

ЦИФРОВЫЕ МОДЕЛИ УСТРОЙСТВ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ГРАФИТОВЫХ БЛОКОВ ДЛЯ ВЫВОДА ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ УРАН-ГРАФИТОВЫХ РЕАКТОРОВ

Риф А.Э.¹, Павлюк А.О.²

¹ НИ ТПУ, ИШЭ, гр. АЗ-05, e-mail: aer12@tpu.ru

² НИ ТПУ, ИЯТШ, И.о. директора НИЦ ВЭ, e-mail: pavlyuk17@tpu.ru

Введение

В настоящее время в Российской Федерации уже остановлены все промышленные уран-графитовые реакторы и некоторые блоки с энергетическими реакторами типа АМБ, АМ, ЭГП-6 и РБМК. В эксплуатации до сих пор находятся восемь энергоблоков РБМК и три ЭГП-6. Для всех энергетических и части промышленных уран-графитовых реакторов (далее – УГР) предполагается использовать вариант вывода из эксплуатации – «Демонтаж». Такой подход предполагает полное демонтирование конструкций реактора, в том числе и графитовой кладки [1].

В России и мире на данный момент разрабатываются различные устройства, позволяющие извлекать графитовые блоки из кладки реакторов. Однако в силу сложности процесса накоплен лишь небольшой практический опыт ликвидации УГР. Поэтому остается актуальным вопрос разработки эффективного устройства захвата и извлечения графитовых блоков.

В эпоху цифровизации необходимо использовать возможности цифрового моделирования для разработки таких устройств, в целях исключения образования продольных трещин и последующего разрушения графитовых блоков при извлечении их из УГР. Для этого необходима оценка механических воздействий на графитовые блоки, программный анализ напряжений, которые потенциально могут возникнуть при таких воздействиях, а также учет влияния времени эксплуатации на характеристики облученного графита в остановленных УГР.

Целью работы является разработка цифровых моделей существующих устройств захвата и извлечения графитовых блоков, а также анализ возникающих напряжений в графите блоков и элементах конструкции захватов.

Разработка и анализ цифровых моделей

Первым прототипом для разработки цифровой модели стал цанговый захват. Простейшее устройство, состоящее из цанги. Его особенностью является механическое воздействие на внутреннее отверстие графитового блока по небольшим площадям, что значительно повышает риск разрушения блока.

На рис. 1 приведена конструкция цангового захвата (а), разработанная 3D-модель на его основе внутри графитового блока (б) и результаты анализа напряжений (в).

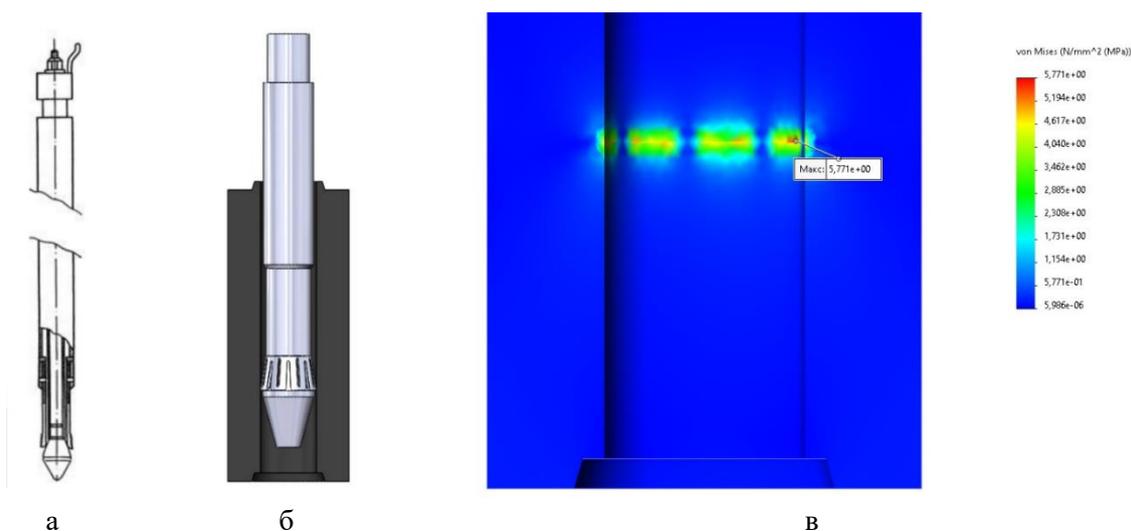


Рис. 1. Цанговый захват:
а – конструкция цангового захвата;
б – 3D-модель захвата внутри блока
в – результаты анализа напряжений

Стоит отметить, что для формирования реальной картины процессов, происходящих внутри графитового блока, программные характеристики графита были заданы вручную и значительно отличались от стандартных свойств материала [2].

