

Девятая международная научно-техническая конференция
«Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики»
Москва, 21-23 мая 2014 г.

РАСЧЕТНЫЙ ПРОГНОЗ ПРОГИБОВ КАНАЛОВ РБМК-1000 НА СТАДИИ РАСТРЕСКИВАНИЯ ГРАФИТА

А.А. Тутнов, А.С. Киселев, Е.С. Крутько
Бурлаков Е.В., Ткачев В.В., Федосов А.М.
НИЦ «Курчатовский институт»

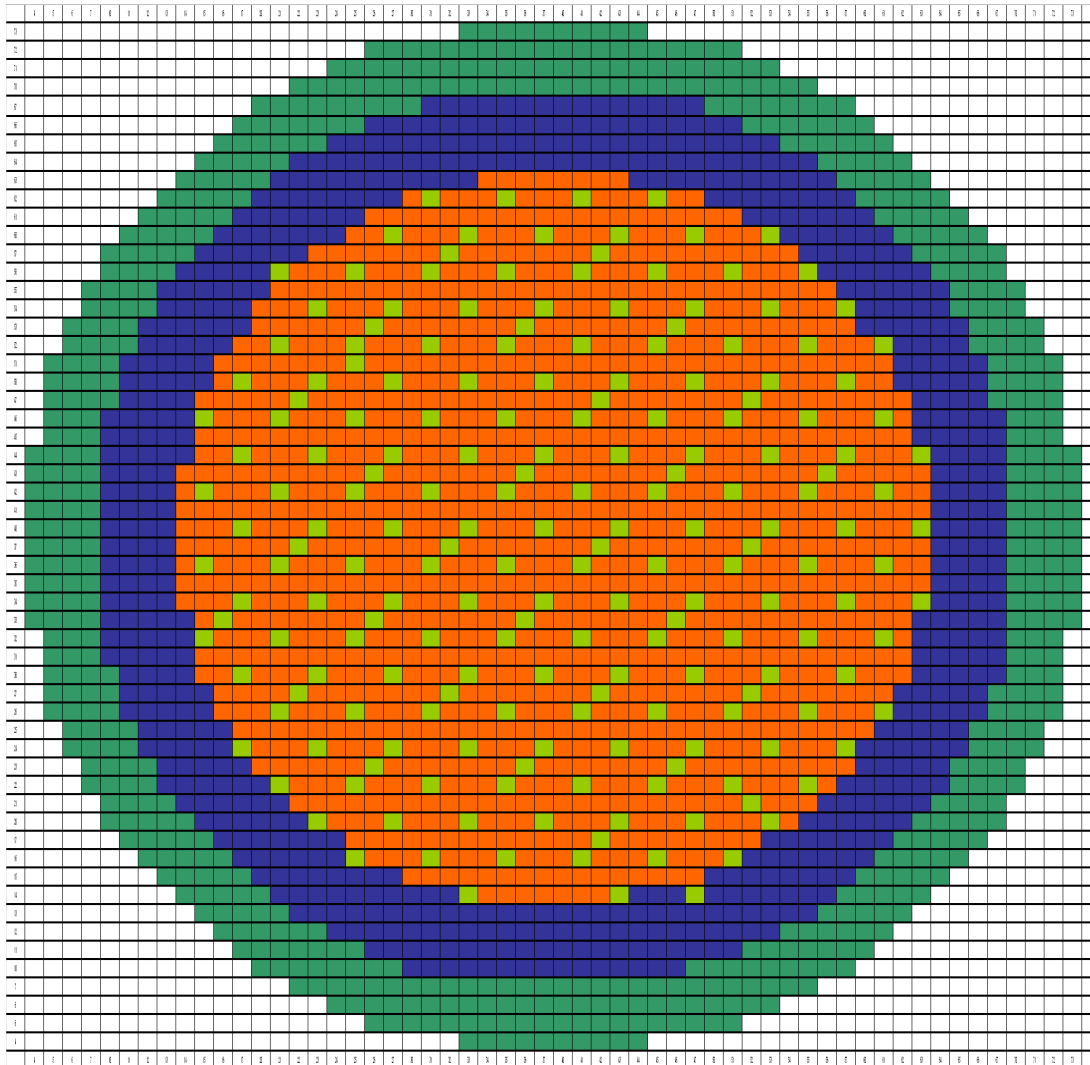


Содержание

Часть 1. Краткая характеристика модели графитовой кладки РБМК-1000 и методик расчетного анализа

Часть 2. Результаты расчетного анализа формоизменения графитовой кладки РБМК для 1-ого блока ЛАЭС и 2-ого блока Курской АЭС с учетом заданной схемы ремонта.

Структура графитовой кладки активной РБМК



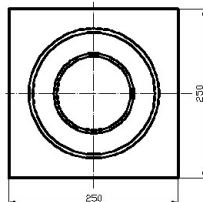
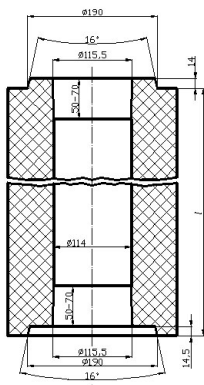
зеленый цвет –
отражатель,

синий цвет -
периферия активной
зоны,

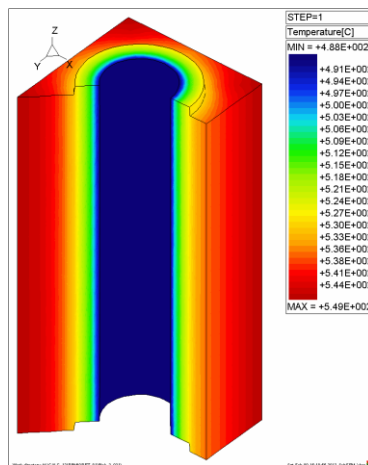
оранжевый цвет –
зона плато,

желтый цвет -
стержни СУЗ и
нерабочие каналы в
зоне плато

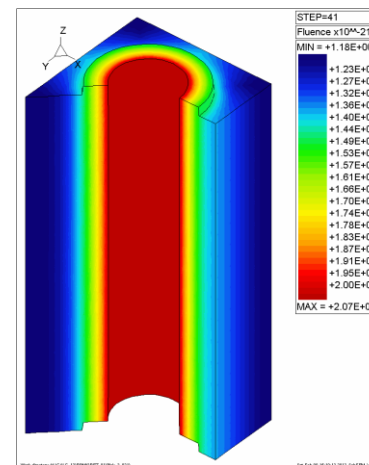
Причины формоизменения графитовой кладки активной РБМК



