

РЕЗУЛЬТАТЫ АПРОБАЦИИ МОДЕЛИ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ КАРТОГРАММ ПРОГИБОВ ТОПЛИВНЫХ И СПЕЦИАЛЬНЫХ КАНАЛОВ В СОСТАВЕ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА РБМК-1000

Симанович В.А., Юрин А.Н. (АО «НИКИЭТ», Москва, Россия)

Введение

На этапе сверхпроектного срока эксплуатации реакторов РБМК-1000 наблюдается интенсивный рост прогибов топливных каналов (ТК) и каналов СУЗ в составе активной зоны, обусловленный деформированием графитовой кладки (ГК) в следствие формоизменения и растрескивания графитовых блоков (ГБ). Для управления ресурсными характеристиками активной зоны РБМК используется метод резки ГБ, в ходе реализации которой снижается искривление графитовых ячеек, и, как следствие, уменьшаются прогибы размещенных внутри них каналов.

Моделирование деформационных процессов ГК РБМК-1000 вследствие формоизменения и растрескивания ГБ является важной составляющей в ходе работ по управлению ресурсными характеристиками.

В АО «НИКИЭТ» расчетными исследованиями деформированного состояния ГК, включая прогнозирование прогибов каналов, на регулярной основе занимаются с 2016 года. В период с 2019 по 2023 года была разработана модель для расчета и прогнозирования прогибов ТК и каналов СУЗ в составе активной зоны РБМК-1000.

В докладе приведены результаты апробации модели для получения картограмм прогибов на примере энергоблоков № 2 Курской и № 1 Смоленской АЭС.

1. Особенности моделирования деформированного состояния графитовой кладки

Моделирование поведения ГК представляет собой нетривиальную задачу, одной из сложностей которой является корректное описание поведения графита как конструкционного материала, который по своей природе анизотропен, а также склонен к набуханию и ползучести под действием нейтронного облучения. Согласно техническому условию на изготовление графита разброс его физико-механических характеристик может достигать 30 %. Многочисленные исследования кернов, проводившиеся НИЦ «Курчатовский институт», показали, что реальный разброс свойств имеет еще большие значения. В качестве примеров, демонстрирующих масштабы данного явления, на рис. 1 и 2 приведены изменение плотности графита и прочности на сжатие кернов, отобранных из кладок энергоблока № 2 Курской АЭС. Подобный разброс также наблюдается при измерении относительного изменения динамического модуля упругости, температурного коэффициента расширения и прочих физико-механических характеристик.

К другой сложности моделирования деформированного состояния ГК относится мультипараметричность модели, обусловленная большими массивами исходных данных, необходимых для ее описания, а также степенью детализации описания нелинейных физических процессов, возникающих при формоизменении и растрескивании ГБ.

Модель для расчета прогибов каналов в составе ГК РБМК, разработанная в АО «НИКИЭТ», адаптирована ко всем выше перечисленным особенностям. Данная модель основана на суммировании изменения габаритов ГБ в двух взаимно перпендикулярных направлениях в рамках координатных четвертей, на которые активная зона делится относительно своего центра.

Для расчета прогибов каналов предварительно было получено решение задачи о напряженно-деформированном состоянии единичного ГБ в конечноэлементной постановке на базе программного комплекса ANSYS.

