

ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНОЙ МАССЫ УДАЛЕННОГО ГРАФИТА ПРИ ПОЭТАПНОМ ПРОВЕДЕНИИ РАБОТ ПО УПРАВЛЕНИЮ РЕСУРСНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ РБМК-1000

Плеханов Р.В., Дружинин В.Е., Прохоров И.А., Лысов Д.А., Немиров А.С.
(АО «ВНИИАЭС», Москва, Россия)

Введение

Ремонтно-восстановительные работы по управлению ресурсными характеристиками (УРХ) графитовой кладки (ГК) на энергоблоках АЭС с РБМК-1000 обеспечивают уменьшение стрел прогиба каналов, увеличение зазора между периферийным рядом ГК и металлоконструкцией кожуха реактора. В процессе работ по УРХ ГК производится резка графитовых колонн и удаление продуктов резки из реактора. Удаление части графита кладки влияет на уран-графитовое отношение и, как следствие, на нейтронно-физические характеристики (НФХ) реакторов.

Настоящая работа посвящена оценке и обоснованию предельной массы удаляемого графита при проведении работ по УРХ ГК реакторов энергоблоков № 3 и 4 Ленинградской АЭС. Под предельным значением понимается максимальная масса графита, которую можно удалить на этапах работ по УРХ из активных зон реакторов без нарушения эксплуатационных пределов НФХ при работе энергоблоков в течение 45 лет.

Оценка предельной массы выполнено на основе расчетного детального моделирования работы реакторов для реалистичных сценариев эксплуатации энергоблоков № 3 и 4 Ленинградской АЭС. Основным критерий оценки предельной массы графита – сохранение значений НФХ в установленных диапазонах. При моделировании работы реакторов учтены особенности их эксплуатации, связанные с дожиганием облученных тепловыделяющих сборок (ТВС), выгруженных после останова для вывода из эксплуатации реакторов энергоблоков № 1 и 2, загрузкой ТВС с повышенным содержанием четных изотопов урана (ТВС-ПЧИ), поэтапного удаления части графита на этапах работ по проведению УРХ, выгрузкой дополнительных поглотителей (ДП), графиком работы и проведения ремонтов энергоблоков до момента планового останова (45 лет) для вывода из эксплуатации (ВЭ). Расчетное моделирование работы реактора и прогнозирование значений НФХ выполнено с имитацией перегрузки каждой ТВС, регулировки расходов теплоносителя, оптимизации энерговыделения стержнями системы управления и защиты (СУЗ) и трехмерного полномасштабного расчета выгорания.

Наиболее чувствительной НФХ к удалению части графита является паровой коэффициент реактивности (ПКР), который снижается с загрузкой ТВС-ПЧИ и выполнением этапов УРХ ГК. При отсутствии компенсирующих мер (выгрузки ДП) ПКР снижается до отрицательных значений и может достигать величины минус 1 бэф на момент планового останова реакторов для ВЭ (без продления срока службы до 50 лет).

Для компенсации снижения ПКР на энергоблоках АЭС производится выгрузка ДП. На рисунке 1 представлена зависимость количества ДП в активной зоне от массы удаляемого графита по данным эксплуатации энергоблоков Курской и Ленинградской АЭС.

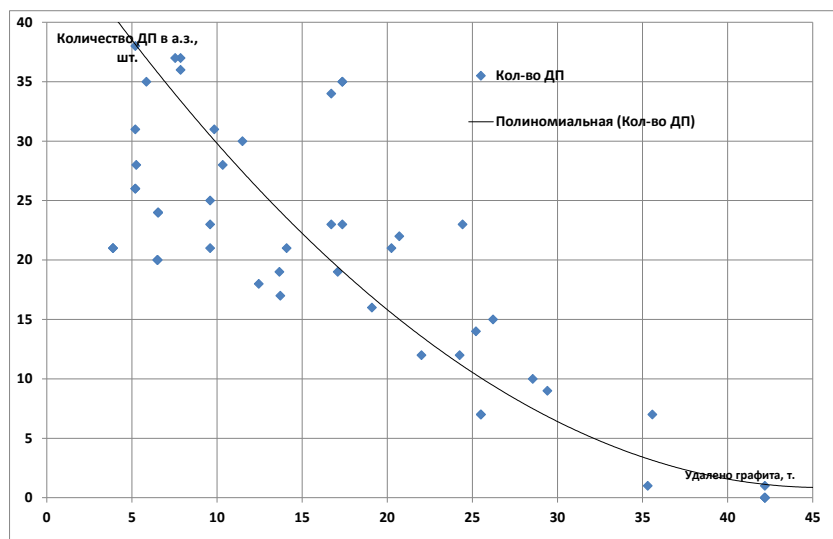


Рис. 1. Зависимость количества ДП от массы удаленного графита

При выполнении расчетных исследований выполнялась оценка изменения НФХ и определялась предельная масса удаляемого графита, такая чтобы к моменту останова реакторов для ВЭ ПКР достиг нижней границы эксплуатационного диапазона 0,3 βэф при всех извлеченных ДП из активной зоны.