Геометрия



Распределение температуры

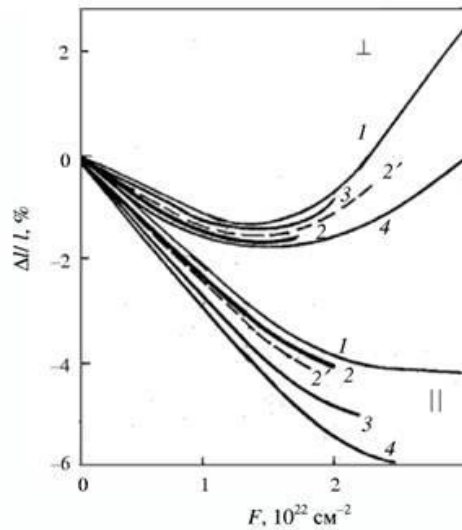


Распределение флюенса

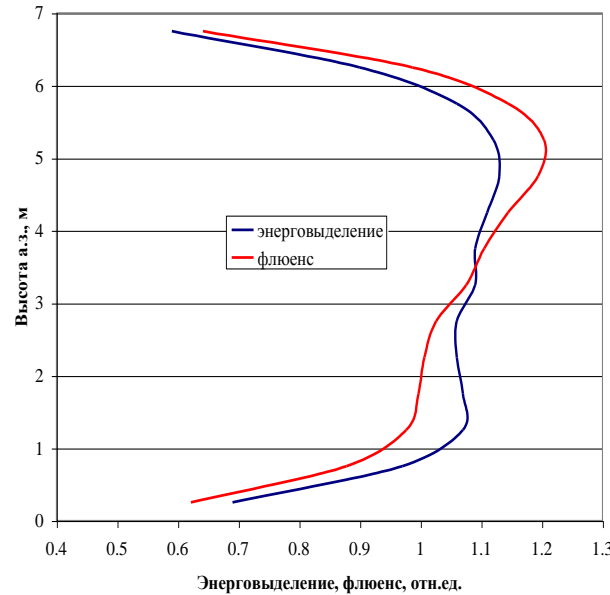
- неравномерность распределения температуры и флюенса по объему кладки в целом;
- локальная неравномерность распределения температуры и флюенса по объему графитовых блоков;
- переход от стадии усадки к распуханию графита при достижении определенного флюенса;
- «раскрытие» продольных трещин в графитовых блоках, что приводит к существенному росту их габаритов;
- дополнительный прогиб графитовых колонн, увеличивающийся по мере удаления от центра активной зоны к периферии, из-за накопления изменений габаритов отдельных графитовых блоков.

В соответствии с принятыми в настоящее время эксплуатационными пределами прогибы графитовых колонн не должны превышать 100 (120) мм,

Причины формоизменения графитовой кладки активной РБМК

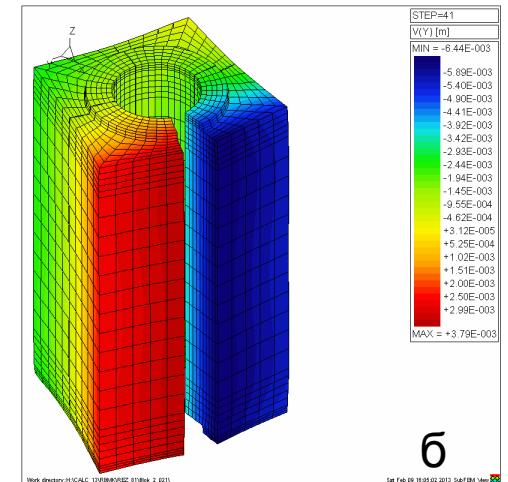
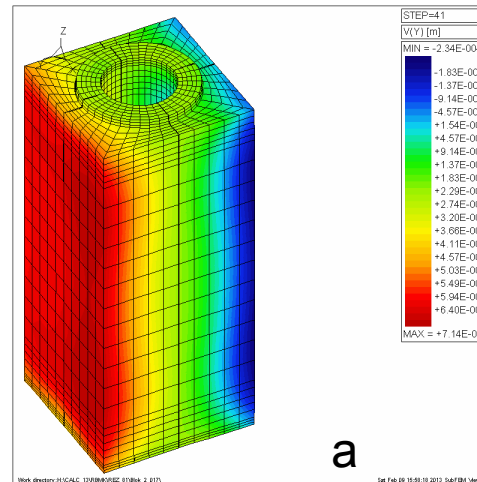


Деформации усадки и распухания графита для продольного и поперечного направлений



Распределение энерговыведения и флюенса по высоте активной зоны

Деформированное состояние и распределение одной из компонент перемещений по объему графитового блока: температура и флюенс минимальны - сквозные трещины отсутствуют(а), высокие значения флюенса и температуры - появляется сквозная продольная трещина(б).



Методики расчетного анализа

Для моделирования процесса деформирования кладки РБМК разработаны:

- **детальная трехмерная модель и конечноэлементная методика на базе ПК UZOR 1.0** (аттестационный паспорт № 346 от 21.11.2013г.), позволяющая выполнять расчеты для всей кладки в целом с учетом особенностей ее компоновки и взаимодействия графитовых колонн блоков при их растрескивании или ремонте;
- **инженерные методика и модель на базе ПК UZOR 1.0**, в которой конечноэлементный анализ растрескивания графитовых блоков проводится отдельно для каждого блока в заданном слое по высоте кладки, результаты изменений габаритов графитовых блоков суммируются;
- **инженерные методика и модель на базе компьютерного кода FEMGR** (аттестационный паспорт №227 от 2007г.) , в котором в качестве исходных данных применяются результаты внутриреакторного контроля состояния графитовой кладки, а конечно-элементный алгоритм используется в качестве средства аппроксимации и экстраполяции экспериментальных данных.
- **стохастическая модель**, в которой зависимость изменения габаритов блоков после образования продольной трещины от флюенса нейтронов задается извне, затем с помощью генератора случайных чисел разыгрывается множество вариантов распределения трещин по граням блоков и определяется математическое ожидание величины прогиба в каждом канале.

Инженерные методики применяются для экспресс-анализа деформированного состояния кладки в процессе эксплуатации, оценки эффективности различных схем ремонта и скорости накопления прогибов графитовых колонн в послеремонтный период.

Детальная 3D модель графитовой кладки РБМК

Разработана трехуровневая конечноэлементная (суперэлементная) модель графитовой кладки РБМК для исследования протекающих деформационных процессов.

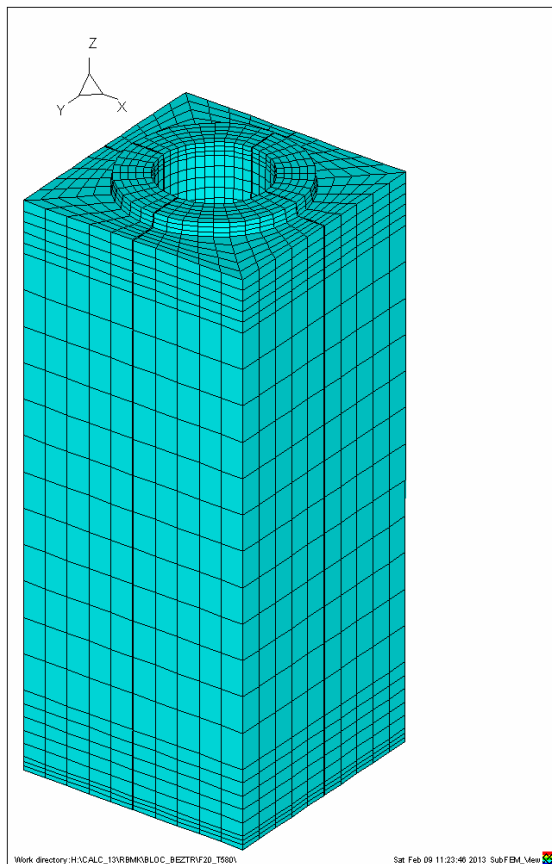
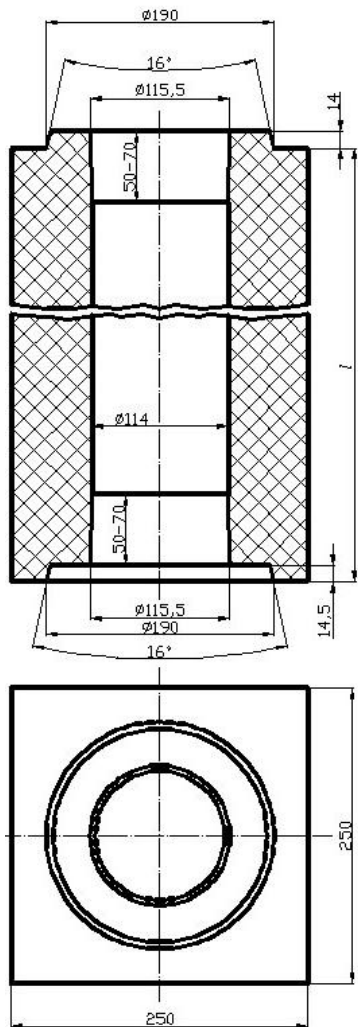
Первый уровень – трехмерная конечноэлементная модель графитового блока, позволяющая моделировать в нем кинетику напряженно-деформированного состояния (НДС) с учетом геометрии и размеров графитовых блоков, воздействия неравномерно распределенных по объему графитовых блоков полей потока нейтронов и температуры, анизотропии физико-механических свойств графита, изменения физико-механических свойств графита в результате воздействия эксплуатационных факторов: температуры, облучения, радиационной ползучести, растрескивания.

