



НИКИЭТ
РОСАТОМ

Комплекс экспериментальных работ в поддержку обоснования безопасности энергоблоков РБМК на завершающем этапе эксплуатации

АО «НИКИЭТ» / МНТК / 14-17.11.2023

Подосинников Александр Александрович
Начальник группы управления ресурсом
элементов активной зоны РБМК

Экспериментальные работы в АО «НИКИЭТ» в рамках НИОКР:

- 1. Исследование силового взаимодействия элементов МК схемы «КЖ» и графитовой кладки**
- 2. Обоснование консервативности минимального предельно-допустимого значения прочности реакторного графита**

Исследование силового взаимодействия элементов МК схемы «КЖ» и графитовой кладки

Цели работы:

1. Определение предельного значения совместного перемещения графитовой колонны и МК схемы «КЖ» реактора РБМК.
2. Экспериментальное подтверждение расчетов, выполненных АО «НИКИЭТ», ЗАО «ЦНИИ ПСК им. Мельникова», АО «ОКБМ Африкантов»

Предпосылки:

Контакт периферийных колонн ГК (ячеек КОО) с МК схемы «КЖ» вследствие формоизменения ГК

МК схемы «КЖ»



Графитовый блок ячейки КОО

Исследование силового взаимодействия элементов МК схемы «КЖ» и графитовой кладки



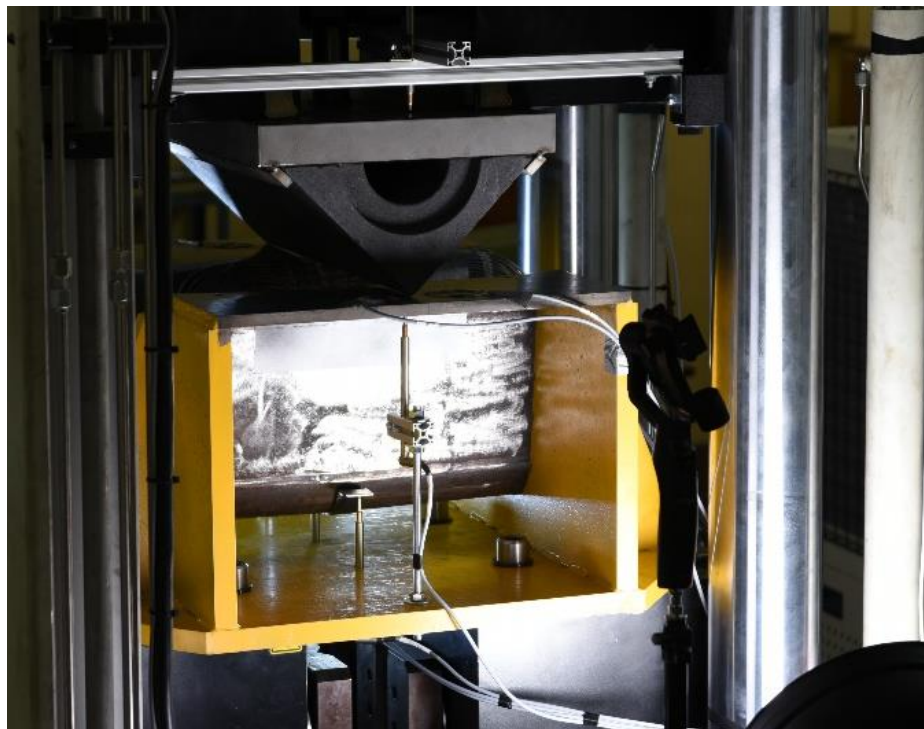
Экспериментальные исследования:

1. Испытание фрагмента макета МК схемы «КЖ» и имитатора ГБ на испытательной машине Instron 8806
2. Испытание полномасштабного макета МК схемы «КЖ»

Цели исследований:

1. Исследование полей деформации и перемещений элементов конструкции при нагружении со стороны ГБ
2. Исследование поведения конструкции МК схемы «КЖ» при нагружении графитовой колонной

