

ных каналах будут использованы на всех энергоблоках РБМК-1000. Они могут быть применены для других типов реакторов и в отраслях промышленности, где проходимость твердых элементов имеет большое значение.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Драгунов Ю.Г., Петров А.А., Иванов А.В. и др. Модернизация и продление сроков эксплуатации энергоблоков с РБМК. — Атомная энергия, 2012, т. 113, вып. 1, с. 6—13.
2. Мельников О.П., Петров М.Б., Слободчиков А.В. и др. Работоспособность рабочих органов СУЗ в условиях пространственного искривления каналов реактора РБМК-1000. — В сб.: Годовой отчет НИКИЭТ-2014. Под ред. Е.О. Адамова. М., НИКИЭТ, 2014, с. 186.
3. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. М.: Наука, 1967.
4. Драгунов Ю.Г., Петров А.А. Решение научно-технических проблем заключительного этапа эксплуатации реакторов РБМК. Тезисы докл. 9-й Межд. научно-техн. конф. «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики». Москва, 21—23 мая 2014 г. М., Концерн «Росэнергоатом», 2014, с. 21—22.

УДК 621.039.4

### РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РЕСУРСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РБМК

*Федосовский М.Е., Дунаев В.И., Гурин Д.А. (АО «Диаконт», г. Санкт-Петербург),  
Слободчиков А.В. (АО «НИКИЭТ», г. Москва), Харахнин С.Н. (Филиал АО «Концерн Росэнергоатом»  
«Ленинградская атомная станция», г. Сосновый Бор)*

В 2012—2013 гг. группой компаний «Диаконт» был создан комплекс оснастки для технологических операций воздействия на графитовую кладку при восстановлении ресурсных характеристик элементов РБМК-1000 двух первых энергоблоков Ленинградской АЭС по параметру пространственного искривления технологических каналов и каналов СУЗ. Ресурсные характеристики восстанавливали путем уменьшения пространственного искривления ячеек реакторной установки до не более 50 мм и скорости нарастания деформации ячеек до не более 15 мм/год посредством создания свободного объема в графитовой кладке с помощью продольной резки графитовых колонн на две или четыре части и дальнейшего силового воздействия на кладку.

В начале работ определяли исходное состояние пространственного искривления в контрольных ячейках с использованием данных, полученных при эксплуатационном контроле кривизны технологических каналов и каналов СУЗ, затем разделяли ячейки на три основные группы: контрольные — для проверки изменения состояния реакторной установки, ремонтные — для создания свободного объема и восстанавливаемые — для силового воздействия на технологические каналы при компенсации созданного свободного объема. Из выбранных ячеек выгружали топливо, из ремонтных дополнительно извлекали технологические каналы. Параллельно проводилась технологическая подготовка

центрального зала и подреакторного помещения: размещение оборудования, подключение систем к рабочим средам, монтаж технологической цепочки производственного цикла.

Основное оборудование подразделяется на четыре группы:

- системы измерений параметров реакторной установки;
- оборудование механической обработки графитовых блоков ячеек;
- оборудование силового воздействия на графитовую кладку;
- вспомогательное оборудование.

#### СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ

**Модернизированная система для измерения пространственного искривления технологических каналов и каналов СУЗ.** Главным фактором, ограничивающим ресурс РБМК-1000 в целом, является искривление графитовых колонн в результате растрескивания блоков под действием облучения и температуры, которое, в свою очередь, приводит к искривлению технологических каналов и каналов СУЗ. Искривление каналов может повлиять не только на безопасность реактора, но и на экстренный останов энергоблока. Разработанная и внедренная для оценки формоизменения кладки и каналов РБМК-1000 система СИПИ-М предназначена для измерения внутреннего диаметра канала,

определения стрелы прогиба действительной оси канала, азимутального угла стрелы прогиба канала относительно центральной оси реакторной установки и радиуса кривизны канала.

