

ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТ ПО УПРАВЛЕНИЮ РЕСУРСНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ГРАФИТОВЫХ КЛАДОК ЭНЕРГОБЛОКОВ ЛЕНИНГРАДСКОЙ АЭС

Караваев И.М., Лаврёнов В.С., Соколовский А.А., Мочёнов Д.М.
(Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Ленинградская АЭС»,
Сосновый Бор, Россия)

Введение

За время эксплуатации реакторов РБМК-1000, в том числе в период продленного до 45 лет срока эксплуатации, под действием нейтронного облучения при работе реактора на мощности наблюдается формоизменение графитовых блоков, что приводит к искривлению графитовых колонн с установленными в них технологическими каналами (ТК) и рабочими каналами системы управления и защиты (РК СУЗ), а также вызывает уменьшение зазора между графитовыми колоннами отражателя и металлоконструкциями схемы «КЖ». Степень отклонения колонны от вертикальности (т.н. «стрела прогиба») и величина зазора между графитовой кладкой и металлоконструкцией «КЖ» (т.н. «зазор КЖ-ГК») являются ресурсными характеристиками, влияющими на работоспособность реактора.

Впервые необходимость устранения кривизны графитовой кладки возникла на энергоблоке № 1 Ленинградской АЭС в 2013 году (на 39 году эксплуатации). Для решения этой задачи была разработана и внедрена на энергоблоках № 1–4 Ленинградской АЭС технология выполнения работ по восстановлению ресурсных характеристик (ВРХ). Также была разработана и применяется с 2018 года технология выполнения работ по восстановлению зазора КЖ-ГК.

1. Этапы совершенствования технологии ВРХ

1.1. Общее описание технологии ВРХ

В начале ППР энергоблока проводятся измерения кривизны графитовой кладки реактора. В зависимости от применяемых измерительных систем может требоваться (семейство СИПИ) или не требоваться (семейство ИКС-49) выгрузка ядерного топлива из ячеек реактора. Схема резки уточняется на основании измерений, определяется она в отчете по обоснованию безопасности НИКИЭТ. Перечень ячеек, которые подлежат резке, определяется в отчете по обоснованию безопасности, уточняется Протоколом выполнения работ, согласованным с НИКИЭТ.

Также результаты измерений используются для расчета скорости прироста кривизны графитовой кладки (мм/эф. сут). Она определяется как отношение изменения кривизны ГК (измеренной в текущий ППР энергоблока и по итогам прошлого ППР) к времени работы энергоблока на мощности (эф. сут).

Подготовительные работы на ячейках ТК, попавших в схему резки, включают: выгрузку ядерного топлива, демонтаж технологических каналов (демонтаж обойм РБМ-К5.Сб.25-33, установка заглушек в ПВК, установка проходных заглушек в корпуса ШАДР-32М, продувка объема «канал – калач – НВК», срезка калачей РБМ-К7.79-181, срезка сильфонных компенсаторов РБМ-К.26, извлечение ТК с графитовым комплектом), телевизионный осмотр графитовой колонны, подготовка колонны к резке (удаление остатков графитового комплекта при наличии, устранение зазоров между графитовыми блоками при наличии).

Подготовительные работы на ячейках РК СУЗ, попавших в схему резки, включают: опорожнение контура охлаждения СУЗ, отключение сервоприводов СУЗ, выгрузку стержней СУЗ, демонтаж рабочих каналов, телевизионный осмотр графитовой

колонны, подготовка колонны к резке. В соответствии с обоснованием безопасности [1], [2] допускается резка не более 5 ячеек РК СУЗ в рамках ВРХ.

Резка графитовых колонн выполняется в соответствии со схемой резки с учетом полученных при визуальном измерительном контроле данных о наличии и характере трещин в графитовых блоках. После выполнения азимутальных резов и смыкания половин (четвертей) графитовых блоков выполняется калибровка (расточка) графитовой колонны для монтажа канала.

После завершения резки графитовых колонн проводятся повторные измерения кривизны графитовой кладки. При необходимости может быть принято решение о выполнении второго этапа ВРХ – резки дополнительных ячеек и повторных измерений кривизны ГК. На основании сравнения итоговых и предельно допустимых значений кривизны, с учетом ранее рассчитанной скорости прироста кривизны определяется разрешенное время работы энергоблока на мощности.