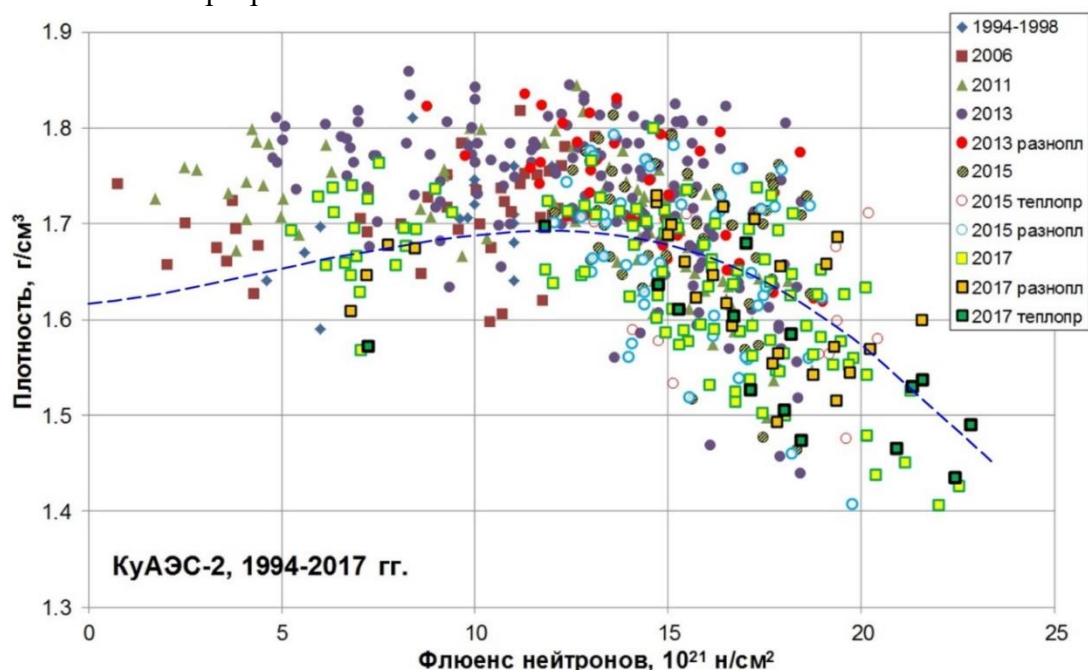


Рис. 1. Зависимость плотности графита кернов 2-го э/б КуАЭС от флюенса нейтронов

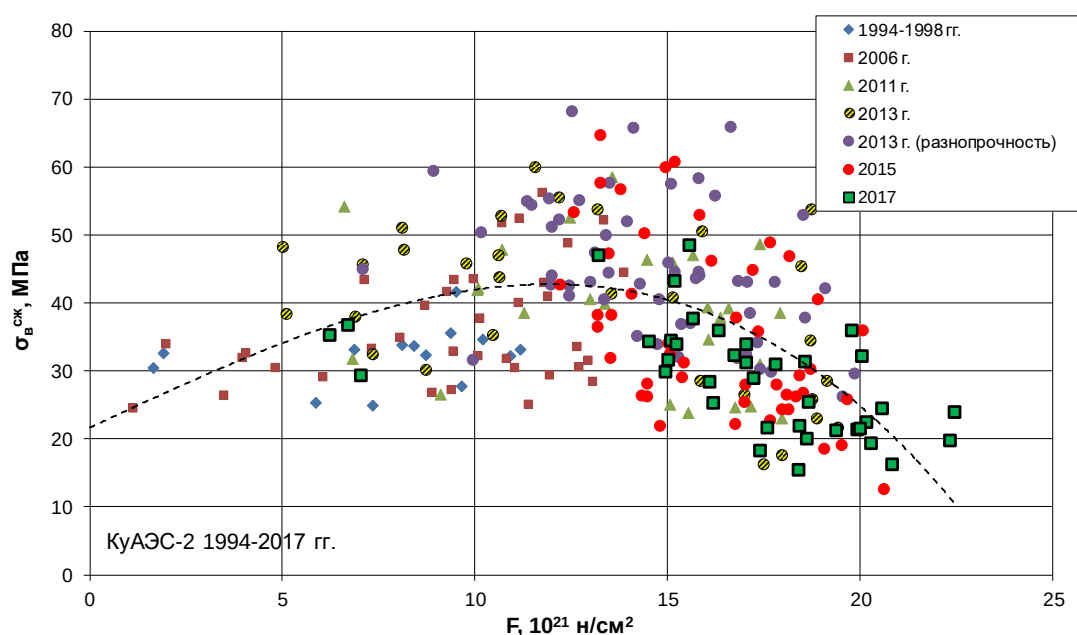


Рис. 2. Зависимость предела прочности на сжатие графита кернов из кладки 2-го э/б КуАЭС от флюенса нейтронов

Реализация расчета растрескивания ГБ осуществлялась с предварительным разделением ячеек кладки на группы в зависимости от расположения относительно каналов СУЗ:

- 1) группа 1: ячейки, которые не имеют общих границ с ячейкой канала СУЗ,
- 2) группа 2: ячейки, у которых имеется одна общая грань с ячейкой канала СУЗ,
- 3) группа 3: ячейки, по диагонали которых расположены ячейки с каналами СУЗ.

Отдельно моделировались фрагментированные ГБ, образованные в следствие резки или двойного растрескивания.

На основе разработанной модели, а также на базе фактических измерений раскрытий трещин в ГБ для каждой группы ячеек были получены функции изменений габаритов ГБ ΔL_x и ΔL_y в зависимости от накопленного флюенса.