Второй уровень – модель графитовой колонны, состоящая из графитовых блоков различной высоты, позволяющая моделировать контактное взаимодействие торцевых поверхностей графитовых блоков, графитовых блоков и труб технологических каналов (ТК), при значительных прогибах колонн.

Третий уровень – модель кладки активной зоны РБМК, состоящая из графитовых колонн, позволяющая моделировать контактное взаимодействие между графитовыми колоннами при значительных прогибах колонн. Возникающие в результате контактного взаимодействия силовые факторы передаются на первый и второй уровни.

Детальная 3D модель графитовой кладки РБМК

Первый уровень – трехмерная конечноэлементная модель графитового блока



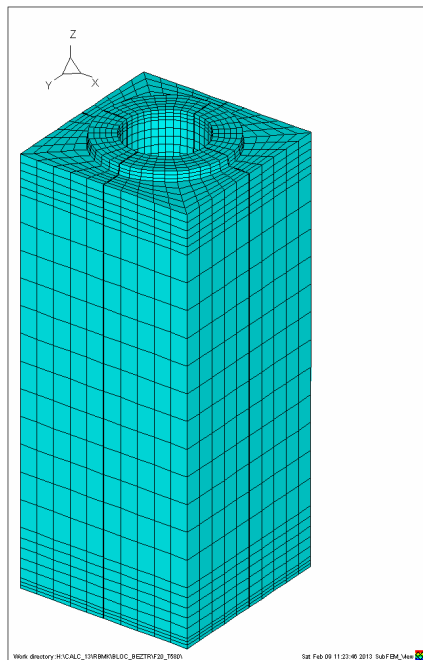
Конечноэлементная модель графитового блока (~42000 DOF)

Исходными данными по механическим свойствам графитовых блоков являются зависимости от флюенса и температуры следующих параметров:

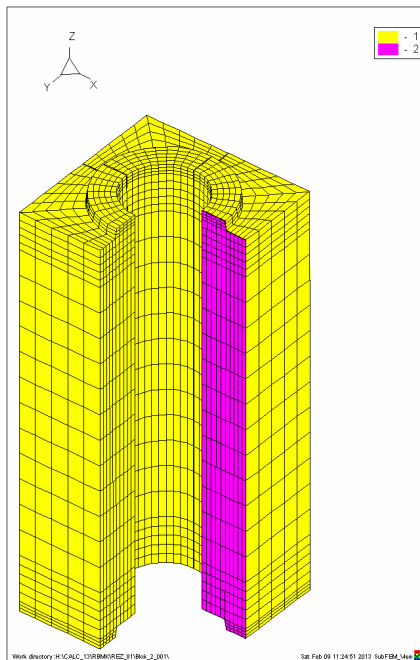
- **модуль упругости** (модуль Юнга) и модуль упругости при сдвиге (с учетом анизотропии свойств продольного и поперечного направлений);
- **предел прочности** на растяжение и предел прочности на сжатие (с учетом анизотропии свойств продольного и поперечного направлений);
- **коэффициент Пуассона**;
- **коэффициент термического расширения** (с учетом анизотропии свойств продольного и поперечного направлений);
- **характеристики радиационного формоизменения** (с учетом анизотропии свойств продольного и поперечного направлений);
- **параметры радиационной ползучести** (изотропный вариант).

Детальная 3D модель графитовой кладки РБМК

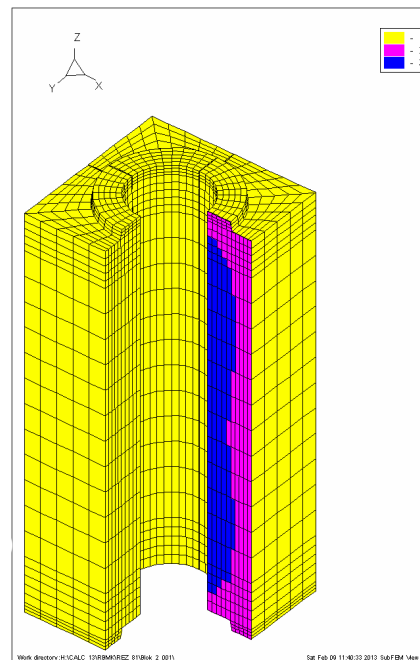
Первый уровень – трехмерная конечноэлементная модель графитового блока, Моделирование образования и раскрытия продольной трещины



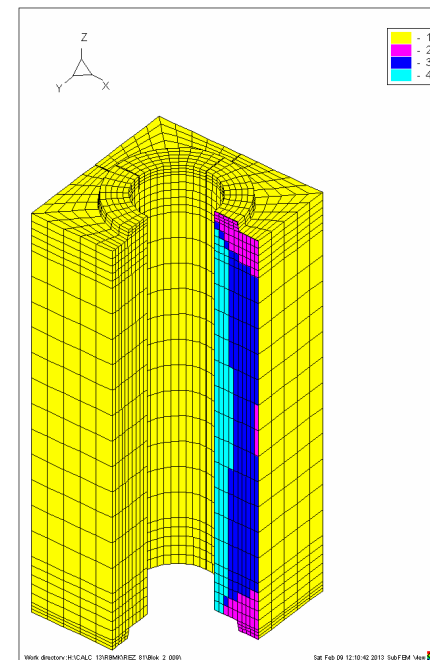
(a)



(б)



(в)