Заключительные работы включают в себя монтаж ТК и РК СУЗ, восстановление герметичности реакторного пространства и подтверждение герметичности гелиевыми испытаниями, монтаж обойм, загрузку стержней СУЗ и ядерного топлива. Период выполнения работ по УРХ ГК РУ считается с момента срезки первой до заварки последней обоймы. Мерой эффективности выполнения работ является отношение числа разрезанных ячеек к периоду выполнения работ – фактические темпы работ (яч./сут.).

Работы по УРХ ГК РУ, в т.ч. подготовительные и заключительные этапы, лежат на «критическом пути» ППР энергоблока, поэтому особое внимание уделяется сокращению затрат времени, оптимизации порядка выполнения совмещенных работ на реакторной установке.

1.2. Первичная реализация (2013–2014)

Первоначальная технология предусматривала резку графитовой колонны фрезой диаметром 12 мм в один проход на две или четыре (в зависимости от схемы резки) части с последующим силовым воздействием (натяжением) на колонну.

При разработке схемы резки применялся «шахматный» подход – не резались соседние ячейки (прилегающие торцом), только лежащие наискосок (прилегающие углом).

Для доставки модуля резки графита и его перемещения использовались установки (рис. 1) размером в плане 2250х2250 мм (9х9 ячеек), что ограничивало возможность одновременного выполнения работ на близко расположенных друг к другу ячейках. Всего параллельно использовалось до 3 установок.



Рис. 1. Установка для резки графита производства АО «Диаконт», использовавшаяся на Ленинградской АЭС с 2013 по 2014 г.

Все работы по перемещению оборудования и длинномерной оснастки выполнялись с использованием мостового крана центрального зала, за счет чего (с учетом необходимости выполнения иных работ в ЦЗ в период ППР) время работы крана стало одним из критических ресурсов, влияющих на эффективность выполнения работ.

С учетом описанных особенностей эффективность (фактические темпы выполнения работ) составляла 1,85 ячеек в сутки.

1.3. Внедрение КМУ, модернизация оснастки (2014–2016)

С целью оптимизации продолжительности ВРХ, с учетом полученного опыта и выявленных «узких мест» в центральных залах энергоблоков Ленинградской АЭС смонтированы станины для установки на период ВРХ крана-манипулятора (КМУ) для обеспечения работ по перемещению длинномерных элементов оснастки ВРХ в зоне плато РУ. Параллельное использование мостового крана ЦЗ и КМУ позволило сократить непроизводительные перерывы в работе на ожидание крана.

В рамках работ с НИИ Графит были определены оптимальные диаметр и конструкция фрезы для резки графита, что положительно сказалось на скорости резки графитовых колонн и частоте замены фрез, сократило непроизводительные перерывы в работе на замену оснастки.

Внедрена более эффективная оснастка для подготовки графитовой колонны к резке: удаления (при наличии) остатков графитового комплекта и устранения (при наличии) зазоров между графитовыми блоками, что снизило затраты времени на выполнение подготовительных работ и позволило устранить простои оборудования из-за ожидания годных к резке ячеек.

С учетом описанных особенностей эффективность (фактические темпы выполнения работ) составляла 2,8–3,0 ячеек в сутки.

1.4. Внедрение рядной резки, повторного реза (2016–2020)

В рамках дальнейшего развития технологии ВРХ совместно с НИКИЭТ выполнена оптимизация технологии, внедрены рядная и повторная резка. При разработке схемы резки выбирается 2 длинных ряда ячеек по оси X (азимут 0,180; за 0 принято направление «на машзал») и 2 длинных ряда по оси Y (азимут –90,+90), которые

формируют т.н. «большой крест». Локальные участки резки также выбираются рядами (обычно по 3 ячейки ТК между ячейками РК СУЗ). Рядная резка показала большее уменьшение кривизны ГК по сравнению с «шахматной» резкой.

Резка графитовых колонн выполняется фрезой диаметром 18 мм в два прохода (т.н. «двойной рез»). Увеличение ширины реза (до 36 мм) способствует большему уменьшению кривизны ГК по сравнению с одинарным резом.

Для доставки модуля резки графита и его перемещения стали использовать установки (рис. 2) размером в плане 750×750 мм (3×3 ячейки), что улучшило возможность одновременного выполнения работ на близко расположенных друг к другу ячейках. Всего параллельно использовалось до 4 установок.