На основе решенной задачи об изменении габаритов ГБ в зависимости от группы и накопленного флюенса была разработана модель описания деформационного состояния ГК в целом. Согласно реализованному подходу перемещения центров каналов в направлениях X и Y , вызванные взаимодействием деформированных блоков, суммируются, начиная от осей, разделяющих всю активную зону на координатные четверти, с учетом азимутального направления трещин в ГБ. На основе накопленного опыта эксплуатации постулировалось, что первичное и последующее растрескивание блоков происходит вдоль одной из плоскостей симметрии, перпендикулярных боковым граням (рис. 3). Для ячеек, в которых по итогам контроля заранее неизвестно, в какой из четырех плоскостей зародится трещина, угол, характеризующий ее направление, задается законом случайного распределения.

Прогибы каналов могут быть рассчитаны как из исходного (недеформированного состояния), так и относительно тех положений, которые фиксировались по итогам ранее реализованных работ по восстановлению ресурсных характеристик (ВРХ).

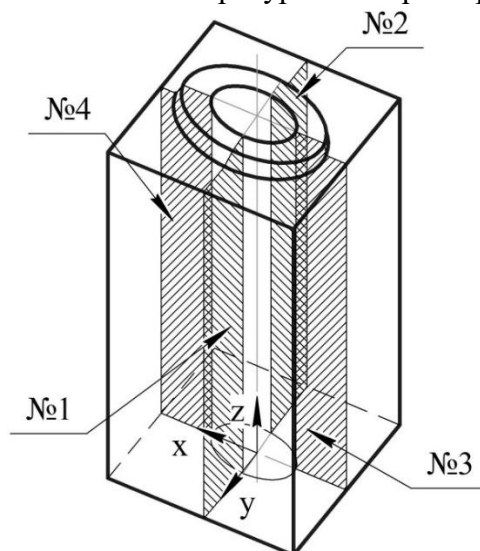


Рис. 3. Сечения, соответствующие месту зарождения первой эксплуатационной трещины

Расчет проводится с последовательным суммированием изменения габаритов ячеек относительно глобальных осей. При суммировании в рамках одного ряда учитываются только те компоненты изменения габаритов, которые сонаправлены с рассматриваемым рядом. При этом для получения корректных результатов в расчете используются данные по измеренным прогибам за предыдущие года. Вводятся понятия: «вакантная ячейка» – это ячейка, прогиб канала которой требуется определить в заданный момент времени t_k ; «ячейка-корректор» – ближайшая к «вакантной ячейке» графитовая колонна, расположенная с ней в одном ряду, прогиб канала которой был измерен на предыдущем этапе контроля, при этом:

- в общем случае «вакантная ячейка» может иметь пару «ячеек-корректоров» по направлению глобальных осей X и Y . «Ячейки-корректоры» относительно «вакантной ячейки» расположены ближе к центру кладки;

- в частном случае «вакантная ячейка» может выступить в качестве «ячейки-корректора» самой себе, если ее прогиб был измерен ранее;

- в качестве «ячеек-корректоров» берутся ячейки, прогибы которых были измерены на последнем этапе УРХ;

– в случае отсутствия у «вакантной ячейки» «ячеек-корректоров» за последний этап УРХ, в качестве «корректоров» принимаются ячейки за более ранние этапы.

По результатам расчета для каждой ячейки рассчитывается прогиб, данный алгоритм повторяется множество раз при повторных генерациях азимутов трещин. Путем сравнения со значениями измеренных ячеек, отбираются генерации, наиболее корректно отражающие реальную картину. Из этих отобранных генераций путем вычисления математического ожидания получаются итоговые стрелы прогибов для каждой ячейки в составе ГК.

2. Результаты апробации модели

2.1 Получение картограмм прогибов для энергоблока № 2 КуАЭС

Апробация разработанной модели для оценки прогибов каналов проводилась на примере э/б № 2 КуАЭС, подвергавшегося 7 резкам в период с 2014 по 2022 гг. Для сопоставления результатов расчетов с результатами измерений анализу подлежали временные отметки, предшествующие резкам в 2019, 2020, 2021 и 2022 гг. Расчет прогибов проводился при разных сочетаниях генерируемых азимутов, при общем количестве комбинаций в объеме 10 000 на каждую временную отметку.