Принцип работы СИПИ-М заключается в оценке параметров контролируемого канала при перемещении в нем измерительного зонда. Зонд перемещается вниз и вверх за счет размотки и намотки соединительного кабеля на барабан загрузочного устройства, грузоподъемные механизмы не требуются. В режиме сканирования зонд перемещается по каналу до его нижней точки. При достижении нижней точки он останавливается, затем перемещается вверх до срабатывания датчика верхнего положения, установленного на загрузочном устройстве. Регистрируются параметры канала при перемещении зонда вверх в автоматическом режиме с возможностью его остановки оператором. После окончания измерений система формирует протокол в соответствии с требуемой формой.

**Модернизированный комплекс телевизионного контроля графитовых колонн КТК-ГК-М.** Комплекс применяется со времени извлечения технологического канала и до его установки обратно в ячейку. Он используется в следующих операциях:

осмотр состояния внутренней поверхности блоков графитовой колонны после извлечения технологического канала прямой и боковой насадкой;

контроль перед установкой технологического канала, осмотр ячейки на наличие фрагментов графита, определение азимутальных углов резов;

измерение диаметра отверстия колонны после калибровки.

Основное назначение комплекса — телевизионный визуальный и измерительный контроль внутренней поверхности блоков графитовых колонн и верхнего тракта, включая следующие операции: выявление оптически открытых дефектов, например, раковин, трещин, сколов и др., измерение размера контролируемых объектов, отверстий графитовых колонн и верхних трактов, глубины расположения объектов относительно отметки 0 (за отметку 0 принимается уровень пола центрального зала), азимутального угла контролируемых объектов относительно оси, проходящей через центр измеряемой ячейки и совпадающей с направлением центральной оси реакторной установки.

Геометрические размеры объектов, высота которых попадает в кадр, измеряют путем сопоставления опорных размеров, создаваемых блоком лазеров, и фактического размера объекта, отображающегося на экране монитора. Объекты, высота которых выходит за пределы кадра, измеряют путем сложения размеров объектов контроля в пределах кадров и расстояний между кадрами.

Геометрические параметры сечений отверстий определяют с помощью шупов с датчиками, расположенных в блоке центраторов измерительного зонда, которые измеряют размеры сечения отверстий в восьми направлениях с привязкой по углу к центральной оси реакторной установки. По полученным данным строят сечение с наложением на него окружности номинального диаметра и указанием отклонения в каждой контролируемой точке.

#### **ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ГРАФИТОВЫХ БЛОКОВ ЯЧЕЕК**

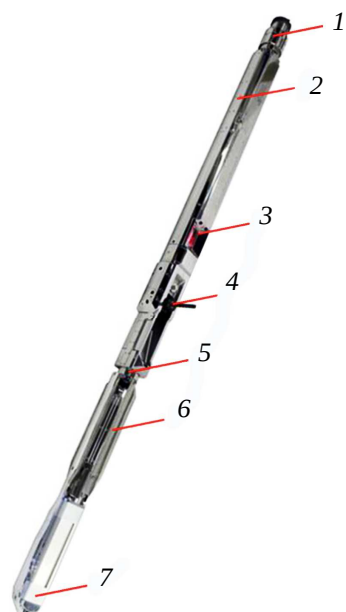
**Устройство для горизонтальной резки.** Его рабочий модуль предназначен для горизонтального и продольного вертикального реза (опозитного и азимутального) с внутренней стороны блока в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Испытаниями было выбрано устройство для горизонтальной резки с рабочим инструментом в виде конической концевой фрезы (рис. 1). Ее преимущества:

направление движения, плавность подачи и скорость вращения фрезы позволяют получить более ровные внутренние поверхности реза;

габаритные размеры фрезы позволяют гарантированно прорезать графитовый блок на всю глубину и по всей высоте. При этом у блоков, находящихся выше и ниже, удаляется меньше графита;

в модуле реализован привод поворота инструмента, что обеспечивает не только вертикальный рез, но и рез каждого блока с индивидуальным азимутом;