Исследование силового взаимодействия элементов МК схемы «КЖ» и графитовой кладки



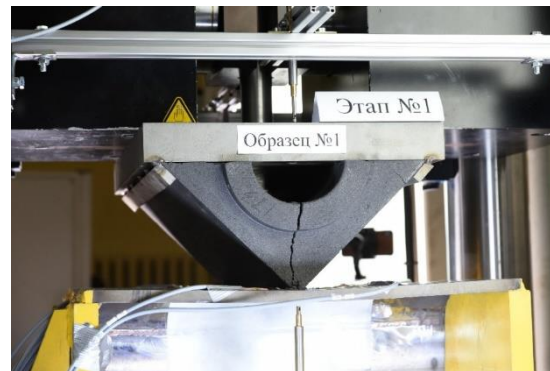
Испытание фрагмента макета МК схемы «КЖ» и имитатора ГБ на испытательной машине Instron 8806



Испытание полномасштабного макета МК схемы «КЖ»

Испытание фрагмента макета МК схемы «КЖ» и имитатора ГБ на испытательной машине Instron 8806

Параметры эксперимента		Этап 1	Этап 2	Этап 3
		ГБ №1		ГБ №2
Максимальное перемещение ГБ	$\Delta_{\text{ГБ}}$, мм	17,5	22,5	37,5
Максимальное перемещение «КЖ»	$\Delta_{\text{КЖ}}$, мм	6,3	12,4	19,6
Максимальная нагрузка	F, т	21,7	29	40,5
Появление трещины в ГБ	F, т $\Delta_{\text{КЖ}}$, мм	13,5 10,2	- -	13,8 10,5
Остаточный прогиб «КЖ»	$\Delta_{\text{КЖ}}$, мм	-	6,7	12,3



Испытание фрагмента макета МК схемы «КЖ» и имитатора ГБ на испытательной машине Instron 8806. Результаты испытаний

Этап №1 (ГБ № 1)

Достигнуто перемещение – $\Delta_{\text{кж}}=6,2\text{мм}$. Эквивалентное перемещение ГК и МК схемы «КЖ» – $\Delta=50\text{ мм}$.

Целостность макета МК схемы «КЖ» не нарушена. Зафиксировано выкрашивание контактной поверхности ГБ, при нагружении усилием $F=135\text{ кН}$ ($10,2\text{ мм}$) произошло раскалывание ГБ вдоль оси.

Этап №2 (ГБ № 1)

Достигнуто перемещение – $\Delta_{\text{кж}}=11,5\text{мм}$. Эквивалентное перемещение ГК и МК схемы «КЖ» вызывает появление пластических деформаций и разрушение МК схемы «КЖ» (согласно расчету).

Целостность макета МК схемы «КЖ» не нарушена.

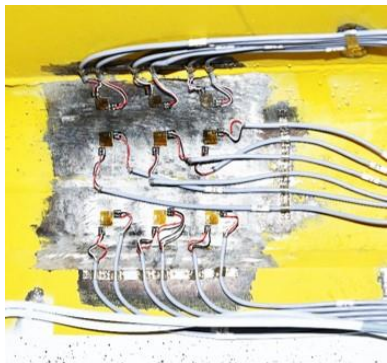
Этап №3 (ГБ № 2)

Достигнуто предельное перемещение – $\Delta_{\text{кж}}=16,6/19,6\text{ мм}$. Эквивалентное перемещение ГК и МК схемы «КЖ» вызывает появление пластических деформаций и разрушение МК схемы «КЖ» (согласно расчету).

Максимальное усилие на ГБ составило $F=405\text{ кН}$. Целостность макета МК схемы «КЖ» не нарушена.

В результате испытаний происходило выкрашивание и растрескивание графита, деформация макета. Дефектов в макете не зафиксировано.