Рис. 2. Установка для резки графита производства АО «Диаконт», используемая на Ленинградской АЭС с 2016 г.

С учетом описанных особенностей эффективность (фактические темпы выполнения работ) составляла 3,2–3,5 ячеек в сутки.

1.5. Оптимизация планирования резки и совмещения работ (2021–2023)

При разработке схемы резки применяется подход, направленный на максимальную эффективность первого этапа резки. На практике подтверждена возможность выполнения полномасштабного (с резкой до 200 ячеек) ВРХ за 1 этап, без дополнительных затрат времени, связанных с подготовкой и проведением 2 этапа ВРХ и последующих за ним измерений.

Применяются системы контроля кривизны ИКС-49, позволяющие проводить измерения без выгрузки ядерного топлива, что сокращает длительность выполнения измерений как после останова реактора, так и после завершения резки ГК РУ.

Внедрены системы деликатного извлечения каналов САИТК и СВК-14. При использовании для демонтажа ТК мостового крана каждый третий ТК выходил без комплекта. Использование систем деликатного извлечения каналов свело к минимуму выход каналов с неполным графитовым комплектом и, как следствие, снизило затраты времени на подготовку ячеек к резке в части удаления (при наличии) остатков графитового комплекта.

Модернизирована оснастка для резки графита, закуплены дополнительные установки. Одновременное использование до 6 установок позволило сократить общее время резки.

Отлажен административный процесс ежедневного планирования и выдачи заданий, что позволяет оптимизировать и параллельно выполнять как различные работы по ВРХ (с разнесением по четвертям реактора), так и совмещенные с ними работы без влияния на критический путь ППР.

Уделено отдельное внимание работам заключительного этапа в части повышения качества и эффективности сварки. Оптимизирован процесс заварки СС калачей, за счет чего достигнуто снижение брака с 50% до 0%. Увеличено количество сварочных автоматов для заварки обойм до 6 постов. Оптимизирован процесс заварки, зачистки и контроля СС обойм за счет ежедневного точечного планирования и разнесения заданий (по рабочим сменам и по четвертям реактора).

С учетом описанных особенностей эффективность (фактические темпы выполнения работ) составляет 4,8–5,0 ячеек в сутки.

2. Технология восстановления зазора КЖ-ГК

2.1. Общее описание технологии

В начале ППР энергоблока проводятся с применением робототехнического комплекса измерения зазора КЖ-ГК между металлоконструкцией «КЖ» и графитовыми колоннами внешнего ряда графитовой кладки. Результаты сравниваются с прошлыми измерениями для вычисления скорости уменьшения зазора и определения необходимости выполнения восстановительных работ.

Для восстановления зазора КЖ-ГК применяется робототехнический комплекс, в функции которого входит обрезка ребра графитового блока и удаление образовавшегося графитового клина.

3. Накопленный опыт и перспективы

3.1. Применение силового воздействия

Ячейки, подвергнутые силовому воздействию, могут демонстрировать повышенную скорость прироста кривизны, что негативно сказывается на разрешенном времени работы энергоблока. Применение силового воздействия для каждой разрезанной ячейки нецелесообразно. Ячейки для натяжения следует выбирать на основании результатов экспертной оценки результатов измерений с учетом опыта ранее выполненных работ.

3.2. Разработка схемы резки

Подтверждена эффективность резки по «большому кресту» и локальным коротким рядам, определяемым азимутом стрелы прогиба. При выборе ячеек для локальной резки целесообразно учитывать перспективы выполнения ВРХ в последующие годы и необходимость оставить ячейки «длинных» рядов без РК СУЗ для включения этих рядов в будущие схемы резки.

3.3. Совершенствование технологии ВРХ

Запланировано дальнейшее совершенствование систем и оборудования ВРХ, направленное на повышение эффективности технологии в целом.

Рассматриваются вопросы, связанные с преодолением действующих технических ограничений, таких как:

- производительность вытяжных вентиляционных систем (влияет на допустимое число одновременно работающих установок по резке графита);
- возможность выполнения части измерений на мощности (позволит сократить время от начала ППР до разработки схемы резки и начала выполнения ВРХ);

- точность систем измерения кривизны ГК (влияет на результаты измерений, по которым рассчитывается скорость прироста кривизны и определяется разрешенное время работы РУ на мощности после ППР – погрешность измерений $\pm 1,5$ мм эквивалентна 27 эффективным суткам);
- надежность сварочных аппаратов (влияет на качество выполнения сварочных работ).