Максимальное напряжение под воздействием цанги изнутри на графитовый блок по площади соприкосновения составляет 5,8 МПа. Области максимальных напряжений присутствуют в каждом месте соприкосновения цанги с блоком. Предел прочности графита реакторов типа РБМК в направлении экструзии для них равен 7,6 МПа, по горизонтали – 6 МПа. В случае такого захвата напряжения распространяются в основном по горизонтали, при этом запас прочности оказывается незначительным. Таким образом, рассматриваемый вариант захвата не гарантирует целостность графитовых блоков при взаимодействии с устройством, что и было подтверждено в ходе проведения извлечения графита при ремонте кладки АМБ [3].

Следующим прототипом для разработки цифровой модели стал резиновый захват. Устройство состоит из захвата, содержащего расширяющуюся резиновую прокладку. Принцип действия устройства обеспечивает равномерное соприкосновение с внутренней поверхностью графитового блока.

На рис. 2 приведена конструкция резинового захвата (а), разработанная 3D-модель на его основе внутри графитового блока (б) и результаты анализа напряжений (в).

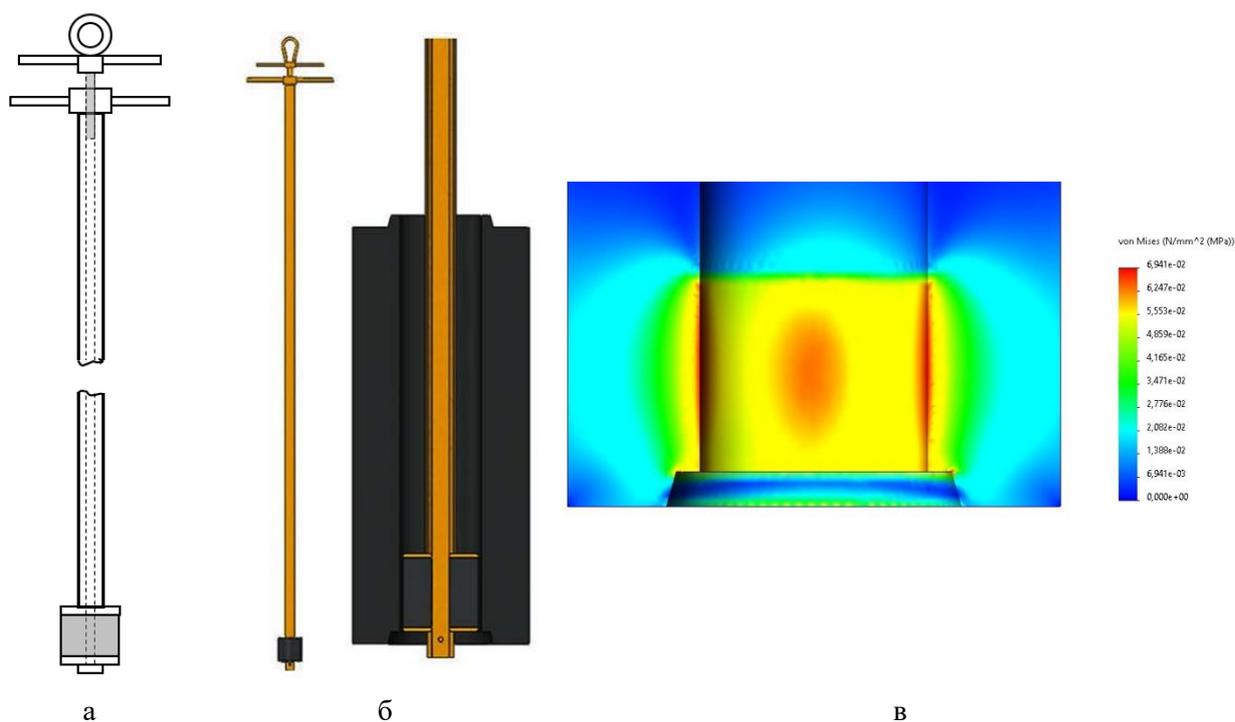


Рис. 2. Резиновый захват:

