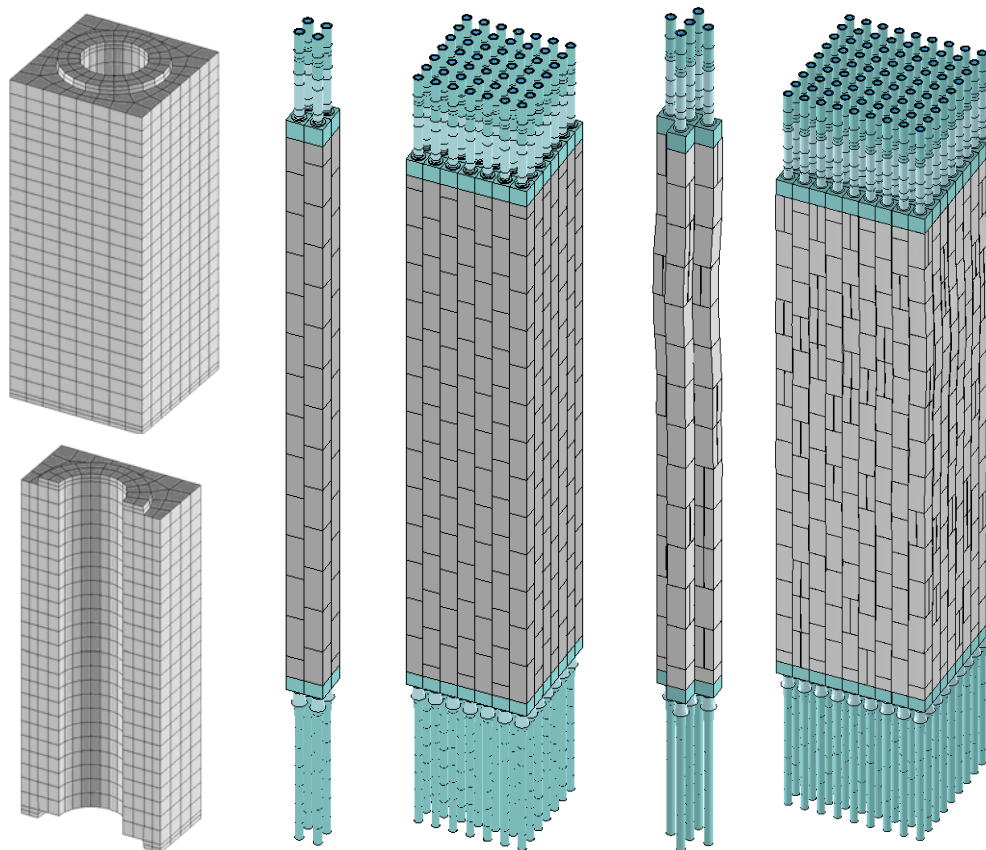


Рис. 3. Компьютерные модели графитового блока и фрагментов кладки АЗ РБМК-1000

3. Результаты расчетов и их анализ

Верификация разработанных компьютерных моделей деформирования графитовых колонн с ТК проводится путем сравнения результатов расчетов деформирования сборки из 2 колонн с данными испытаний такой же конструкции при действии горизонтальной статической нагрузки на испытательном стенде ТКР. В качестве граничных условий в расчетах задаются условия жест-

кой заделки на узлы элементов КЭ-модели, непосредственно примыкающие к нижнему и верхнему перекрытиям. Расчеты показывают, что при приложении горизонтального усилия $F_{расч} = 10$ кН в центральной части одной из колонн значение максимального прогиба ТК составляет $w_{расч} = 111,5$ мм. Это весьма близко к экспериментальному значению $w_{эксп} = 112$ мм, замеренному на стенде при усилнии $F_{эксп} = 9,4$ кН. Хорошее согласие расчетных и экспериментальных результатов подтверждает адекватность разработанной компьютерной модели деформирования ТК в графитовой колонне.