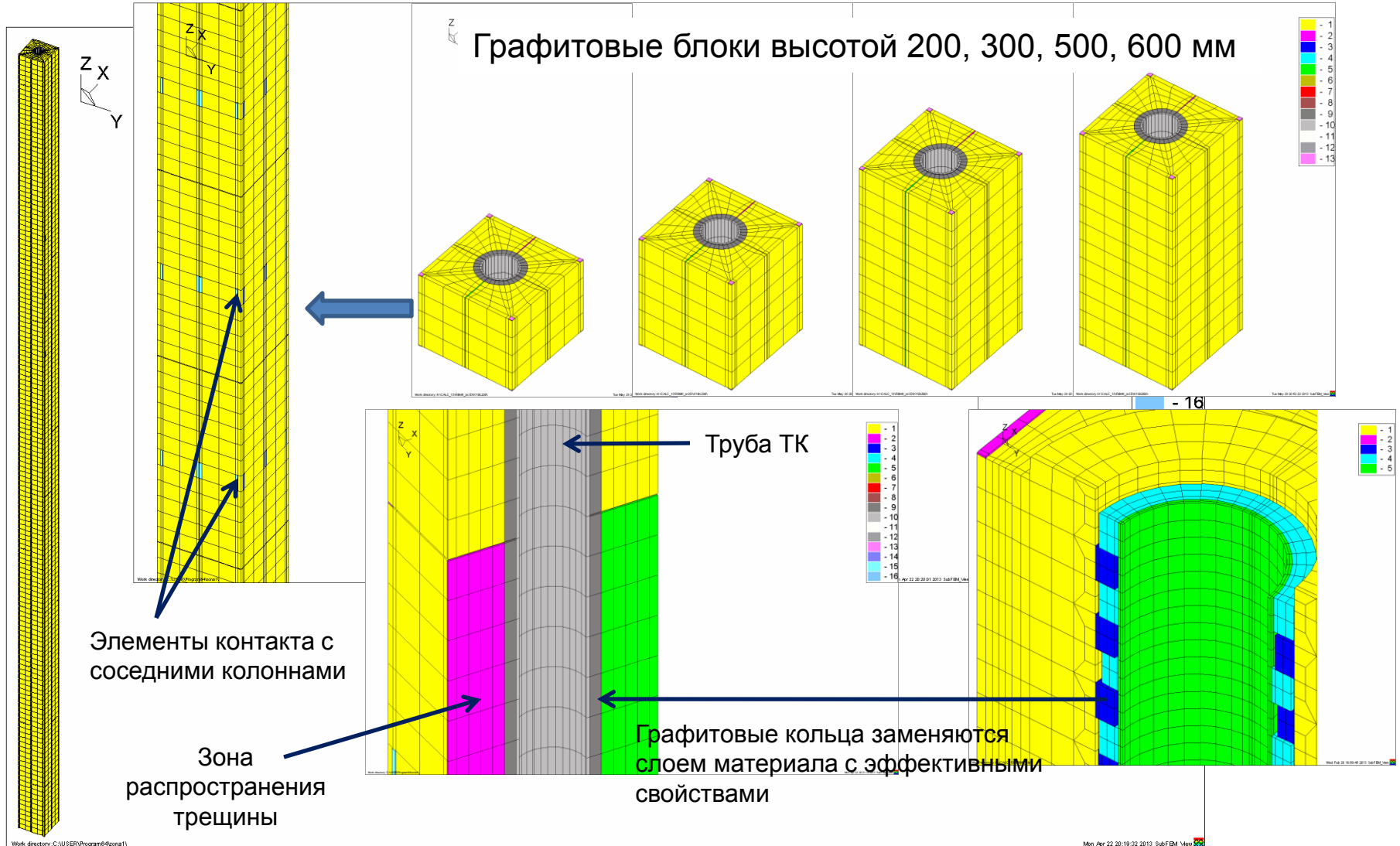


(г)

Конечноэлементная модель графитового блока РБМК-1000 - (а), ее фрагмент с заданным направлением развития трещины на начальном шаге нагружения - материал №2 (б), ее фрагмент с развивающейся в заданной перемычке трещиной - материал №3 (с). ее фрагмент с развивающейся продольной трещиной, часть берегов которой контактирует - материал №4 (г)

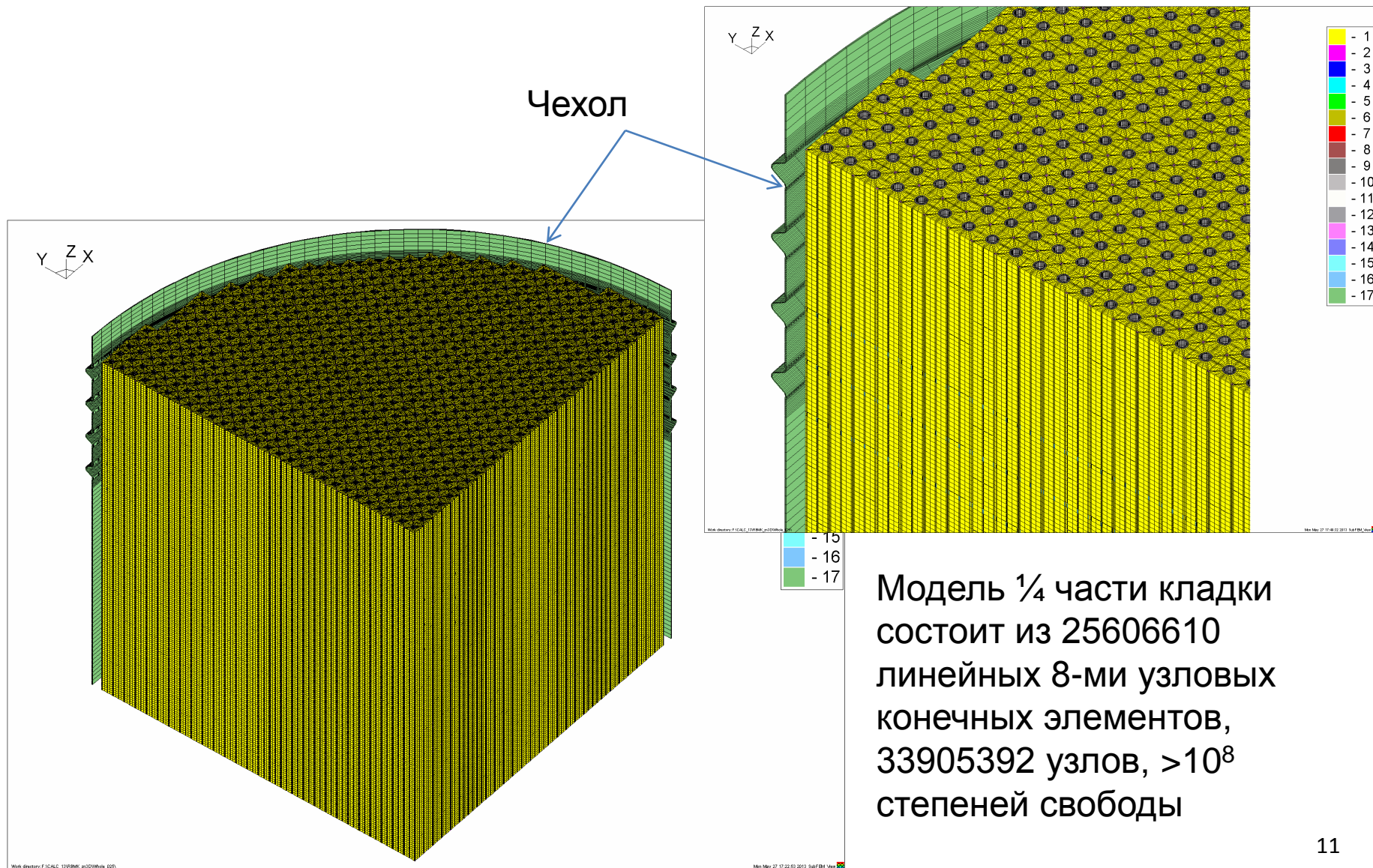
Детальная 3D модель графитовой кладки РБМК