Для оценки примененного модифицированного подхода к расчету прогиба каналов были рассмотрены все ячейки, проконтролированные до начала резки в каждом году, общим количеством $N_{2019\Sigma} = 201$, $N_{2020\Sigma} = 234$, $N_{2021\Sigma} = 253$ и $N_{2022\Sigma} = 239$.

Результаты сравнения расчетных значений прогибов с измеренными по итогам ВРХ, а также картограммы с расчетными значениями прогибов каналов по всей ГК на момент останова э/б № 2 КуАЭС, предшествующий началу резки ГБ, приведены на рис. 4–11. Сводные данные по всем расчетным отметкам (2019, 2020, 2021 и 2022) представлены в таблице 1.

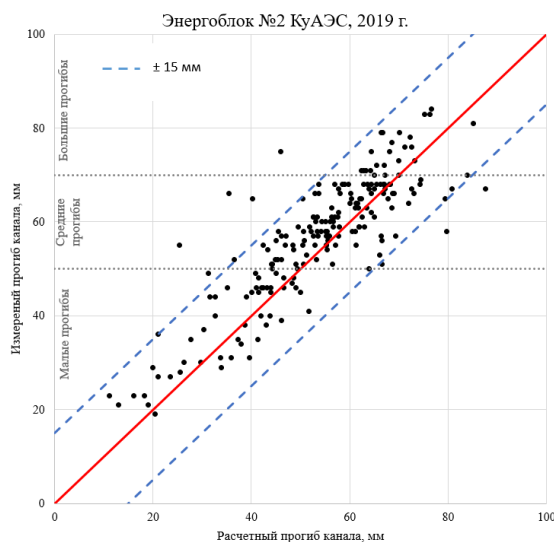


Рис. 4. Расчетные и измеренные прогибы каналов контрольных ячеек э/б № 2 КуАЭС на апрель 2019 года

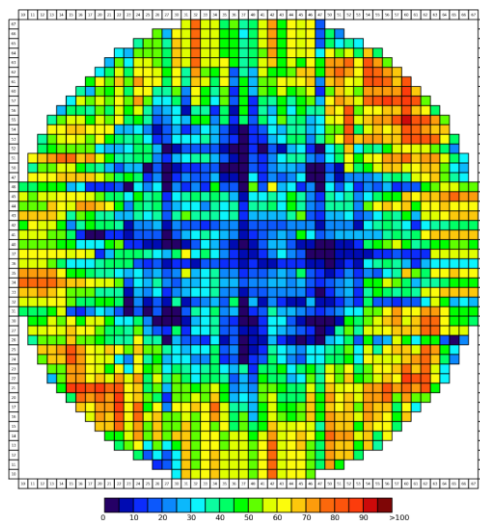


Рис. 5. Картограмма расчетных прогибов каналов э/б № 2 на апрель 2019 года

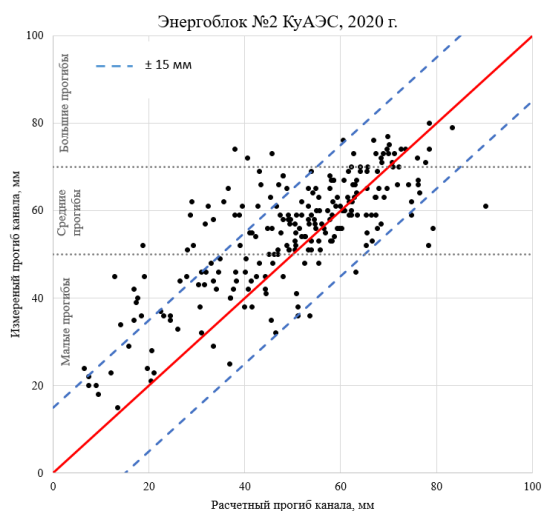


Рис. 6. Расчетные и измеренные прогибы каналов контрольных ячеек э/б № 2 КуАЭС на апрель 2020 года