Испытание полномасштабного макета МК схемы «КЖ»



Зона установки ЦТПП



**Датчик перемещений
оптический (ДПО)**



**Датчик перемещений
ИГК штоковый (ДПС)**



Камера КЦИ



Место контроля деформаций



Датчики ТРУ

Испытание полномасштабного макета МК схемы «КЖ». Графитовая колонна

Параметры эксперимента		Этап 1	Этап 2
		Графитовый ИГК	
Максимальное перемещение ИГК	$\Delta_{ГБ_верх}$, мм	24,4	38,7*
	$\Delta_{ГБ_низ}$, мм	45,2	70,0*
Максимальное перемещение «КЖ»	$\Delta_{КЖ}$, мм	21,3	34,3
Максимальная нагрузка	F, т	49,5	71,3
	F _{пред} , т	50	100
Появление трещин в ГБ	F, т	27	-
	$\Delta_{КЖ}$, мм	9,8	-
Остаточное смещение «КЖ»	$\Delta_{КЖ}$, мм	7,3	16,3
Деформации «КЖ»	Макс. %	1,23	2,21
	Остат. %	0,76	1,51

* с учетом результатов по этапу 1

Замена датчика силы

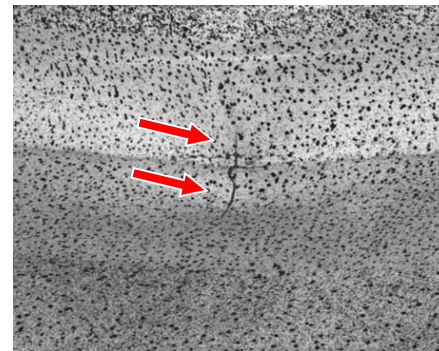
Разрушение ГК



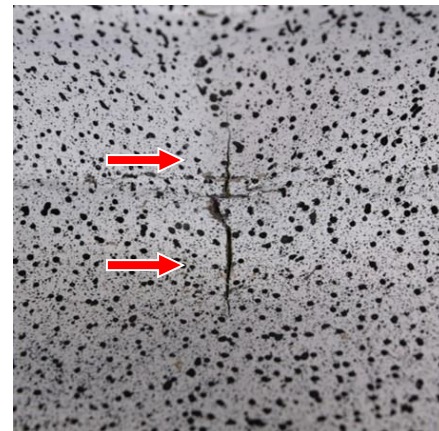
Испытание полномасштабного макета МК схемы «КЖ». Стальная колонна

Параметры эксперимента		Этап 3	Суммарно*
		Стальной ИГК	
Максимальное перемещение ИГК	$\Delta_{\text{верх}}, \text{ мм}$ $\Delta_{\text{низ}}, \text{ мм}$	46,4 71,9	-
Максимальное перемещение «КЖ»	$\Delta_{\text{КЖ}}, \text{ мм}$	50,3	66,6
Максимальная нагрузка	$F, \text{ т}$ $F_{\text{пред}}, \text{ т}$	142,7 300	-
Появление трещин в «КЖ»	$\Delta_{\text{КЖ}}, \text{ мм}$	49,0	65,3
Деформации «КЖ»	Макс. %	13,35	15,13

* с учетом результатов с графитовым ИГК



КЦИ 1



КЦИ 2

Испытание полномасштабного макета МК схемы «КЖ». Выводы

1. Подтверждена расчетная величина совместного перемещения ГК и МК схемы «КЖ» – 50 мм.
2. При силовом взаимодействии МК схемы «КЖ» и графитовой кладки не происходит нарушения целостности металла МК схемы «КЖ» при их совместном перемещении