Второй уровень – модель графитовой колонны



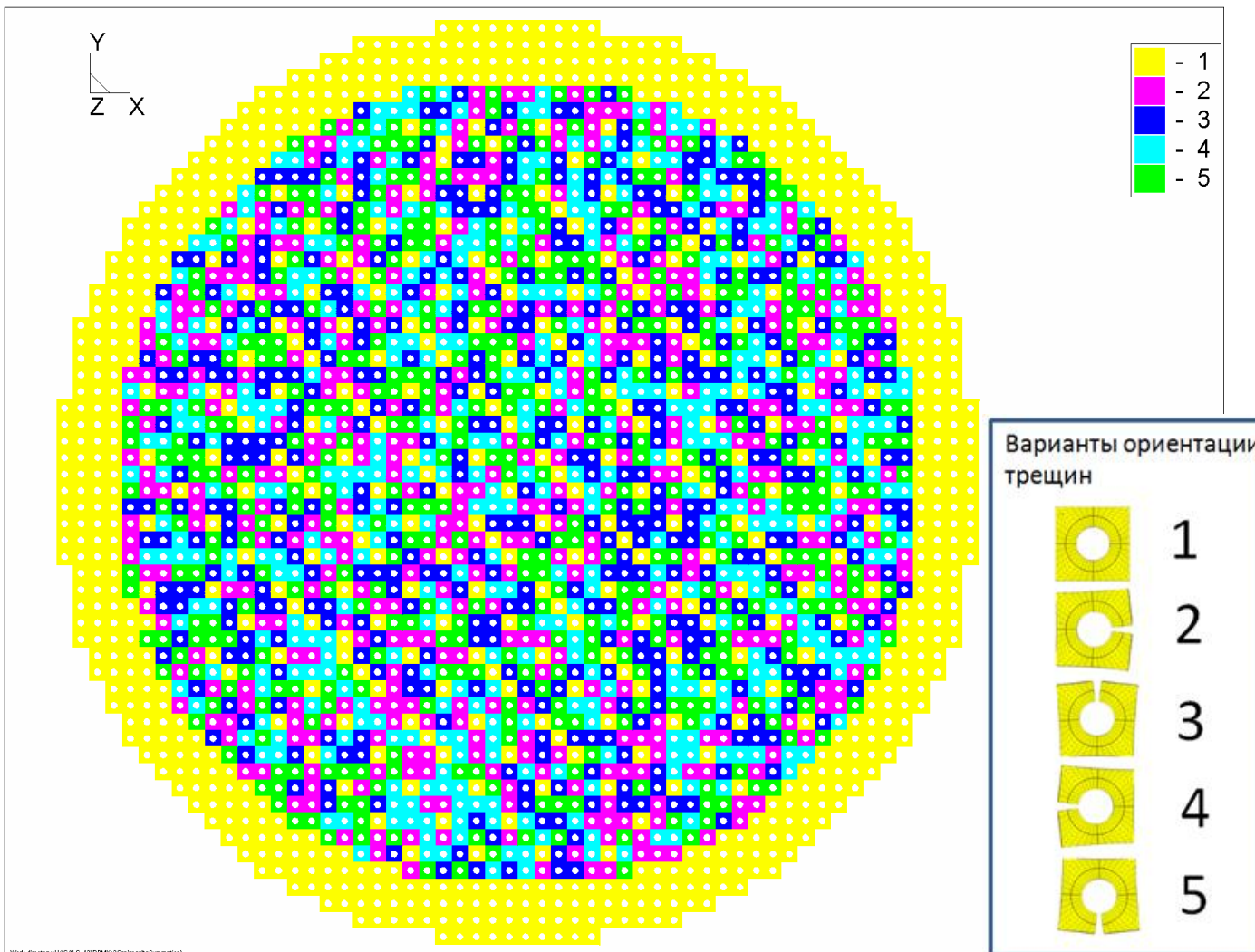
Детальная 3D модель графитовой кладки РБМК

Третий уровень – модель графитовой кладки активной зоны РБМК в целом



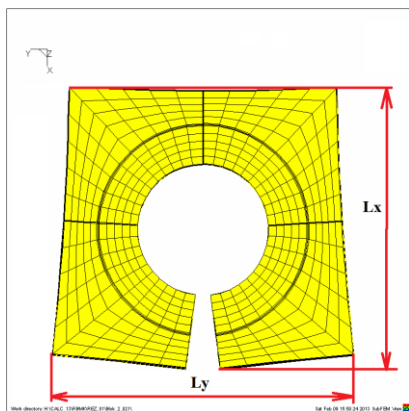
Детальная 3D модель графитовой кладки РБМК

Ориентация продольных трещин в графитовых блоках задается случайным образом, в каждом из слоев

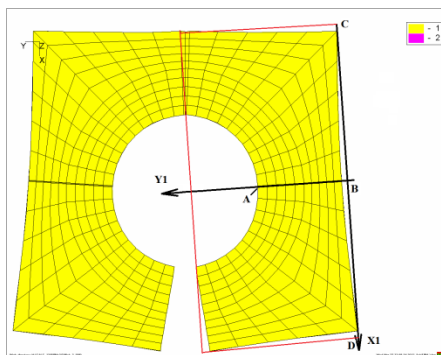


Work_directory\H\VCALC_131\RBMK\3D\results\Summation

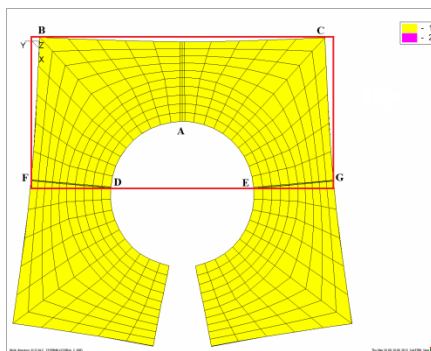
Инженерная методика суммирования изменений габаритов графитовых блоков для расчетной оценки прогибов графитовых колонн