а – конструкция резинового захвата;

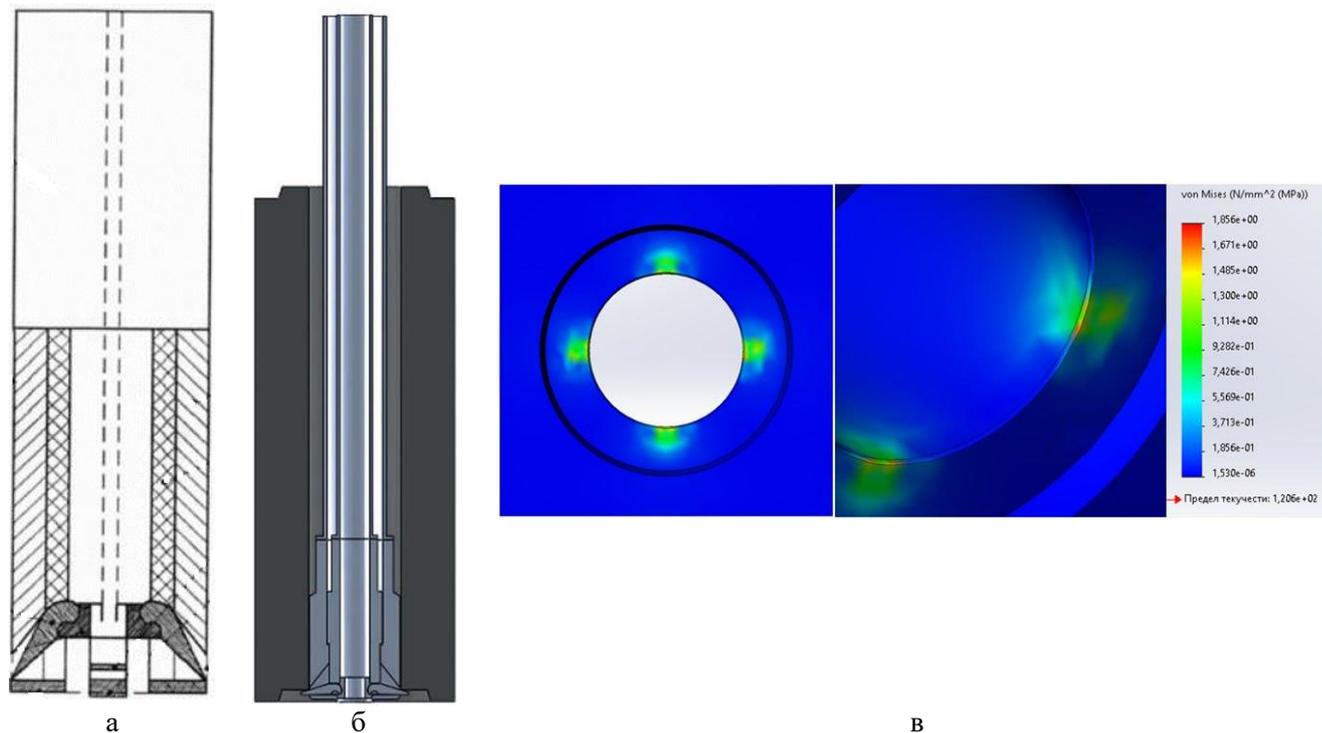
б – 3D-модель захвата внутри блока

в – результаты анализа напряжений

Максимальное напряжение под воздействием силы 1 кН резинового распорного наконечника на графитовый блок по площади соприкосновения составляет 0,07 МПа. Область максимальных напряжений крупная, сконцентрирована по всей площади распределения силы. Такой способ подходит для извлечения графитовых блоков РБМК по условию запаса прочности. Таким образом, рассматриваемый вариант захвата действительно гарантирует целостность графитовых блоков при взаимодействии с устройством. Однако необходимо дополнительное исследование влияния излучения на материал распорного наконечника для определения его срока эксплуатации.