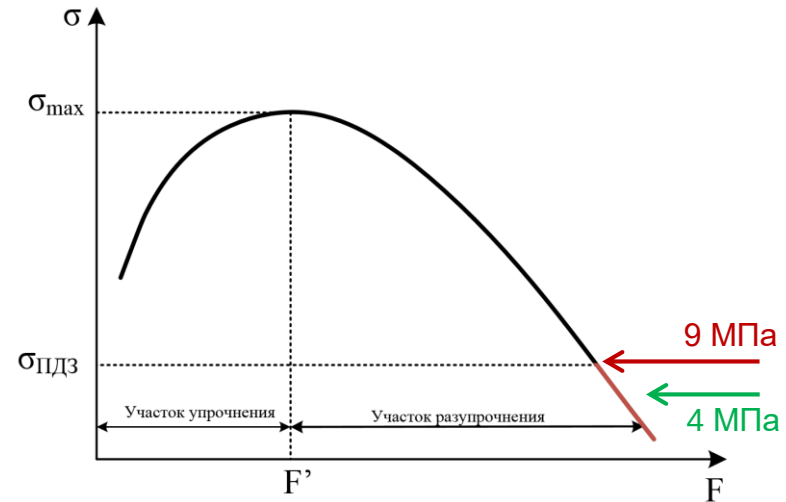
Обоснование консервативности минимального предельно-допустимого значения прочности реакторного графита

Цели работы:

1. Экспериментальное обоснование минимального предельно-допустимого значения прочности реакторного графита – 4 МПа
2. Необходимость экспериментального подтверждения ранее обоснованного критерия – 4 МПа

Предпосылки:

1. Снижение прочности реакторного графита под действием температуры и нейтронного облучения
2. Возможное достижение текущего предела – 9 МПа



Обоснование консервативности минимального предельно-допустимого значения прочности реакторного графита

Основные вехи работы:

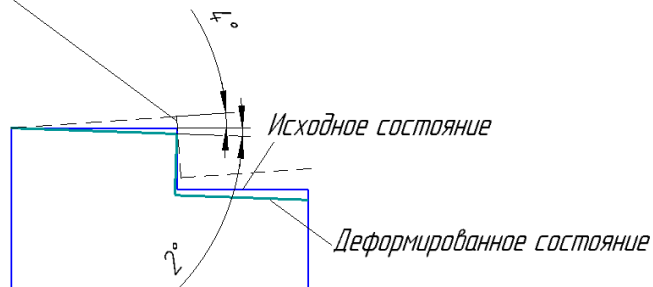
1. Анализ геометрии взаимодействия ГБ
2. Разработка и изготовление оснастки для воспроизведения условий нагружения с учетом прогиба колонн
3. Изготовление кернов графита для определения фактических механических свойств и фрагментов (четвертинок) ГБ
4. Проведение испытаний
5. Анализ результатов, выводы

Анализ геометрии взаимодействия ГБ с учетом прогиба колонн

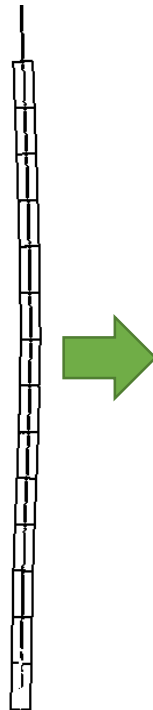
Процессы, вызывающие формоизменение ГБ:

1. Влияние градиентов температуры и флюенса повреждающих нейтронов (формоизменение контактных поверхностей)
2. Растрескивание ГБ, взаимодействие соседних графитовых колонн друг с другом (искривление оси колонны)