Для проверки гипотезы о слабом взаимном влиянии колонн при сейсмическом воздействии и, как следствие, возможном сокращении вычислительных затрат проводится исследование деформаций фрагментов АЗ, включающих различное количество колонн. Рассматриваются четыре модели исходной кладки: модель 1–4 колонны (сборка 2×2), модель 2–16 колонн (сборка 4×4), модель 3–25 колонн (сборка 5×5), модель 4–49 колонн (сборка 7×7). Результаты этого исследования в форме максимальных прогибов ТК, полученных на различных моделях при одинаковой сейсмической нагрузке 6 баллов по шкале MSK-64, приведены на рис. 4, где номера кривых (1–4) соответствуют номерам моделей. Численные эксперименты показывают, что все четыре модели дают близкие результаты по прогибу и параметрам НДС в ТК при действии сейсмической нагрузки. Отличие по максимальному прогибу не превышает 6%. При этом использование модели сборки 2×2 позволяет в несколько раз сократить вычислительные затраты по времени, поэтому все численные исследования проводятся на этой компьютерной модели.

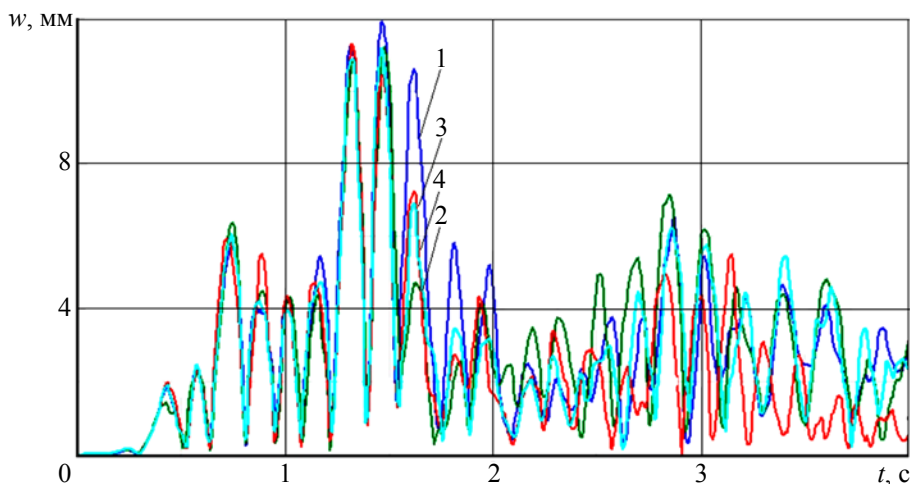


Рис. 4. Максимальные прогибы ТК при воздействии сейсмической нагрузки 6 баллов по шкале MSK-64 (см. цветную вкладку)

Анализ результатов расчетов АЗ РУ РБМК-1000 в исходном состоянии, полученных для восьми вариантов сейсмограмм, соответствующих землетрясениям в 6 и 7 баллов по шкале MSK-64, показывает, что наибольший прогиб ТК реализуется при сейсмическом воздействии в 7 баллов и составляет $w_{max} = 29$ мм (рис. 5,б). Максимальный уровень интенсивности напряжений в циркониевых трубах ТК реализуется в зоне наибольшего прогиба, не превышает предел текучести и составляет $\sigma_{i max} = 135$ МПа (рис. 5,в). ТК при сейсмическом воздействии сохраняет прочность с коэффициентом запаса по пределу прочности $\eta = 2,1$. Для графитовых блоков в локальных зо-

нах, примыкающих к стыкам, наблюдается незначительное превышение предела прочности графита на растяжение (рис. 6). В этих зонах графитовых блоков при заданном сейсмическом воздействии, по-видимому, возможно появление локальных трещин, не приводящих к фрагментации и разрушению блоков.