модуль обеспечивает жесткое позиционирование направления реза. За счет манипулятора со штангой, механизма фиксации и центрирования узла резки оснастка превращается в аналог фрезерного станка с жесткой привязкой к координатам. Если при выполнении реза попасть в трещину, которая находится под углом к вертикали, то фреза не будет изламываться и стремиться идти по трещине, т.е. уходить от заданного азимута реза;

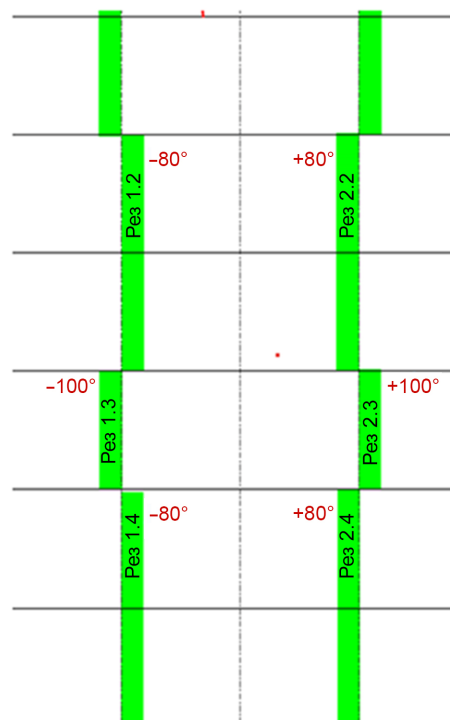


Р и с. 1. Рабочий модуль устройства для горизонтальной резки: 1 — стыковочный узел; 2 — привод инструмента; 3 — телекамера с блоком осветителей и лазерным целеуказателем; 4 — режущий инструмент; 5 — привод поворота; 6 — узел фиксации и центрирования с прижимными лапами; 7 — пневмоцилиндр узла фиксации и центрирования

модуль оснащен радиационно стойкой видеоконной телевизионной камерой типа D40M, расположенной над инструментом и обеспечивающей контроль реза. Модуль также оснащен лазерным маркером, который обеспечивает возможность реза по профилю трещины, возможность точного захода инструмента в ранее выполненный рез, точное позиционирование фрезы при реализации методики исключения образования клиньев (выбор индивидуального азимута реза для каждого блока).

На 1-м энергоблоке Ленинградской АЭС выполнялся рез шириной 12 мм. На следующий год на 2-м энергоблоке было принято решение увеличить ширину реза до 18 мм. Появилась возможность регулировать глубину и ширину реза путем быстрой замены рабочего инструмента.

Азимуты реза выбираются индивидуально для каждого графитового блока на основании визуального измерительного контроля, выполненного с помощью комплекса КТК-ГК. Выпавшие фрагменты графитовой кладки (клинья) препятствуют схлопыванию блоков и часто перекрывают проходное сечение ячейки. Это приводит к необходимости специализированных технологических операций по их удалению, что, в свою очередь, приводит к дополнительным временным затратам и дозовым нагрузкам на персонал. Исключение образования клиньев



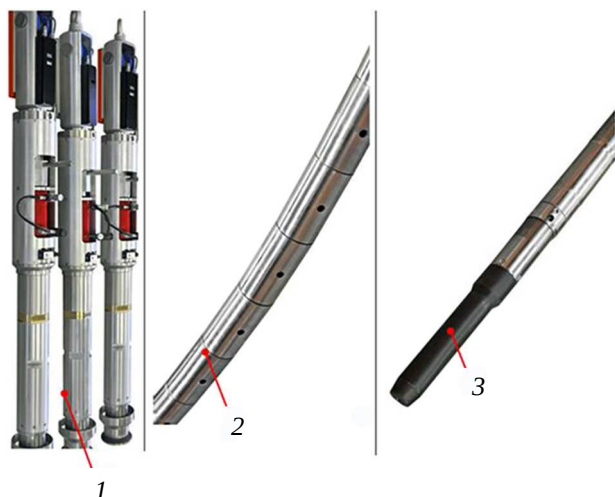
Р и с. 2. Картограмма реза графитовой колонны с учетом изменения азимута реза

включает в себя выполнение реза сверху вниз, а также возможность изменения азимута резки в процессе резки (рис. 2). Изменение азимута резки также позволяет обеспечить проектные зазоры (менее 10 мм) между разновысотными блоками графитовой кладки в зоне каналов СУЗ.