Форма поверхности оснастки при испытаниях необлученного блока



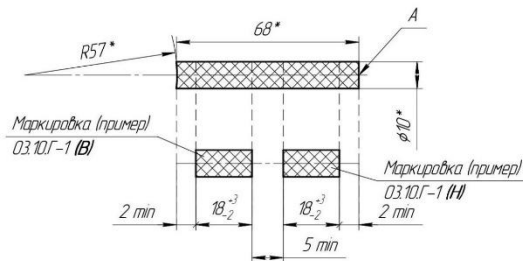
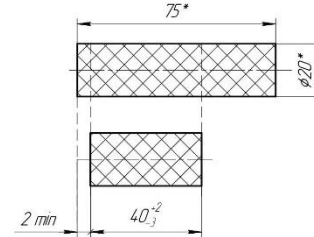
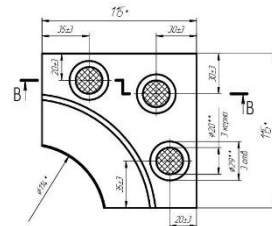
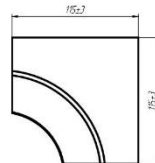
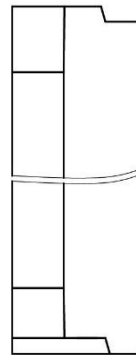
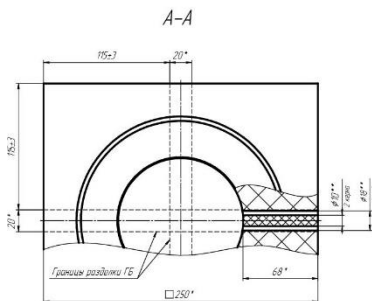
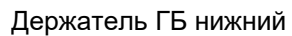
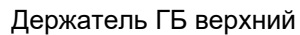
Деформированная поверхность ГБ вследствие влияния температуры и нейтронного облучения



Значения
угла α :
 5°
 2°
 0°

Искривленная графитовая колонна

НИКИЭТ
РОСАТОМ



Схемы разделки ГБ на Фрагменты и Керны

Объекты испытаний

Всего изготовлено:

1. 3 пары держателей ГБ для имитации 3 видов контакта

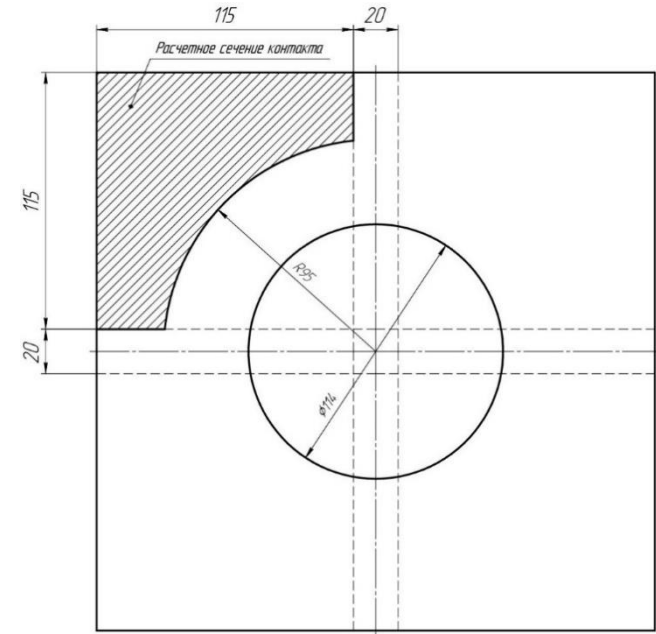
Угол 5° – между ГБ №№ 8 и 9, прогиб колонны – 125 мм
(консервативный вариант)

Угол 2° - между ГБ №№ 1 и 2, прогиб колонны – 125 мм
(реалистичный вариант, максимальный вес колонны)

Угол 0° - прямолинейная необлученная колонна
(референтный вариант)

2. 30 фрагментов (четвертинок) ГБ высотой 600 и 200 мм

3. 100 образцов из кернов графита различных конфигураций



Результаты испытаний

При испытаниях фиксировались:

1. Предел прочности графита на сжатие, определенный на кервах

В качестве опорных выбраны керны с параметрами:

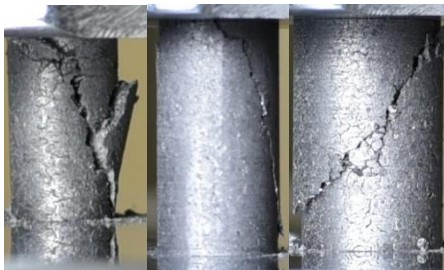
Направление – горизонтальное

Диаметр – 10 мм

Слой ГБ – внешний

Аналогичные керны графита отбираются из ГБ реакторов РБМК

2. Нагрузка, при которой происходила потеря несущей способности фрагмента (четвертинки ГБ)