а

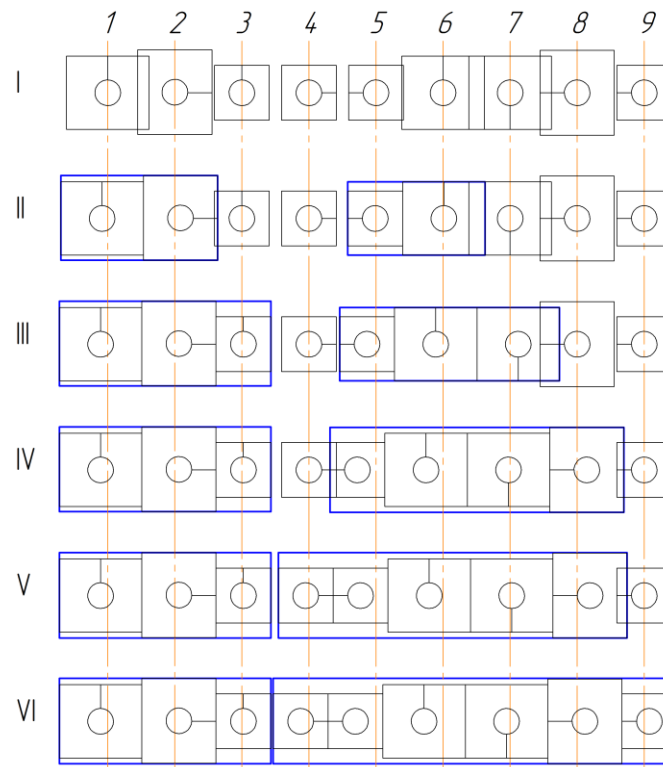


б



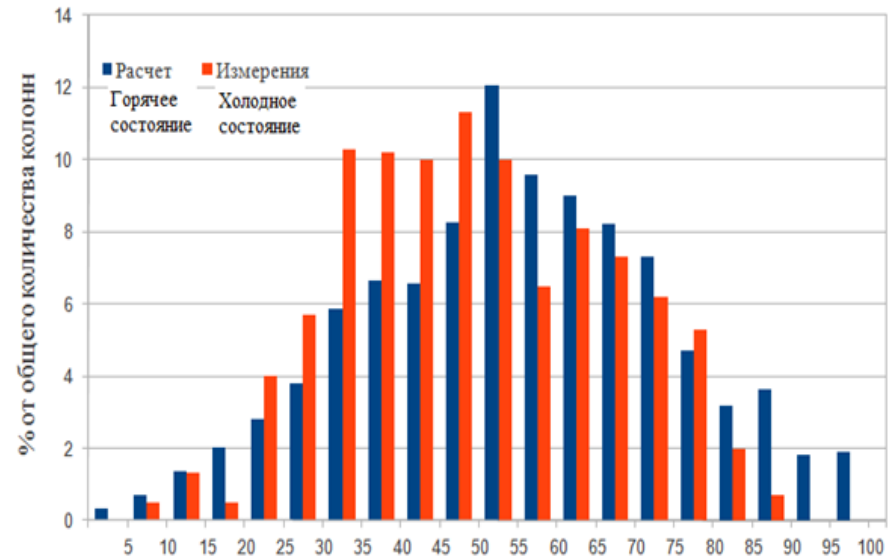
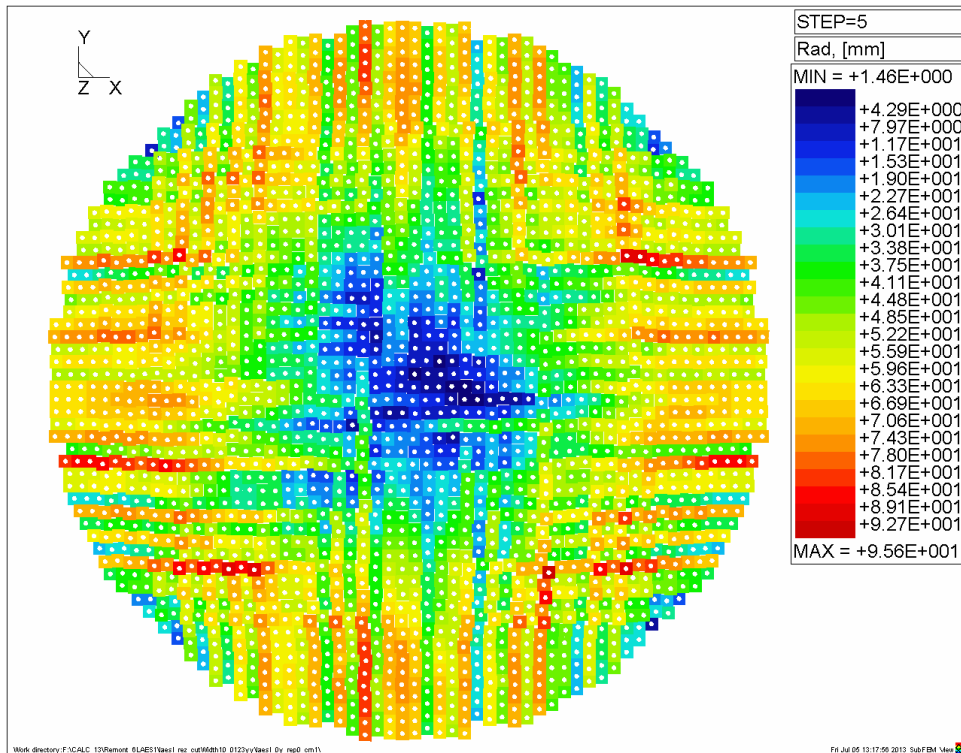
в

Схемы определения габаритов графитового блока (размеры Lx и Ly) по перемещениям узлов конечноэлементной модели перед ремонтом (а) и после ремонта резкой (б и в)



Итерационный алгоритм определения кластеров контактирующих блоков в одном из рядов колонн графитовой кладки, разработанный для расчетной оценки прогибов колонн

Распределение радиальных смещений графитовых колонн 1-ого блока ЛАЭС на момент останова на ремонт в слое Z = 5,5 – 6,0 м *инженерная методика*



Гистограмма прогибов графитовых колонн (расчетные и измеренные значения)

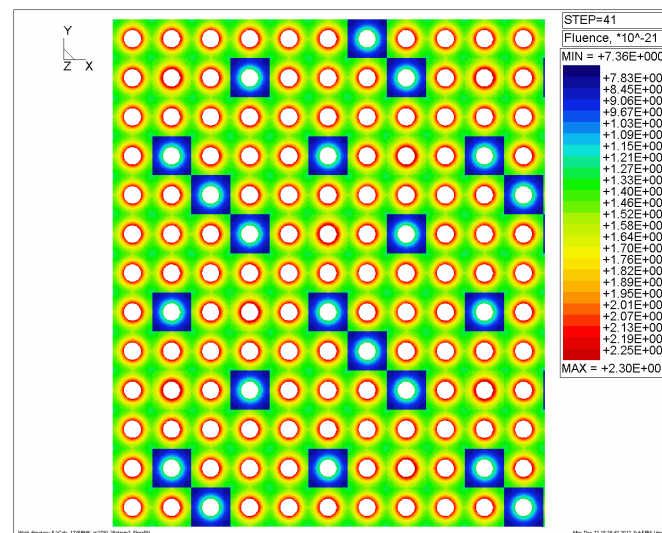
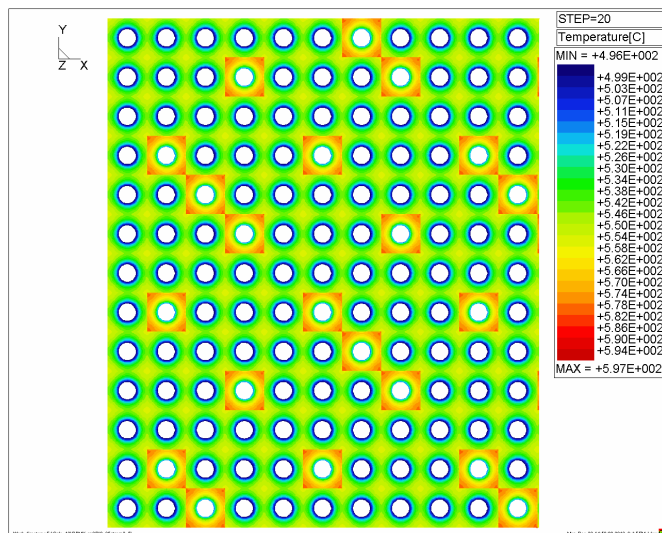
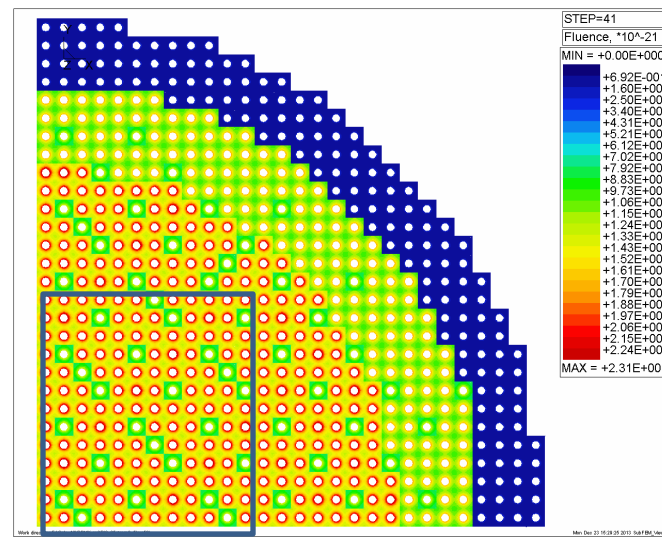
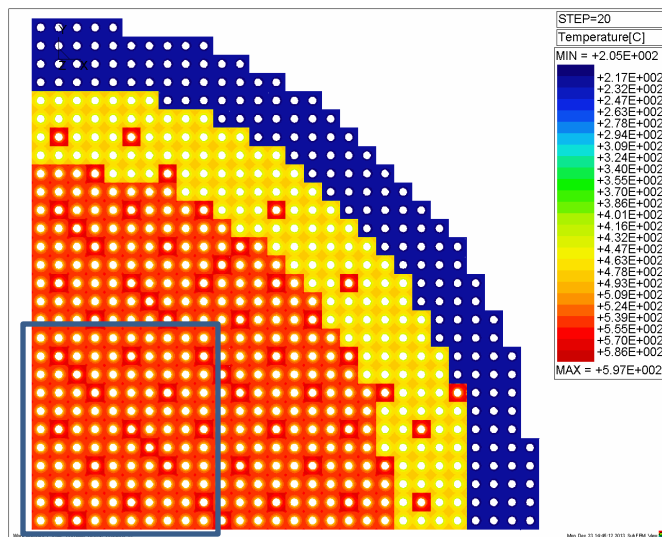
Максимальное расчетное значение прогиба – 95,6 мм (горячее состояние)