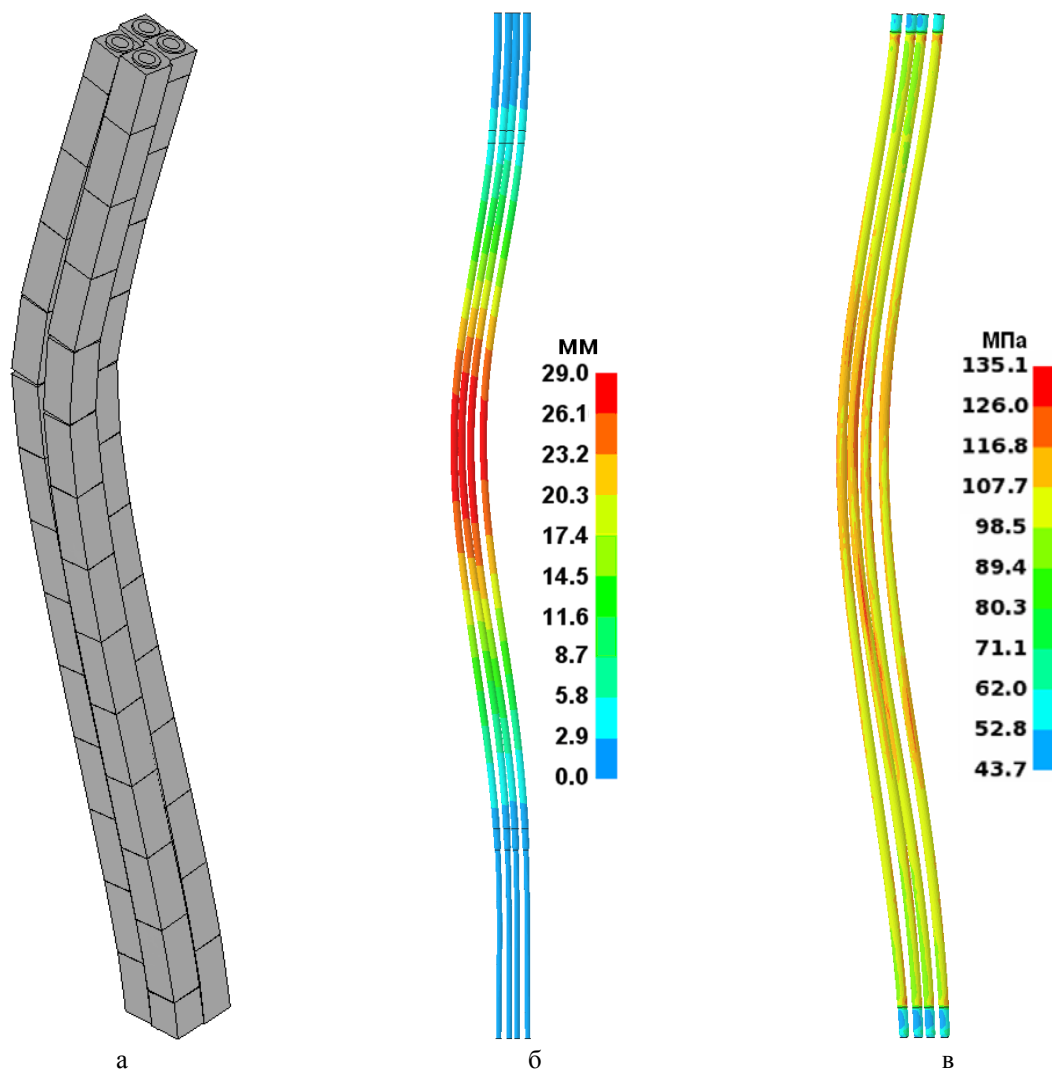


Рис. 5. Прогиб графитовых колонн (а), максимальный прогиб ТК (б) и интенсивность напряжений в циркониевых трубах ТК (в). Смещения увеличены в 20 раз (см. цветную вкладку)

Для кладки в восстановленном состоянии исследуется только случай сейсмического нагружения в 7 баллов по шкале MSK-64 (4 варианта сейсмограмм). Анализ схемы восстановления АЗ показывает, что после ремонта в кладке присутствуют графитовые колонны трех типов:

- без разрезов;
- с одним оппозитным разрезом (блоки разделены на две части);
- с двумя оппозитными разрезами (блоки разделены на четыре части).

При этом разрезанные колонны расположены в шахматном порядке, каждая колонна с разрезанными блоками окружена колоннами без разрезов.