Для повышения достоверности оценки предельной массы удаляемого графита и оценки их неопределенности расчетные исследования выполнены с привлечением набора ПК расчетов НФХ, которые применяются при подготовке обоснований безопасности и анализе ядерной безопасности: ЭНЕРГИЯ [1, 2], SADCO [3], STEPAN-3 [3], BARS-COTT и MCU-RBMK [5].

1. Описание расчетных исследований

В качестве исходных состояний реакторов энергоблоков № 3 и 4 Ленинградской АЭС для расчетного моделирования использовались состояния на 01.06.2021. Оценка предельной массы удаляемого графита осуществлялась в два этапа.

На первом этапе расчетных исследований выполнялась оценка изменения ПКР и других НФХ с учетом проведения этапов УРХ ГК без выгрузки ДП. Начиная с исходного состояния, выполнялось моделирование работы реакторов энергоблоков № 3 и 4 Ленинградской АЭС до момента их останова для ВЭ с учетом дожигания облученных ТВС из остановленных энергоблоков. При проведении моделирования рассматривались два варианта подпитки необлученными ТВС – с минимальным и максимальным содержанием четных изотопов урана в соответствии с ТУ на ТВС и два варианта резки ГК, в которых на каждом этапе ремонтно-восстановительных работ по УРХ выполняется резка ~ 50 ячеек (минимальное количество) и ~250 ячеек (максимальное количество).

При моделировании использовался перспективный график ремонтов, в соответствии с которым на энергоблоке № 3 должно быть выполнено 4 ремонта до планового останова для ВЭ 31.01.25, на энергоблоке № 4 должно быть выполнено 4 ремонта до планового останова для ВЭ 26.12.25.

На рисунках 2–5 приведены зависимости ПКР, полученные на первом этапе расчетных исследований в процессе моделирования работы реакторов. Графики ПКР на рисунках при подпитке необлученными ТВС с минимальным содержанием четных изотопов урана обозначены как «ТВС-2,8%», при подпитке необлученными ТВС с максимальным содержанием четных изотопов урана обозначены как «ТВС-ПЧИ».