3.4. Работа с ячейками РК СУЗ

В рамках управления ресурсом РК СУЗ на АЭС с РБМК запланированы работы по превентивной замене РК СУЗ (в перспективе – по их диагностике и замене по результатам диагностики). Выполнение данных работ предстоит совмещать с работами по УРХ ГК РУ, что потребует решения вопросов, связанных с ограничением количества одновременно извлеченных стержней СУЗ согласно требованиям технологических регламентов по эксплуатации энергоблоков (разрешено извлечение из активной зоны не более 5 стержней СУЗ, расположенных не ближе 2 м друг от друга).

Целесообразным является обоснование одновременного извлечения до 50 стержней СУЗ в период ППР РУ с учетом необходимости разработки и внедрения мероприятий по обеспечению ядерной безопасности.

В период продленного до 50 лет срока эксплуатации энергоблоков РБМК, с учетом фактически наблюдаемого количества разрезанных ячеек (в т.ч. в «длинных» рядах без РК СУЗ) возникнет необходимость резки «длинных» рядов с РК СУЗ, что потребует решения вопросов, связанных с ограничением числа допускаемых к ВРХ ячеек РК СУЗ [1], [2] (разрешена резка не более 5 ячеек РК СУЗ в рамках ВРХ).

Целесообразным является обоснование резки до 50 ячеек РК СУЗ в рамках ВРХ, что позволит выбирать «длинные» ряды с ячейками СУЗ, на заключительных стадиях работы блоков в условиях дефицита ячеек для резки.

3.5. Высвобождение мест в БВК/ШТК

В период продленного до 50 лет срока эксплуатации энергоблоков № 3, 4 Ленинградской АЭС, с учетом фактического количества демонтированных длинномеров, накопленных в БВК/ШТК, а также ожидаемого количества ТК и РК СУЗ, которые будут демонтированы при выполнении работ, потребуется решение вопросов, связанных с высвобождением мест в БВК/ШТК.

Целесообразна разработка технологии массовой перевозки демонтированных каналов с энергоблоков в ХОЯТ с использованием модернизированного вагон-контейнера ТК-8. Ведутся соответствующие конструкторские работы.

3.6. Восстановление ТСТ

В период с 1996 по 2009 г. при выполнении массовой замены ТК (в рамках восстановления зазора ТК-графит) на энергоблоках № 3, 4 Ленинградской АЭС выполнены работы по восстановлению телескопического соединения трактов ТК на всех ячейках с применением сегментов-компенсаторов.

В период продленного до 50 лет срока эксплуатации энергоблоков РБМК возможно выявление ячеек, для которых высота установленных сегментов окажется недостаточной. Предстоит решить вопросы, связанные с определением необходимости (либо отсутствия необходимости) и объемов повторного восстановления ТСТ.

3.7. Управление НФХ РУ

В рамках выполнения работ по ВРХ при резке одной графитовой колонны из активной зоны удаляется до 50 кг графитового замедлителя. За 45 лет эксплуатации энергоблока № 2 было удалено 36 816 кг графита.

В период продленного до 50 лет срока эксплуатации энергоблоков РБМК предстоит решить вопросы, связанные с: прогнозированием суммарного количества графита, который будет удален из активной зоны при УРХ ГК РУ; определением влияния удаления замедлителя на нейтронно-физические характеристики РУ; разработкой и внедрением соответствующих мер по управлению НФХ РУ.

Заключение

Выполнение работ по управлению ресурсными характеристиками графитовых кладок энергоблоков Ленинградской АЭС обеспечило работу энергоблоков № 1, 2 в течение продленного до 45 лет срока эксплуатации, что подтвердило эффективность разработанных технологий по УРХ ГК РУ.

Запланировано дальнейшее развитие и совершенствование технологий по УРХ ГК РУ, призванное обеспечить работу энергоблоков № 3, 4 в течение всего продленного до 50 лет срока эксплуатации.

Список литературы

1. «Обоснование безопасности при проведении УРХ реакторной установки энергоблока №3 Ленинградской АЭС в 2023 году» (520.104 От). М.: АО «НИКИЭТ», 2023.
2. «Обоснование безопасности при проведении УРХ реакторной установки энергоблока №4 Ленинградской АЭС в 2023 году» (520.094 От). М.: АО «НИКИЭТ», 2023.