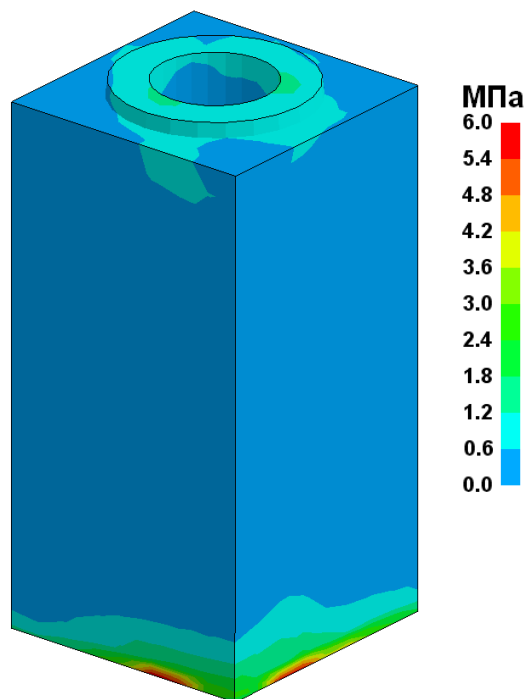


Рис. 6. Интенсивность напряжений (МПа) в графитовом блоке (см. цветную вкладку)

В соответствии с предварительным анализом деформирования различных фрагментов сборок и особенностями выполненных ремонтных работ, расчеты деформирования элементов АЗ РУ РБМК-1000 в восстановленном состоянии проводятся на моделях из 5 колонн, расположенных в виде креста 3×3 (рис. 3). При этом для расчетов восстановленной кладки используются 3 различные модели, отличающиеся разрезкой графитовых блоков центральной колонны (модель 1 – неразрезанная кладка, модель 2 – блоки с одним оппозитным разрезом, модель 3 – блоки с двумя оппозитными разрезами). Блоки периферийных колонн во всех трех вариантах модели не разрезаны.

Известно, что в результате длительного облучения при эксплуатации реактора механические свойства деталей АЗ меняются. Изменение свойств графита под воздействием облучения учитывается при проведении расчетов восстановленной АЗ. Трубы ТК в процессе эксплуатации реактора периодически и поочередно заменяются на новые, поэтому каждый ТК имеет индивидуальный срок облучения. Учитывая данный факт, а также то, что материал ТК при облучении упрочняется, расчеты восстановленной АЗ проводятся с использованием физико-механических свойств материалов ТК в необлученном состоянии (без учета упрочнения). Это позволяет получить консервативную оценку деформирования ТК.

На рис. 7 показано изменение во времени максимального прогиба ТК, полученное для трех моделей разрезки блоков центральной колонны (номера кривых соответствуют номерам моделей). Как видно из рисунка, наибольший прогиб реализуется в случае неразрезанных блоков и составляет $w_{\max} \sim 30,5$ мм, что весьма близко к результатам, полученным на первой модели исходной кладки 2×2. Разрезка блоков на 2 части приводит к снижению прогиба на ~11 %, а на 4 части – на ~24 %. Анализ результатов расчетов показывает, что при сейсмическом воздействии графитовые блоки воздействуют на ТК как присоединенная масса. В результате разрезки блоков, масса воздействующего на ТК графита уменьшается, что и приводит к снижению прогиба ТК.