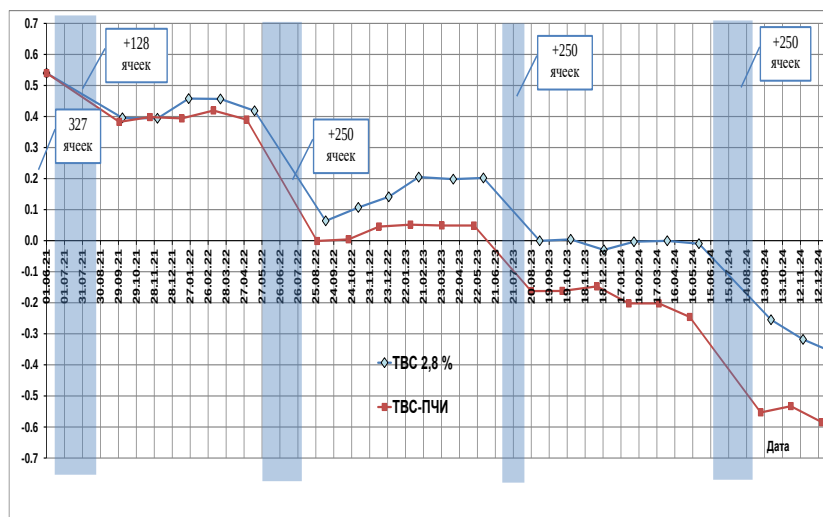


Рис. 2. ПКР реактора э/б № 3 без выгрузки ДП при максимальной резке ГК

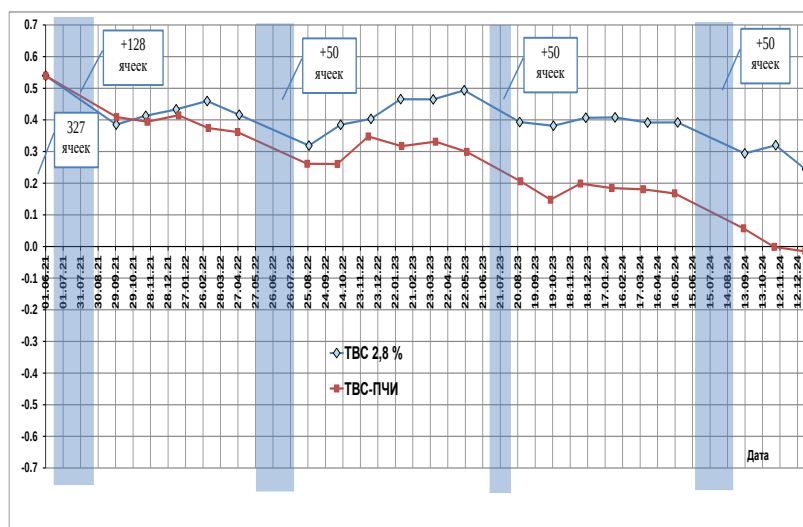


Рис. 3. ПКР реактора э/б № 3 без выгрузки ДП при минимальной резке ГК

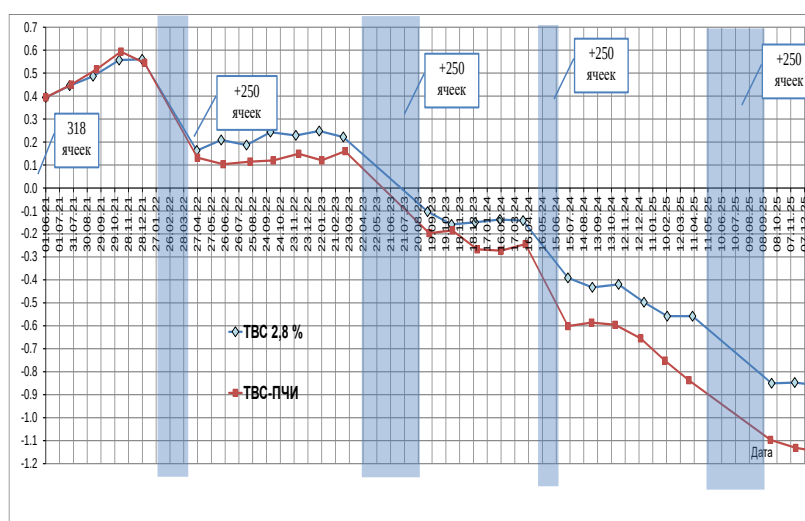


Рис. 4. ПКР реактора э/б № 4 без выгрузки ДП при максимальной резке ГК

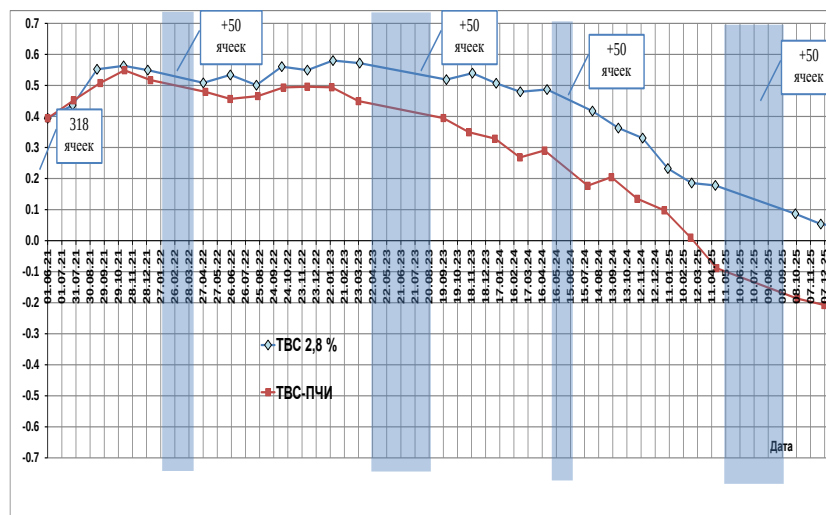


Рис. 5. ПКР реактора э/б № 4 без выгрузки ДП при минимальной резке ГК

Результаты моделирования работы энергоблоков без выгрузки ДП показали, что значения основных НФХ, при удалении более 60 т графита находятся в установленных пределах, несмотря на значительное изменение величины ПКР и его выход за установленный диапазон. Кроме того, полученные результаты позволили сделать предварительную оценку максимальной массы удаленного графита исходя из условия, что значение ПКР к моменту планового останова для ВЭ при выгрузке всех ДП должно составлять не менее 0,3 рэф. Для этого в сформированных прогнозных состояниях на момент останова энергоблоков для ВЭ был оценен эффект изменения ПКР в результате извлечения всех ДП на энергоблоках № 3 и 4. По предварительной оценке, в зависимости от содержания четных изотопов урана предельная масса удаляемого графита может изменяться в диапазоне от 40 до 60 т, см. таблицу 1.

Таблица 1

Предварительные оценки предельной массы удаляемого графита

Топливо подпитки	Энергоблок № 3		Энергоблок № 4	
	Масса, т	Количество отремонтированных ячеек, шт.	Масса, т	Количество отремонтированных ячеек, шт.