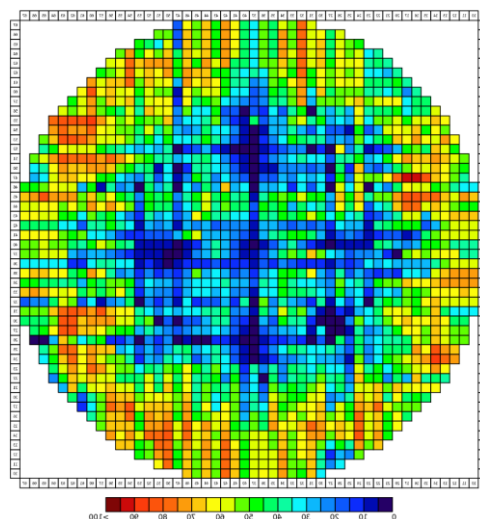


Рис. 7. Картограмма расчетных прогибов каналов э/б № 2 на апрель 2020 года

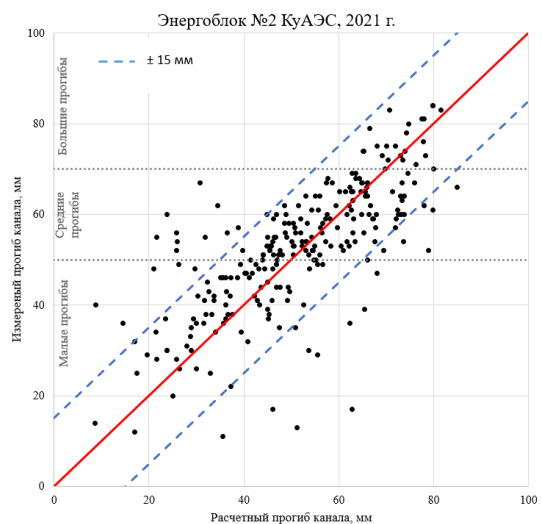


Рис. 8. Расчетные и измеренные прогибы каналов контрольных ячеек э/б № 2 КуАЭС на апрель 2021 года

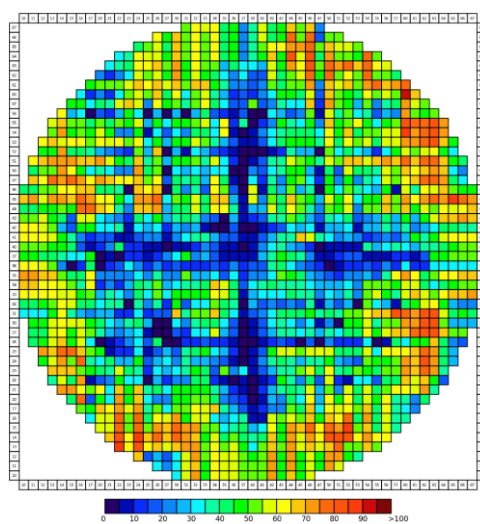


Рис. 9. Картограмма расчетных прогибов каналов э/б № 2 на апрель 2021 года

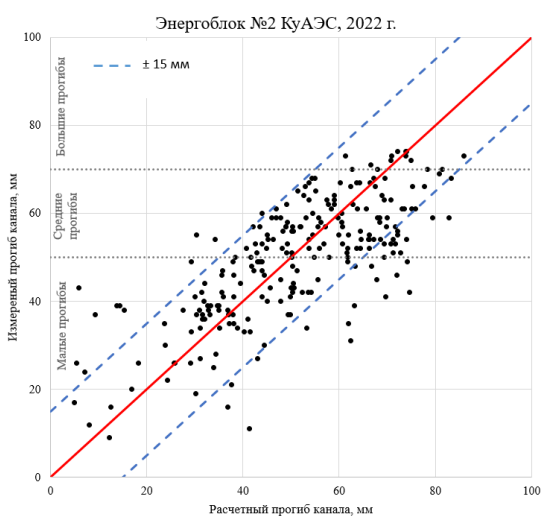


Рис. 10. Расчетные и измеренные прогибы каналов контрольных ячеек э/б № 2 КуАЭС на апрель 2022 года