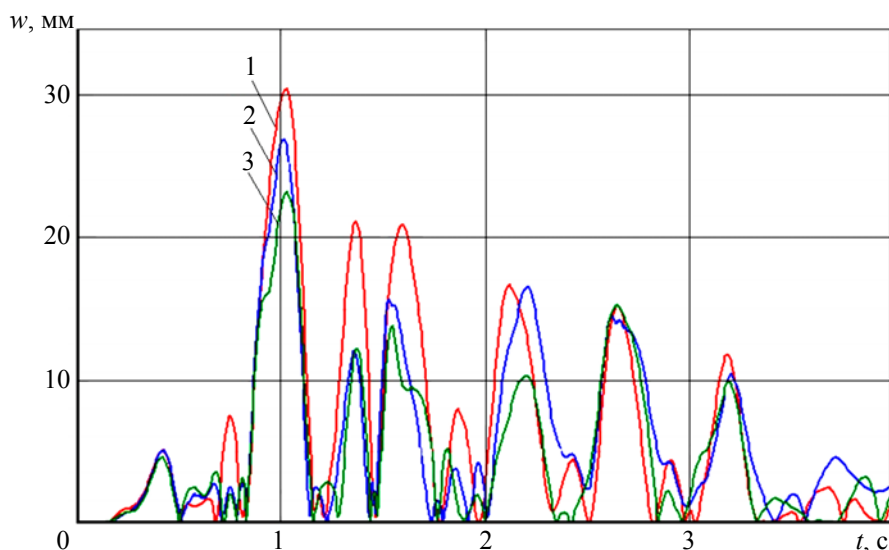


Рис. 7. Максимальный прогиб ТК в восстановленной кладке (см. цветную вкладку)

Максимальный уровень интенсивности напряжений в циркониевых трубах ТК реализуется в зоне наибольшего прогиба и составляет $\sigma_{i \max} = 150$ МПа. ТК при сейсмическом воздействии сохраняет прочность с коэффициентом запаса по пределу прочности $\eta_b = 1,9$. Для графитовых блоков в местах их стыков наблюдается превышение предела прочности на растяжение. В указанных зонах графитовых блоков также возможно появление локальных трещин.

В целом, сравнительный анализ полученных результатов показывает, что характер и параметры напряженно-деформированного состояния исходной и восстановленной после длительного облучения графитовой кладки РУ РБМК-1000 при заданных сейсмических воздействиях меняются незначительно. Максимальный прогиб ТК восстановленной АЗ при землетрясении возрастает на $\sim 5\%$ по сравнению с АЗ в исходном состоянии. Таким образом, прочность элементов АЗ РУ РБМК-1000 при сейсмическом воздействии в 7 баллов по шкале MSK-64 сохраняется как в исходном состоянии, так и после ремонтно-восстановительных работ.

Выводы

По результатам проведенных численных исследований необходимо отметить следующее:

1. С целью решения проблемы разработан ряд компьютерных конечно-элементных моделей для фрагментов исходной и восстановленной кладки размерностью от 0,34 до 4,1 млн КЭ. Достоверность созданных моделей подтверждена близостью расчетных и экспериментальных данных по максимальным прогибам кладки под действием боковой статической нагрузки.

2. Путем численных экспериментов, выполненных для серии моделей фрагментов кладки различной размерности, показано слабое влияние соседних колонн на напряженно-деформированное состояние конструкции при заданных сейсмических нагрузках, что позволяет проводить компьютерные расчеты на моделях малой размерности и существенно экономить вычислительные ресурсы.

3. Численные исследования динамической прочности исходной и восстановленной после ремонта АЗ РУ РБМК-1000 для 8 вариантов 6 и 7 балльных землетрясений по шкале MSK-64 показывают, что конструкция после ремонтно-восстановительных работ сохраняет достаточную прочность при сейсмических воздействиях.

Список литературы

1. Нормы расчета на прочность типовых узлов и деталей из графита уран-графитовых канальных реакторов НГР-01-90. – М.: ИАЭ им. В. В. Курчатова, НИКИЭТ, 1990.
2. Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. ПНАЭ Г-7-008-89. – М.: Атомэнергоиздат, 1990.
3. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций (НП-031-01).
4. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПиН АЭ Г-7-002-86) и СНиП II-7-81* «Строительство в сейсмических районах». – М.: Атомэнергоиздат, 1989.
5. Годовой отчет НИКИЭТ-2014: Сб. статей / Под ред. Е. О. Адамова. – М.: ОАО «НИКИЭТ», 2014. 344 с.
6. Спиридонов В. Ф., Циберев К. В., Дьянов Д. Ю. и др. Пакет программ ЛОГОС. Функциональные возможности для решения задач прочности // Труды XIII международного семинара «Супервычисления и математическое моделирование». – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2011.

**Numerical simulation of dynamic strength of fresh
and repaired RBMK-1000 reactor facility graphite stackings
under seismic loading**

A. A. Ryabov, V. I. Romanov, S. S. Kukanov, S. V. Evropin, A. P. Rahmanov

The paper presents the statement of the problem, the solution methods and the numerical simulation results of dynamic deformation of fresh and repaired RBMK-1000 reactor facility graphite stackings under seismic loading.