С минимальным содержанием четных изотопов урана	59,6	—	50,5	—
С максимальным содержанием четных изотопов урана	51,2	~937*	40,5	~767**
* В среднем – около 225 ремонтируемых ячеек на каждом предстоящем ремонте				
** В среднем – около 140 ремонтируемых ячеек на каждом предстоящем ремонте				

На втором этапе расчетных исследований уточнены картограммы резки ГК. Полученные результаты оценки массы удаленного графита и уточненные картограммы резки ГК явились исходными данными для детального моделирования с извлечением ДП и подготовки прогнозных состояний для расчетов НФХ. С использованием этих исходных данных выполнено детальное моделирование, подготовлены прогнозные

состояния и расчет НФХ по ПК SADCO, STEPAN-3, BARS-COTT, ЭНЕРГИЯ и MSU-RBMK в сформированных состояниях. Показано, что значения НФХ сохраняются в установленных пределах в процессе эксплуатации энергоблоков.

Результаты расчетов ПКР по различным ПК приведены на рис. 6 и 7. На рисунках полосой обозначены ремонты с проведением работ по УРХ. Выносками обозначено количество ремонтируемых ячеек и извлеченных ДП. На места извлеченных ДП устанавливались ТВС. Расчетные прогнозные значения остальных НФХ и ТП также находятся в установленных пределах.

К середине 2023 года на энергоблоках № 3 и 4 Ленинградской АЭС выполнены первые из рассмотренных этапов работ по УРХ и проведены измерения ПКР. Результаты измерений ПКР нанесены на рисунки 6 и 7 и обозначены полыми круглыми маркерами.