Максимальное измеренное значение прогиба – 88 мм (холодное состояние)

При разогреве кладки прогибы графитовых колонн могут увеличиваться на 4 – 12 мм.

Результаты анализа прогибов колонн кладки РБМК 1-ого блока ЛАЭС на момент останова на ремонт с применением полномасштабной модели

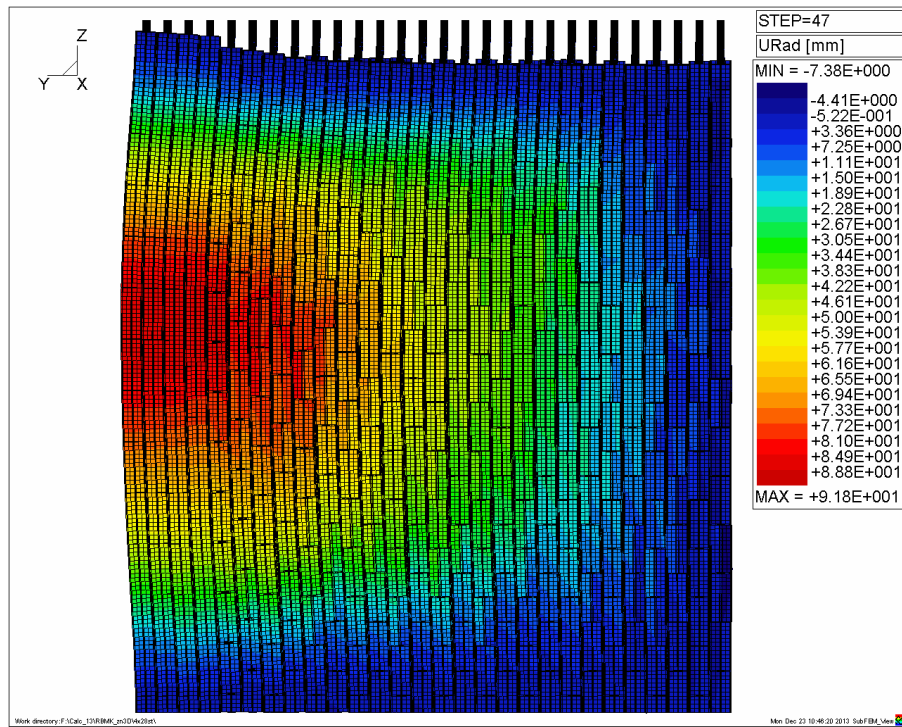
Распределение температуры и флюенса в сечении модели Z = 5,5 м



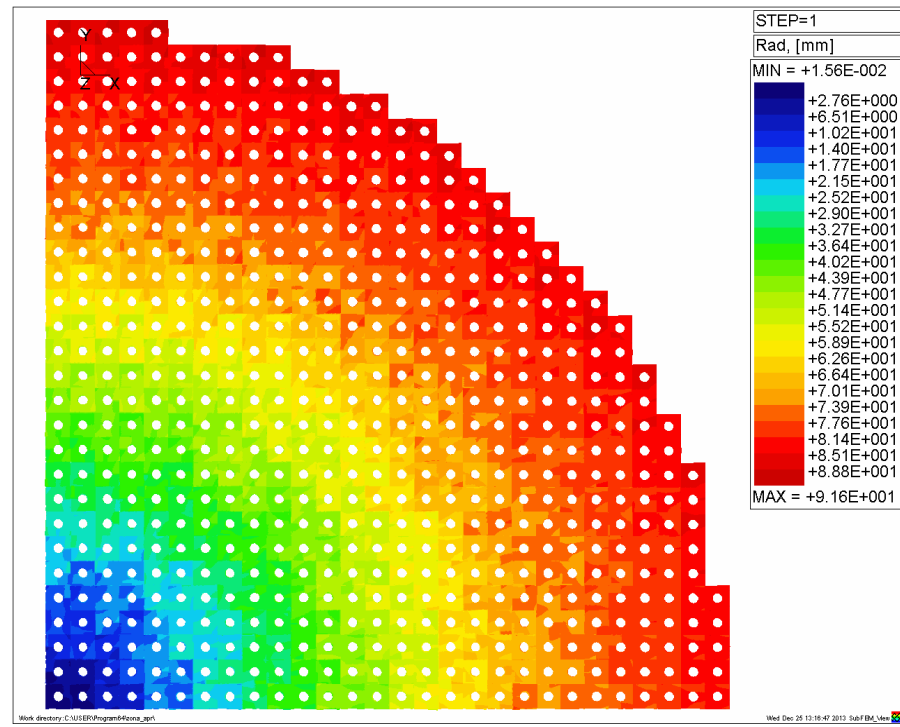
Температура

Флюенс

Результаты анализа прогибов колонн кладки РБМК 1-ого блока ЛАЭС на момент останова на ремонт с применением полномасштабной модели