#### ОБОРУДОВАНИЕ СИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ГРАФИТОВУЮ КЛАДКУ

**Устройство формирования компенсирующих нагрузок на графитовую кладку.** Силовое воздействие на колонны кладки для уменьшения стрелы прогиба колонны осуществляется с помощью устройств формирования компенсирующих нагрузок различных конструкций. Исходя из фактической стрелы прогиба, распределения по плату реактора, фактической подвижности графитовой колонны в конкретном ряду ячеек, использовали различные комбинации методов создания свободных объемов, конструкций устройств-натяжителей и их числа.

Устройство представляет собой стержневую многозвенную конструкцию из коррозионно-стойкой жаропрочной стали, состоящую из трех основных узлов — рабочего элемента 1, удлинителя 3, механизма нагружения 2 (рис. 3). Рабочий элемент представляет собой стержневую многозвенную конструкцию, состоящую из стального троса с установленными на нем звень-



Р и с. 3. Внешний вид элементов устройства формирования компенсирующих нагрузок на графитовую кладку: 1 — механизм нагружения; 2 — рабочий элемент; 3 — направляющее звено

ями. Звено представляет собой стальной цилиндр диаметром 78, длиной 150 мм. Трос одним концом крепится к механизму нагружения, вторым — к нижнему звену рабочего элемента, являющемуся опорным. При натяжении троса, создаваемом гидравлическим домкратом, рабочий элемент сжимается. Верхнее опорное звено упирается в торец удлинителя, остальные звенья — одно в другое, стремясь образовать прямую линию, и тем самым создают горизонтальное усилие на технологический канал в области кладки.

Эксперименты проводили с натяжением графитовых колонн, с разными формами конструкции звеньев, размерами звеньев, типами соединений между собой для создания максимальных усилий. В числе приоритетных рассматривали две задачи: создать максимально возможное усилие на кладку, но в то же время гарантировать отсутствие механических повреждений технологических каналов после применения натяжения. Изначально использовали конструкцию устройства формирования компенсирующих нагрузок на колонну с прямым тросом, который проходил через оси звеньев. Соответственно в этом случае его ориентация не имеет значения, т.е. не было четкого направления воздействия. По результатам экспериментов было выявлено, что усилие, создаваемое натяжителем с прямым тросом, недостаточно большое. Для его увеличения было принято решение использовать натяжители со смещенным тросом с гарантированным направлением создаваемого усилия против направления стрелы прогиба.

Изначально предполагали, что при установке натяжителей в ряд один за другим будет создано большое усилие на кладку во всем ряду. Однако практика показала, что графитовые колонны затрагивают соседние и не удастся создать усилие на весь ряд, поэтому применение натяжителей имело малый эффект по уменьшению стрелы прогиба. Было принято решение о переходе на групповое горизонтальное воздействие на кладку, начиная с колонн ближе к центру реактора.

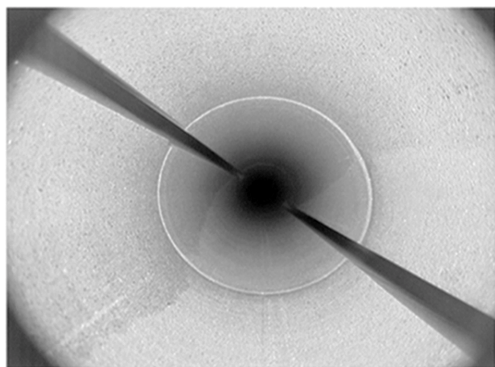
На 1-м энергоблоке в устройствах использовали масляные тросы. Масло снижало трение между витками, что было необходимо для предотвращения разрыва троса. Однако пришлось удалять воду из технологического канала, так как при наличии воды была вероятность попадания масла в первый контур реактора. На 2-м энергоблоке уже применяли специализированные безмасляные тросы. Это позволило работать в ячейках с водой без отсечения узла сильфона и без дополнительной промывки канала.

#### ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

**Рабочий модуль устройства для калибровки отверстий.** Он предназначен для сквозной вертикальной калибровки отверстия фрагментированной графитовой колонны до проектных значений путем расточки фрезой (рис. 4). Узел калибровки оснащен пневмодвигателем,



Р и с. 4. Рабочий модуль устройства для калибровки отверстий: 1 — стыковочный узел; 2 — привод инструмента; 3 — режущий инструмент; 4 — узел центрования



Р и с. 5. Внешний вид поверхности графитового блока в ячейке после калибровки системы

механизмом вращения инструмента и двумя поясами специализированных дисковых фрез. Каждая фреза имеет сменные режущие пластины. Два пояса фрез обеспечивают обработку графитовой колонны за один проход (рис. 5).

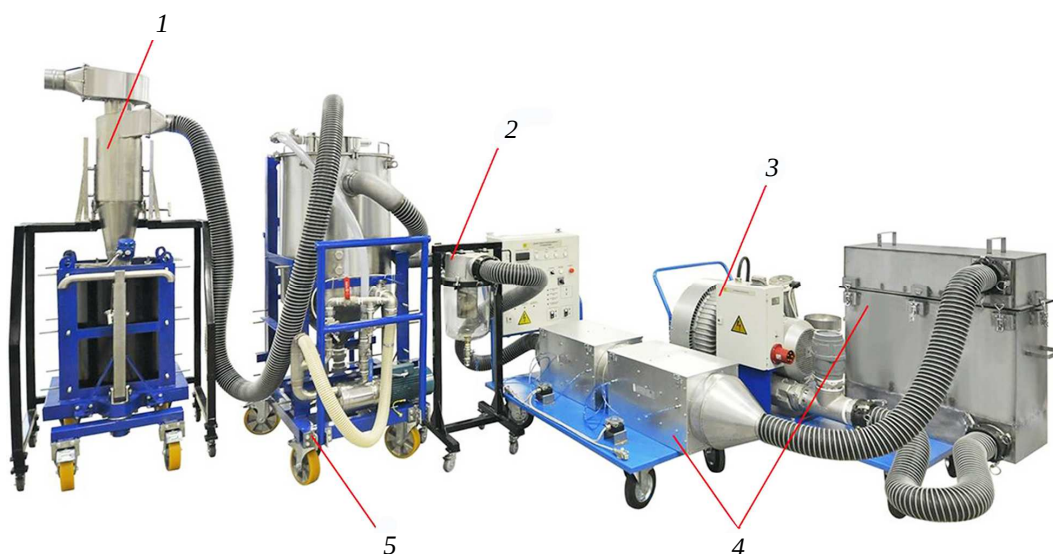
В 2012—2013 гг. схема калибровки была следующая: модуль устройства для калибровки отверстий опускался вниз, центрировался внутри тракта графитовой колонны, включалось вращение режущего инструмента и выполнялась калибровка снизу вверх с помощью грузоподъемного механизма в составе манипулятора доставки.

При появлении широкого реза на четыре части было принято решение перейти на схему калибровки сверху вниз. Для осмотра результата калибровки добавлена камера в конструкцию модуля. Для центровки в тракте колонны в модуле реализован специализированный узел центрирования с двумя группами роликов, закрепленных на системах тяг. Конструкция обес-

печивает точное центрирование и свободное прохождение ступенек, образуемых в стыках между блоками при их раскрытии. В модуле реализованы непрерывный контроль усилия калибровки и поддержание максимально возможной безопасной скорости с учетом расхода воздуха.