Последним прототипом для разработки цифровой модели стал кулачковый захват [4]. Конструкция отличается от всех известных приспособлений тем, что подрыв и захват блока осуществляется посредством выдвигаемых кулачков за поверхность нижнего стыка блока без воздействия на внутреннюю поверхность отверстия. Такой вариант торцевого захвата позволяет исключить образование продольных трещин и разрушение графитового блока.

На рис. 2 приведена конструкция кулачкового захвата (а), разработанная 3D-модель на его основе внутри графитового блока (б) и результаты анализа напряжений (в).



*Рис. 3. Кулачковый захват:
а – конструкция кулачкового захвата,
б – 3D-модель захвата внутри блока,
в – результаты анализа напряжений*

Область сосредоточения напряжений по результатам исследования минимальна, сконцентрирована только на площадках взаимодействия с кулачками устройства. Наибольшие напряжения составляют 1,9 МПа на кромке внутреннего отверстия графитового блока. Механическое воздействие оказывается только в направлении экструзии, что повышает запас прочности. Как уже было отмечено ранее, для графита РБМК такое напряжение не существенно и не вызывает растрескивания и разрушения блока. Таким образом, такой вариант захвата тоже гарантирует целостность графитовых блоков при взаимодействии с устройством.

В таблице 1 сведены результаты проведенного анализа напряжений для разработанных 3D-моделей, а также результаты оценки напряжений зарубежных аналогов устройств [1] для захвата и извлечения графитовых блоков.

Таблица 1

Результаты анализа напряжений

№ п/п	Тип захвата	Максимальное напряжение, МПа	Примечание
1	Цанговый	5,8	Низкий запас прочности, не гарантирует целостность блоков РБМК
2	Резиновый	0,07	Высокий запас прочности, гарантирует целостность блоков, однако необходимо учитывать возможный износ резиновой прокладки
3	Кулачковый	1,9	Высокий запас прочности, исключает возникновение напряжений в горизонтальном направлении
4	Ручной манипулятор для демонтажа реактора GLEEP	5,9	Низкий запас прочности, область максимальных напряжений сконцентрирована по всей длине окружности нижней части отверстия от сверла
5	Захват для демонтажа АЭС «Latina»	3,3	Использована крупная сетка для моделирования (возможны недостоверные результаты), значительная площадь концентрации напряжений

По сравнению с зарубежными аналогами рассматриваемые резиновый и кулачковый захваты имеют меньшую площадь контакта с графитовыми блоками, оказывают основное воздействие в направлении экструзии и имеют высокий запас прочности.

Заключение

Проведенное 3D-моделирование доказало применимость двух рассмотренных устройств захвата из трех. Результаты и выводы, полученные при моделировании, аналогичны итогам проведенных опытных работ с прототипами устройств.

В перспективе моделирование позволит усовершенствовать конструкцию устройств, оценить влияние изменения свойств графита из-за облучения, проанализировать случаи извлечения деформированных блоков, а также разработать предложения к техническим характеристикам процесса извлечения (например, скорость поднятия и др.) для снижения риска разрушений блоков при их извлечении.

Результаты работы будут использованы научно-исследовательским центром по выводу из эксплуатации ТПУ в учебном процессе и в рамках выполнения НИОКР для промышленных партнеров.

Список использованных источников

1. Павлюк А.О., Котляревский С.Г., Беспала Е.В., Риф А.Э., Кан Р.И. Зарубежный опыт и подходы к извлечению графита из уран-графитовых реакторов // Радиоактивные отходы. – 2023. – № 2 (23).
2. Виргильев Ю.С., Селезнев А.Н., Свиридов А.А., Калягин И.П. Реакторный графит: разработка, производство и свойства // Промышленные углеродные материалы. – 2006. – №1. – С. 4-12.
3. Павлюк А.О., Котляревский С. Г., Риф А. Э., Кан Р. И., Загуменнов В. С, Падерин Е. С., Шешин А.А., Зеленецкая Е. П. Обзор отечественного опыта и подходов по извлечению графита из уран-графитовых реакторов // Радиоактивные отходы. – 2023. – № 3 (24).
4. Патент РФ 2741765. Способ характеристики графитовых блоков ядерного реактора и устройство для его осуществления / Павлюк А.О., Кан Р.И., Котляревский С.Г., Михайлец А.М., Шевченко О.М., Шевченко А.О. Заявитель и патентообладатель Госкорпорация «Росатом» № 2020120170; заявл. 11.06.2020; опубл. 28.01.2021. Бюл. 4.