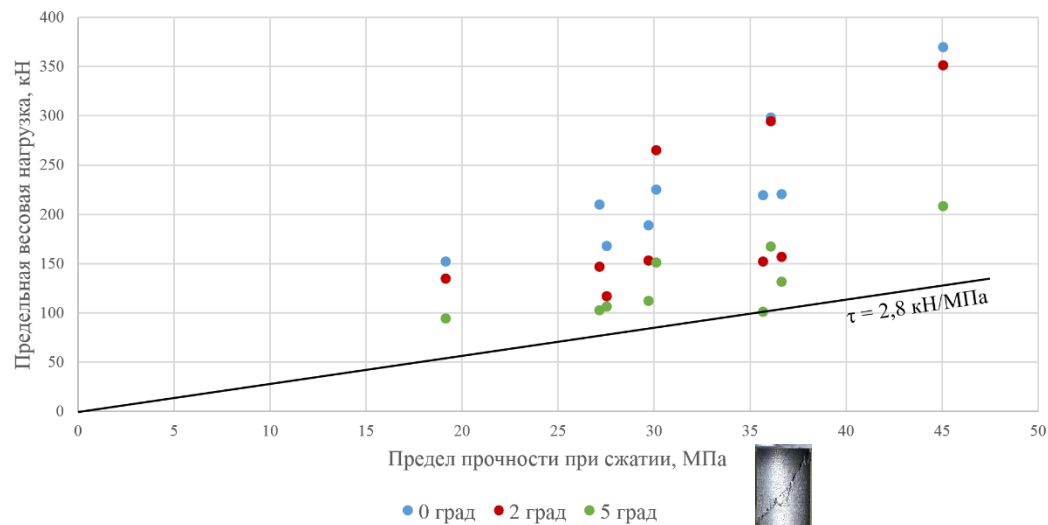


Контакт 0°

Контакт 2°

Контакт 5°

Результаты испытаний



Анализ результатов испытаний

Весовые нагрузки
с учетом сейсмики

Допустимый
предел прочности
графита

ГБ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Р, кН	11,1	10,8	10,1	9,4	8,7	8,0	7,3	6,6	5,9	5,2	4,5	3,8	3,1	2,4
σ, МПа	3,95	3,87	3,62	3,36	3,11	2,86	2,61	2,36	2,11	1,85	1,60	1,35	1,10	0,85

3,95
МПа

Анализ консервативности полученных результатов

Консервативные параметры экспериментальной и расчетной модели:

1. Учен разброс, анизотропия и зависимость свойств графита от условий эксплуатации
2. Учтено реальное состояние конструкций и условий их взаимодействия друг с другом при прогибе колонны величиной 125 мм
3. Примененные средства, технологии и методы контроля свойств графита кернов соответствуют «штатной» технологии
4. Увеличенный в 4 раза коэффициент запаса на сейсмические нагрузки



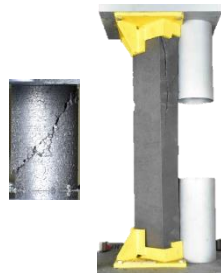
Силовое взаимодействие МК схемы «КЖ» и ГК



1. Экспериментально подтверждена ранее рассчитанная величина совместного перемещения ГК и МК схемы «КЖ» – 50 мм.
2. При силовом взаимодействии МК схемы «КЖ» и графитовой кладки не происходит нарушения целостности МК схемы «КЖ»

Прочность реакторного графита

Экспериментально подтверждена ранее рассчитанная величина минимальной предельной прочности графита 4МПа



Спасибо за внимание

Подосинников Александр Александрович

Начальник группы управления ресурсом элементов
активной зоны РБМК