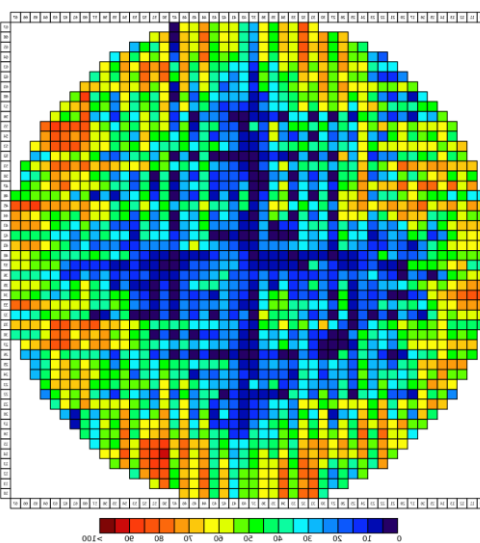


Рис. 11. Картограмма расчетных прогибов каналов э/б № 2 на апрель 2022 года

Таблица 1

**Общая сводка расхождения рассчитанных и измеренных прогибов каналов
ГК э/б № 2 КуАЭС за разные года**

Параметры ячеек		Год измерения			
		2019	2020	2021	2022
Количество проконтролированных ячеек		201	234	253	239
Средняя относительная разница между расчетными и измеренными прогибами в рамках контрольной выборки ячеек (во всем диапазоне прогибов), %		12,1	18,3	20,0	22,2
Средняя абсолютная разница между расчетными и измеренными прогибами в рамках контрольной выборки ячеек (во всем диапазоне прогибов), мм		6,4	9,1	8,3	9,4
Ячейки, для которых абс. разница между расчетом и измерением в пределах 15 мм в рамках контрольной выборки	Среди всех ячеек	94,6%	80,8%	86,6%	83,3%
	Среди ячеек с большими прогибами	99,5%	98,3%	100,0%	100,0%
	Среди ячеек с большими и средними прогибами	95,6%	87,2%	93,3%	93,8%

Для большинства каналов контрольных ячеек абсолютная разница расчетных прогибов $U_{\text{расч(изм)}}$ по отношению к измеренным $U_{\text{изм}}$ не превышала 15 мм, а средняя абсолютная разница между расчетными и измеренными прогибами находилась в пределах 10 мм (по всем контрольным ячейкам за все года расчета). Наибольшая разница между расчетным и измеренным прогибами характерна для каналов с малыми прогибами (до 50 мм). Расхождение является следствием того, что данный диапазон соизмерим с изменением габаритных размеров отдельно взятой ячейки за счет раскрытия трещин в ГБ или по причине их резки на фрагменты фрезой, ширина которой на разных этапах ВРХ изменялась от 12 до 36 мм. С учетом данного фактора делать выводы о корректности работы алгоритма на примере каналов с малыми прогибами не целесообразно. В то же время для каналов, прогибы которых отнесены к средним от 50 до 69 мм и большим от 70 мм и выше, на уровне абсолютной разницы наблюдалось хорошее соответствие между расчетом и измерениями. Отдельно стоит отметить, что расхождение более 15 мм для ячеек с большими прогибами носит единичный характер (1 ячейка в 2019, 4 ячейки в 2020, 0 ячеек в 2021 и 2022 годах).

Для анализа соответствия полученных результатов с результатами измерений также были сопоставлены максимальные значения расчетных прогибов в масштабах всей кладки с максимальными прогибами ячеек в составе контрольных выборок. По итогам сопоставления установлено, что за 2019, 2020 и 2021 гг. данные величины хорошо соотносятся друг с другом, а также то, что количество ячеек, расчетный прогиб которых превышал бы максимальные измеренные значения, составляет менее одного процента от общего количества ячеек в составе кладки. Вместе с тем из анализа результатов за 2022 г. следует, что максимальные расчетные прогибы получились несколько завышенными по отношению к измеренным, при общем возрастании числа ячеек, расчетный прогиб которых больше максимально измеренного. Полученная разница свидетельствует о том, что на поздних этапах эксплуатации модель «слабо чувствует» снижении скорости формоизменения ГК, вызванное сильной «перфорированностью» кладки по причине многократных резок графита, и в данном аспекте требует доработки. Результаты сравнения для каждого года приведены в таблице 2.

Таблица 2

**Результаты сравнения максимальных рассчитанных прогибов в составе всей кладки э/б
№ 2 КуАЭС за разные года с результатами измерений**

Параметры ячеек	Результаты за разные года			
	2019	2020	2021	2022
Количество ячеек в контрольной выборке	201	234	253	239
Максимальный измеренный прогиб среди ячеек в составе контрольной выборки, мм (ячейка)	84 (2462)	80 (2360)	84 (3062, 2462)	74 (1524, 1530, 1531)
Максимальный расчетный прогиб среди ячеек в составе контрольной выборки, мм (ячейка)	87,7 (2120)	90,4 (4717)	84,9 (4565)	85,9 (4565)
Количество ячеек из выборки, прогиб которых больше максимально измеренного, мм	2	2	1	15
Процент ячеек из выборки, прогиб которых больше максимально измеренного	0,99%	0,85%	0,40%	6,25%
Максимальный расчетный прогиб среди всех ячеек в составе кладки, мм (ячейка)	92,9 (5560)	92,2 (4716)	89,5 (6060)	91,1 (1450)
Количество ячеек из всей кладки, прогиб которых больше максимально измеренного в составе контрольной выборки, мм	13	18	9	85
Процент ячеек из всей кладки, прогиб которых больше максимально измеренного, %	0,69%	0,95%	0,48%	4,50%