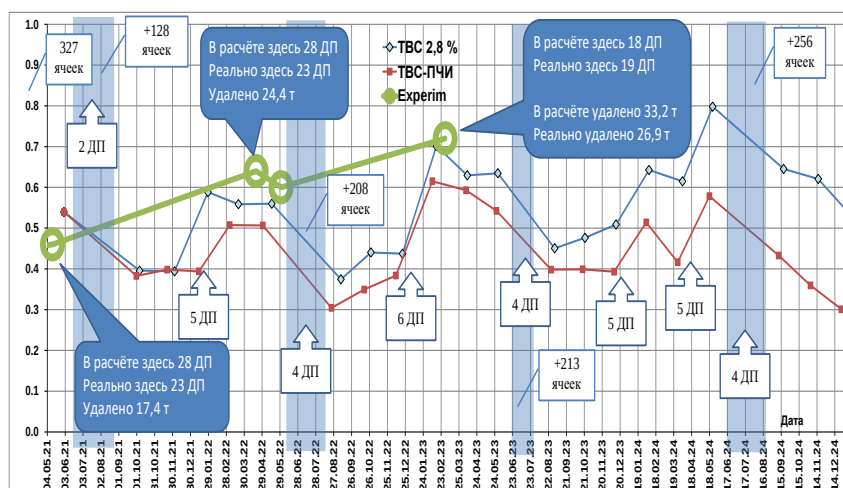


Рис. 6. Прогнозные и экспериментальные значения ПКР энергоблока № 3

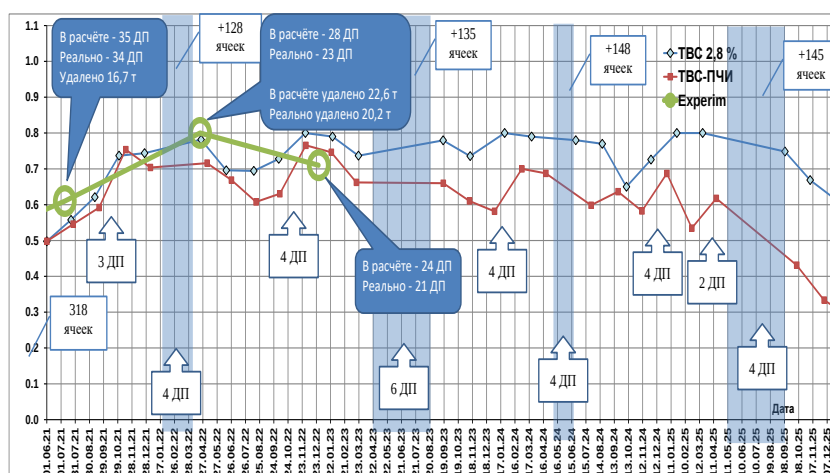


Рис. 7. Прогнозные и экспериментальные значения ПКР энергоблока № 4

Результаты расчетов и измерений ПКР, приведенные на рисунках 6 и 7, показывают удовлетворительное совпадение при незначительных отклонениях прогнозного и реального количества ДП в а. з. и массы удаленного графита.

Как видно из приведенных графиков итоговые значения ПКР при подпитке ТВС с максимальным (в соответствии с ТУ) содержанием четных изотопов урана (в соответствии с ТУ) на момент планового останова реакторов энергоблоков № 3 и 4 составляет ~ 0,3 β эф. Все ДП выгружены. Для этих состояний оценена максимальная масса удаленного графита.

При подпитке ТВС с минимальным содержанием четных изотопов урана значение ПКР на момент планового останова для ВЭ превышает 0,3 бэф, для этих состояний реакторов существует возможность дальнейшего удаления части графита и снижения значения ПКР до нижнего предела. Оценка максимальной массы удаленного графита при подпитке ТВС с минимальным содержанием четных изотопов урана может быть получена экстраполяцией зависимости ПКР.

Результаты расчетных оценок предельной массы удаляемого графита по разным расчетным программам приведены в таблице 2.

Таблица 2

Оценка предельной массы удаляемого графита по разным ПК

Э/б	Кол-во четных изотопов урана в ТВС	Оценка предельной массы М удаляемого графита							
		ЭНЕРГИЯ		SADCO		STEPAN-3		BARS-COTT	
		М, т	Кол-во рем. ячеек, шт.	М, т	Кол-во рем. ячеек, шт.	М, т	Кол-во рем. ячеек, шт.	М, т	Кол-во рем. ячеек, шт.
3	Мин	59,6	—	68,1**	—	75,1**	—	56,3	1055
	Макс	51,2	~937	63,2	937	61,3*	987	44,0	955
4	Мин	50,5	—	61,6**	—	61,1**	—	46,3	858
	Макс	40,5	~767	54,8	875	54,7*	959	42,3	818
* С учетом массы удаленного графита в исходном состоянии									
** Получено экстраполяцией с использованием данных удельного снижения ПКР									

В качестве итоговой оценки предельной массы удаляемого графита использована среднее значение по аттестованным программам (т.е. исключая BARS-COTT). Результаты итоговой, усредненной оценки максимальной массы удаляемого графита для реакторов энергоблоков № 3 и 4 Ленинградской АЭС приведены в таблице 3.

Таблица 3

Усредненная оценка предельной массы удаляемого графита для реакторов энергоблоков № 3 и 4 Ленинградской АЭС

Э/б	Кол-во четных изотопов урана в ТВС	Предельная масса удаляемого графита, т	Предельная масса удаляемого графита при подпитке топливом, содержащим среднее (по ТУ) количество четных изотопов урана, т
3	Мин	67,6	63,1
	Макс	58,6	
4	Мин	57,7	53,9
	Макс	50,0	

В таблице 3 кроме оценок предельной массы удаляемого графита приведены усредненные оценки предельной массы при подпитке топливом с усредненным содержанием четных изотопов урана.

2. Неопределенность оценки предельной массы удаляемого графита

В качестве оценки итоговой, суммарной неопределенности предельной массы удаляемого графита использовано усредненное значение стандартного отклонения

результатов расчетов по аттестованным программам (по данным таблицы 2, исключая BARS-COTT) и двух типов топлива подпитки, которое составляет 8 т.