**Система сбора и подготовки к утилизации продуктов резки графитовых блоков из реакторного пространства** (из объема одной ячейки) (СУПР). За счет создания постоянного потока воздуха в ячейке исключается загрязнение центрального зала и снижается радиационная нагрузка на персонал АЭС. Мощность расхода воздуха до 1000 м<sup>3</sup>/ч. В основных компонентах системы имеются датчики разрежения, фильтрующие элементы дооснащены датчиками перепада. При достижении предельных уровней сигналов от датчиков формируется обобщенный сигнал неисправности, подаваемый в систему управления. По этому сигналу блокируется работа устройств резки.

Оборудование СУПР предназначено для резки блоков, расчистки колонн, их фрагментации и удаления (при необходимости), калибровки отверстий колонн (рис. 6). Это оборудование не требует доработки элементов реакторной установки. Оно состоит из комплекта основного оборудования и системы управления. В его состав входят передвижные модули контейнера-накопителя, скруббера и вентилятора. Передвижными модулями управляет система, состоящая из шкафа электропитания и управления, пульта управления. Шкаф электропитания и



Р и с. 6. Внешний вид СУПР: 1 — циклон с контейнером; 2 — модуль сепаратора (поставляется отдельно); 3 — модуль вентилятора; 4 — скруббер (поставляется отдельно); 5 — модули фильтров

управления размещается за пределами подреакторного помещения, что позволяет избежать высоких дозовых нагрузок на обслуживающий персонал.

В СУПР реализована многоступенчатая система очистки воздуха:

гравитационное разделение потока (отделение крупных фрагментов механического воздействия от пылевой фракции);

сепарационное разделение потока (отделение крупной пылевой фракции от мелкодисперсной);

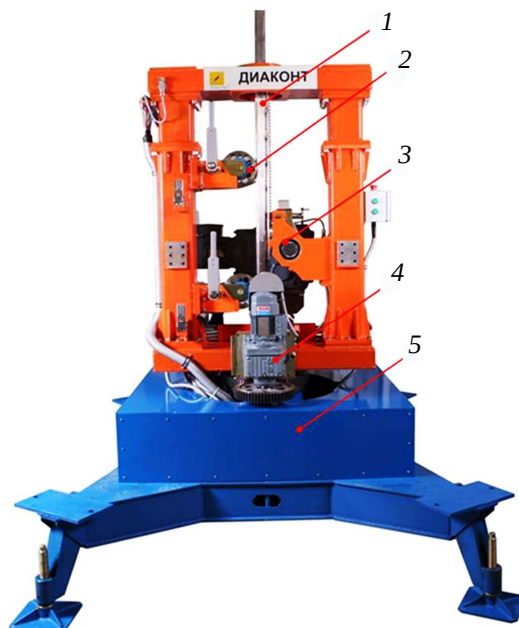
скруббер для удаления из воздушного потока мелкодисперсных продуктов резки. Очистка воздушного потока в нем происходит путем фильтрации поступающего потока через воду (мокрая очистка);

дисперсионная — фильтр грубой очистки F3, фильтр тонкой очистки F7, фильтр Петрянова F13.

Очищенный воздух, поступающий в спецвентиляцию, не содержит фракции графита размером более 0,1 мкм. Продукты резки графитовой кладки собираются в герметичные контейнеры.

**Манипулятор доставки и технологическая штанга.** Манипулятор доставки предназначен для вертикального и азимутального позиционирования рабочих модулей устройства для продольной резки блоков относительно разрезаемого и азимутального ориентирования рабочих модулей. Он обеспечивает подвод необходимого электропитания, управляющих сигналов и рабочих сред ко всем типам рабочих модулей. Его универсальная конструкция подходит для всех модулей резки блоков.