Примечание: общее количество ячеек в составе кладки 1887

2.2 Получение картограмм прогибов для энергоблока № 1 САЭС

Особый интерес для оценки работоспособности модели представляет расчет кладки, ранее не подвергавшейся резке. К энергоблоку с таким типом ГК относится э/б № 1 Смоленской АЭС, для которого был проведен расчет деформированного состояния каналов, и выполнено сопоставление результатов расчетов прогибов с результатами измерений на момент останова э/б в 2022 году. Для оценки полученных результатов были рассмотрены ячейки, проконтролированные на момент останова общим количеством $N_{2022\Sigma} = 290$.

Выводы о работе модели на примере ГК э/б № 1 САЭС повторили выводы полученные на основе ГК э/б КуАЭС-2, что свидетельствует о корректности используемых в ходе моделирования подходов. Результаты сравнения расчетных значений прогибов с измеренными представлены на рис. 12 и в табл. 3.

Для дополнительной оценки результатов расчета прогибов каналов в составе ГК э/б № 1 САЭС (рис.13) было проведено их сопоставление с результатами расчета по программе GRAD (аттестационный паспорт № 519 от 09.07.2021 [1]), разработанной в НИЦ «Курчатовский институт» для прогнозирования деформированного состояния ГК (рис. 14).

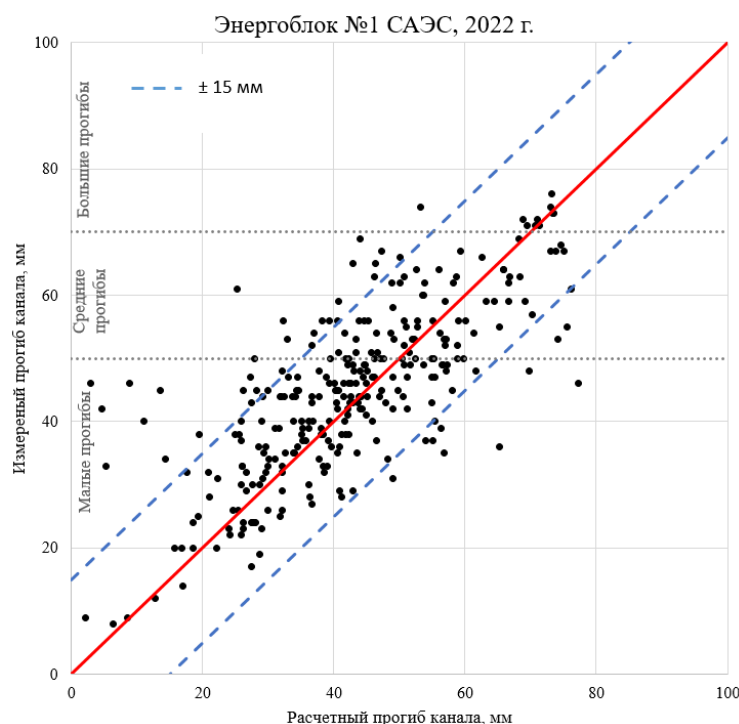


Рис. 12. Расчетные и измеренные прогибы каналов контрольных ячеек э/б № 1 САЭС на момент останова в 2022 году