а



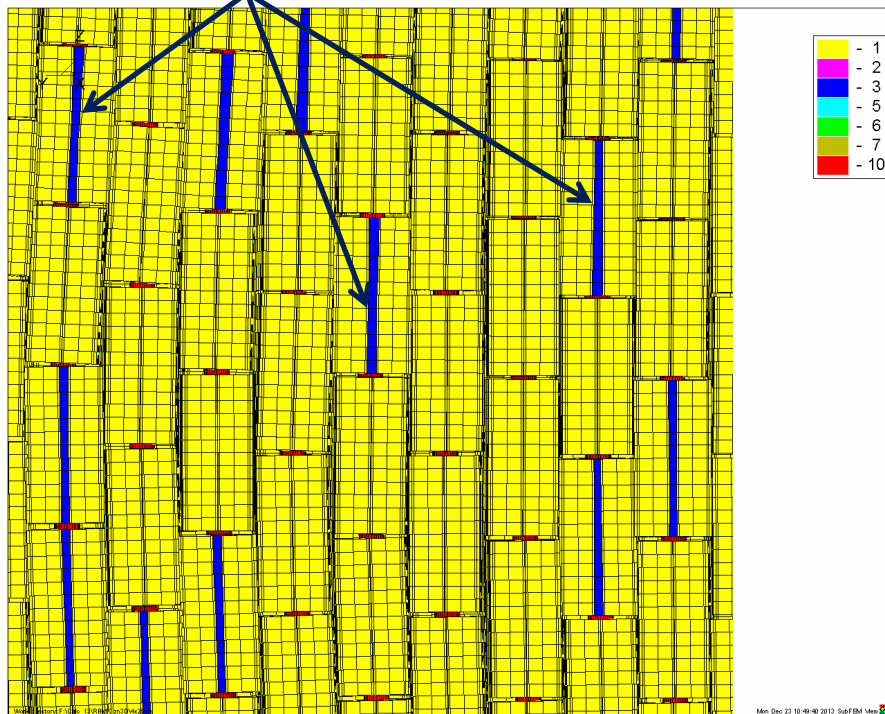
б

Распределение радиальных смещений модели графитовой кладки РБМК ЛАЭС-1 и деформированное состояние (масштаб смещений – 2) на фронтальном сечении (а) и в сечении $Z = 4,9$ м (б) для заданного варианта ориентации трещин на момент остановки на ремонт (холодное состояние).

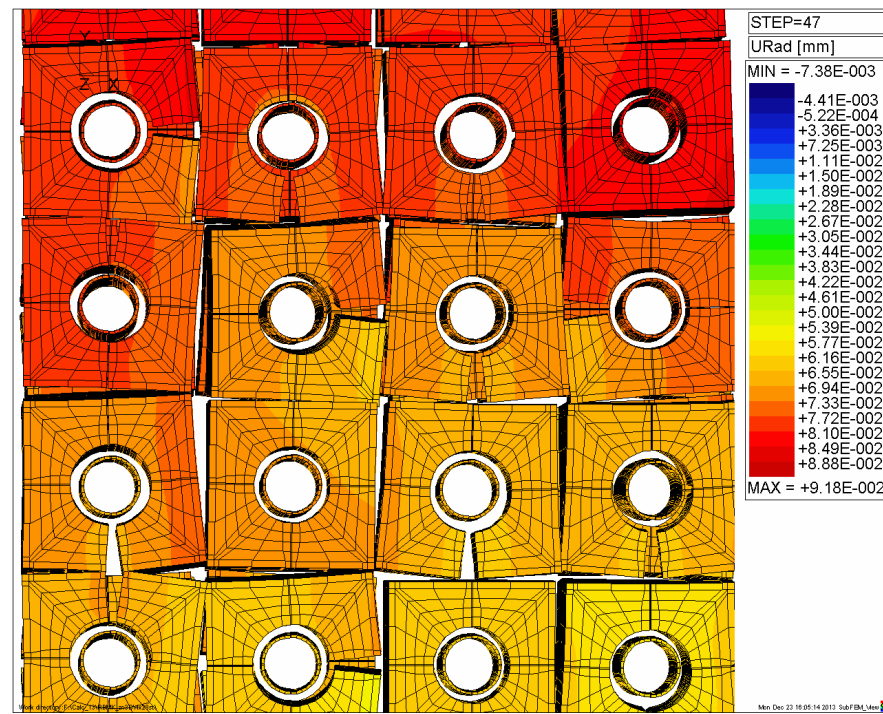
Расчетное значение максимального прогиба 87,9 мм, измеренное значение – 88 мм

Результаты анализа прогибов колонн кладки РБМК 1-ого блока ЛАЭС на момент останова на ремонт с применением полномасштабной модели

Раскрывающиеся трещины



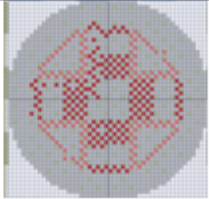

а



б

Иллюстрация характера взаимодействия графитовых блоков и колонн в полномасштабной модели графитовой кладки на увеличенных фрагментах модели (фронтальное сечение (а) и сечение $Z = 4,9$ м (б) для заданного варианта ориентации трещин на момент остановки на ремонт (холодное состояние).

Результаты анализа прогибов колонн (в мм) кладки РБМК 1-го блока ЛАЭС и 2-го блока Курской АЭС в послеремонтный период (горячее состояние)

	Без ремонта ЛАЭС-1		Ремонт ЛАЭС-1		Без ремонта КУР АЭС-2		Ремонт КУР АЭС-2	
	Вид схемы ремонта							
Уровень мощности после ремонта	80%	100%	80%	100%	80%	100%	80%	100%
После остановки на ремонт	95,6	95,6	95,6	95,6	90	90	90	90
Сразу после ремонта (холодное/горячее состояние)	-	-	50,0/ 62,0	50,0/ 62,0	-	-	48,1/ 60,9	48,1/ 60,9
Через 1 год после ремонта	111	116	75,1	77,1	105	109	70,0	71,9
Через 2 года после ремонта	129	138	87,1	95,2	120	128	77,9	84,8
Через 3 года после ремонта	148	162	104	117	135	151	91,9	104

Сопоставление результатов расчёта максимальных значений стрел прогибов труб каналов 2-ого энергоблока КУР АЭС по компьютерным кодам UZOR 1.0, FEMGR_M и стохастической модели

	До ремонта	Без ремонта		Через год после ремонта	
		80%	100%	80%	100%
Уровень мощности	100%	80%	100%	80%	100%
Максимальный прогиб (мм), UZOR 1.0.	90	105	109	70	72
Максимальный прогиб (мм), FEMGR_M.	88	106	112	73	78
Максимальный прогиб (мм), стохастическая модель	86	105	111	63	68

Выводы

- Разработаны инженерные детерминированные и стохастическая модели, а также детальная трехмерная конечноэлементная модель графитовой кладки активной зоны реактора РБМК-1000, включающая три уровня моделей конструктивных элементов – графитового блока (первый уровень), графитовой колонны (второй уровень), модель кладки в целом (третий уровень). Разработанные модели и алгоритмы позволяют проводить расчеты формоизменения графитовой кладки до и после ремонта за счет резки блоков с учетом проектных геометрии и размеров графитовых блоков, особенностей компоновки графитовых колонн и зоны в целом, воздействия неравномерных полей потока нейтронов и температуры по объему графитовых блоков, анизотропии физико-механических свойств графита, изменения физико-механических свойств графита в результате воздействия эксплуатационных факторов: температуры, облучения, радиационной ползучести, процессов образования и раскрытия продольных трещин в графитовых блоках.

- Результаты прогнозных расчетов деформирования кладки выполнены по нескольким независимо созданным методикам, использующие альтернативные гипотезы при постановке задачи.

- Результаты расчетов максимальных прогибов графитовых колонн, полученные по различным независимо созданным методикам, показали близкие результаты.