Изначально манипулятор доставки был выполнен на базе механического винтового домкрата с электроприводом. К нему прилагалась составная рабочая штанга. Однако обработка одной колонны вследствие небольшого хода винтового домкрата (1,2 м) и изменения положения зажима механизма захвата относительно секций рабочей штанги занимала большое количество времени. Для сокращения времени на обработку был разработан универсальный манипулятор доставки (рис. 7). В нем рабочая штанга перемещалась посредством мотора-редуктора, который передавал заданное усилие вращения на несущую шестерню, находящуюся в зацеплении с зубчатой рейкой модернизированной рабочей штанги. Модернизация обеспечила диапазон вертикального пози-



Р и с. 7. Внешний вид универсального манипулятора доставки со штангой: 1 — рабочая штанга; 2, 3 — ролик и привод вертикального перемещения соответственно; 4 — привод поворота; 5 — рама

ционирования до 10 м, не затрачивая время на перецепку штанги и манипулятора. Для уменьшения габаритных размеров из его состава была исключена опора, предназначенная для доступа персонала к устройству строповки рабочей штанги (захват). В связи с этим был разработан специальный скользящий захват, который после стыковки рабочей штанги с универсальным манипулятором доставки спускался на верхнюю площадку его рамы. В 2017 г. планируется внедрение манипулятора доставки, который будет занимать площадь не более чем 3×3 технологического канала.

Исходя из возможных сценариев восстановления ресурсных характеристик, была подготовлена оснастка для фрагментации, удаления и извлечения лишних фрагментов графитовых колонн, в том числе:

устройство для подъема фрагментированного графитового блока (рис. 8). Оно предназначено для захвата блока через зазор между блоками, подъема, вертикального перемещения и посадки фрагментированного блока и колонны, очистки торцевых зазоров. При наличии фрагменты графита удаляются за счет подачи узконаправленного потока сжатого воздуха. После очистки зазора верхние блоки опускаются, смыкание зазора контролируется по ТВ-камере;

устройство для фрагментации и удаления блока, перемещения и сброса фрагментов в отверстие в блоке (рис. 9);



Р и с. 8. Устройство для подъема фрагментированного графитового блока: 1 — стыковочный узел; 2 — привод инструмента; 3 — зацепы; 4 — телекамера



Р и с. 9. Устройство для фрагментации и удаления графитового блока

клещи для расчистки колонны (рис. 10). С их помощью захватывают и извлекают из центрального отверстия колонны графитовые



Р и с. 10. Клещи для расчистки графитовой колонны

кольца и втулки, а также фрагменты блоков, застрявших в центральном отверстии в результате извлечения канала или дробления блоков;

устройство постоянной механической фиксации Сб.07 в проектной позиции по высоте ячейки при удаленной колонне механическим способом без применения сварки.

Разработанный комплект оборудования позволил выполнить полный комплекс работ по воздействию на графитовую кладку реакторной установки РБМК-1000. Это привело к увеличению срока эксплуатации реакторов первого поколения за счет ремонтно-восстановительных работ, направленных на замедление деформации кладки в период интенсивного нарастания формоизменения вследствие вторичного распухания графита.

УДК 621.039.566

## НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ЯДЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ РБМК

*Алимов Ю.В., Баловнев А.В., Давыдов В.К., Жирнов А.П., Ионов А.И., Кузнецов П.Б.,  
Рождественский И.М., Рождественский М.И., Сахарова Т.Ю., Юферева В.А.  
(АО «НИКИЭТ», г. Москва)*

Энергоблоки РБМК Ленинградской, Курской и Смоленской АЭС находятся в эксплуатации от 27 до 43 лет. За это время проведена модернизация активных зон и систем безопасности реакторов, направленная на улучшение физических характеристик и повышение безопасности [1, 2]. На всех энергоблоках, за исключением 3-го энергоблока Смоленской АЭС, внедрена комплексная система контроля управления и

защиты (КСКУЗ), в составе которой две независимые системы останова реактора: система аварийной защиты (АЗ) и система быстрого снижения мощности (БСМ), выполняющая наряду с функцией останова функцию управления [3].

РБМК работают в базовом режиме, стационарное состояние реактора на номинальной мощности является основным. При эксплуатации параметры реактора, в том числе и