Поскольку расчеты с использованием указанных в таблице 2 программ, имеющих разную специфику моделирования работы программ, проведены независимо, то выбранная таким образом результирующая оценка неопределенности включает следующие основные составляющие:

- неопределенность содержания четных изотопов урана в необлученных ТВС подпитки;
- неопределенность моделирования работы реакторов при выборе перегружаемых каналов и положений стержней СУЗ, расчете выгорания топлива;
- погрешность расчета ПКР в сформированных прогнозных состояниях.

Следует отметить еще одну составляющую неопределенности оцененной массы графита и результатов расчета НФХ в процессе моделирования – неопределенность, обусловленную влиянием выбора схемы резки. Поскольку удаление конкретной массы графита возможно с использованием различных картограмм ремонта, выполнены расчеты по оценке этой неопределенности. Полученные оценки указывают на пренебрежимо малое влияние выбора схемы резки на НФХ реакторов и, соответственно, предельную массу удаляемого графита, например для ПКР величина этой оценки составила 0,03 $\beta_{эф}$.

Заключение

Результаты расчетных исследований показывают, что наиболее чувствительной характеристикой к удалению части графита и загрузке ТВС-ПЧИ НФХ является ПКР. При его поддержании в установленных пределах от 0,3 до 0,8 $\beta_{эф}$ и снижении до отрицательных значений (не менее минус 0,5 $\beta_{эф}$) обеспечивается поддержание остальных НФХ установленных пределах.

Консервативно оцененная предельная масса удаляемого графита с учетом установленного эксплуатационного диапазона для ПКР составила:

- для энергоблока № 3 – 63 т;
- для энергоблока № 4 – 54 т.

Меньшее значение предельной массы удаляемого графита для реактора энергоблока № 4 обусловлено большей длительностью эксплуатации в условиях загрузки ТВС-ПЧИ, что является дополнительным фактором снижения ПКР по сравнению с энергоблоком № 3. Отметим, что при удалении предельной массы графита удержание ПКР в установленном диапазоне при эксплуатации более 45 лет может быть невозможным даже в случае извлечения всех ДП из активных зон реакторов. В этом случае потребуются дополнительные меры, такие как расширение эксплуатационного диапазона ПКР или перевод реакторов на топливо подпитки с уменьшенным содержанием эрбия.

При оценке предельной массы удаляемого графита выполнен анализ ее неопределенности. Поскольку содержание четных изотопов урана в топливе подпитки до планового останова реакторов для ВЭ может изменяться (в пределах, указанных в ТУ на ТВС), оценка предельной массы удаляемого графита в отчете выполнена для минимального и максимального содержания четных изотопов урана. Суммарная неопределенность предельной массы удаляемого графита, обусловленная содержанием четных изотопов урана в топливе подпитки и методической погрешностью расчетов, составляет 8 т.

Оценка предельной массы удаляемого графита получена консервативным образом, для поддержания НФХ в установленных эксплуатационных пределах используется только выгрузка ДП и не рассматриваются другие факторы, например, снижение нижней границы эксплуатационного диапазона парового коэффициента

реактивности или уменьшение содержания эрбия в свежем топливе. Фактические результаты измерений, выполненных на реакторах, подтверждают правильность расчетных прогнозных оценок НФХ и предельной массы удаляемого графита.

Результатами расчетных исследований показано, что на этапах выполнения работ по управлению ресурсными характеристиками и в процессе срока работы до момента планового останова для ВЭ НФХ реакторов энергоблоков № 3 и 4 Ленинградской АЭС остаются в установленных пределах, ядерная безопасность обеспечивается. На этапах выполнения работ по УРХ, а также при реализации дополнительных мероприятий по управлению НФХ реакторов, например, при изменении состава топлива, значения предельной массы удаляемого графита могут быть уточнены на основании результатов расчетов и измерений НФХ.

Список литературы

1. «ТРОЙКА с библиотекой констант «БМП»» (версия 8.1). Аттестационный паспорт программного средства, рег. № 439 от 17.04.2018
2. «POLARIS» с библиотекой констант «БМП». (версия 6.2). Аттестационный паспорт программного средства № 440 от 17.04.2018
3. Ростехнадзор. Аттестационный паспорт программного средства SADCO (версия 10.1). Регистрационный номер 436, 2018
4. Аттестационный паспорт программного средства STEPAN-3, рег. № 453 от 24.10.2018
5. Аттестационный паспорт программного средства MCU-RBMK с банком данных MDB650 (с каналом подготовки исходных данных КДМК), рег. № 430 от 27.02.2018