Таблица 3

**Общая сводка расхождения рассчитанных и измеренных прогибов каналов ГК э/б № 1
САЭС за 2022 год**

Общее количество ячеек в составе кладки		1884
Количество проконтролированных ячеек		290
Средняя относительная разница между расчетными и измеренными прогибами в рамках контрольной выборки ячеек (во всем диапазоне прогибов)		18,3 %
Средняя абсолютная разница между расчетными и измеренными прогибами в рамках контрольной выборки ячеек (во всем диапазоне прогибов)		7,8 мм
Ячейки, для которых абсолютная разница между расчетом и измерением в пределах 15 мм в рамках контрольной выборки ячеек	Среди всех ячеек	43
	Среди ячеек с большими прогибами	1
	Среди ячеек с большими и средними прогибами	20
Максимальный измеренный прогиб среди ячеек в составе контрольной выборки (ячейка)		76 мм (4414)
Расчетное значение прогиба в ячейке, имеющей максимальное реальное значение прогиба из измеренных в год расчета (ячейка)		73,2 мм (4414)
Максимальный расчетный прогиб среди ячеек в составе контрольной выборки, мм (ячейка)		77,3 мм (3166)
Количество ячеек из выборки, прогиб которых больше максимально измеренного		2
Процент ячеек из выборки, прогиб которых больше максимально измеренного		0,7 %
Максимальный расчетный прогиб среди всех ячеек в составе кладки, мм (ячейка)		84,2 мм (4715)
Количество ячеек из всей кладки, прогиб которых больше максимально измеренного в составе контрольной выборки		10
Процент ячеек из всей кладки, прогиб которых больше максимально измеренного		0,5 %

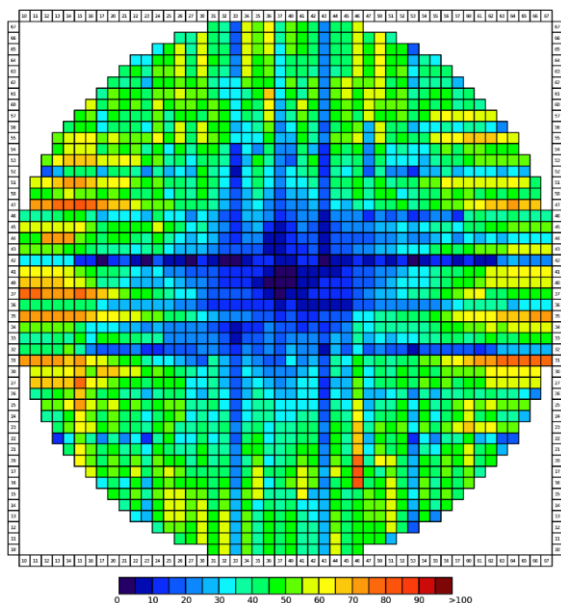


Рис. 13. Картограмма расчетных прогибов каналов
э/б № 1 САСЭ на момент останова в 2022 году

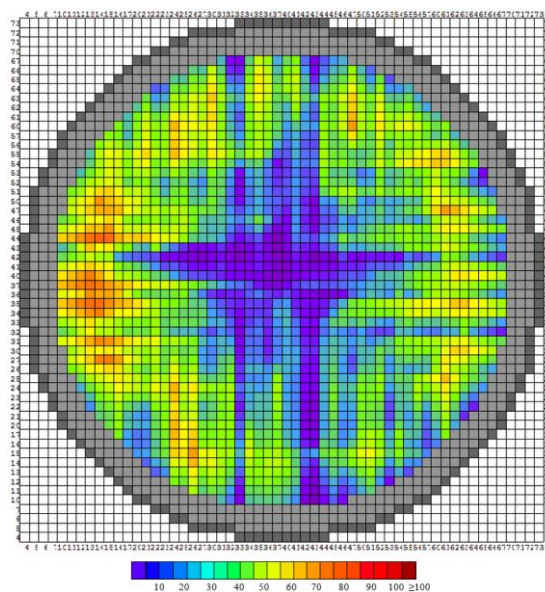


Рис. 14. Картограмма прогибов э/б № 1 САСЭ в
2022 году по программе GRAD

Максимальный расчетный прогиб по GRAD в 2022 году равен 77 мм, аналогичное значение согласно модели АО «НИКИЭТ» – 84,2 мм. Расхождение максимальных расчетных значений прогибов составило менее 10%. Также стоит отметить схожий характер картограмм, приведенных на рисунках 13 и 14.

Выводы

Несмотря на большой разброс исходных данных разработанная модель продемонстрировала хорошую сходимость расчетных прогибов с измеренными. Модель апробирована на примере ГК энергоблоков № 2 Курской и № 1 Смоленской АЭС путем сравнения расчетных прогибов с измеренными, а также на основе их сопоставления с результатами, полученными на основе программы GRAD.

Разработанная модель может быть использована для оптимизации резки графитовой кладки за счет обоснованного выбора количества и схемы расположения ячеек под резку, а также при обосновании безопасности эксплуатации энергоблоков после очередных этапов ВРХ.

Список литературы

1. Программа расчета формоизменения графитовой кладки реакторов РБМК на основе стохастической модели GRAD. Ростехнадзор, аттестационный паспорт №519 от 09.07.21.