

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОГНОЗНОГО ПОЛОЖЕНИЯ КОМПЕНСИРУЮЩИХ РАБОЧИХ ОРГАНОВ РЕАКТОРА БН-600 БЕЛОЯРСКОЙ АЭС В КРИТИЧЕСКОМ СОСТОЯНИИ

В.А. Желтышев, А.А. Лыжин, В.А. Шаманский

Белоярская АЭС, г. Заречный



Приведено обоснование дополнительного метода определения прогноз-ного положения РО КС1-18 в критическом состоянии после проведения перегрузки, который совместно с существующим методом позволяет надежно определять положение РО КС1-18 в критическом состоянии, повысить безопасность и экономичность эксплуатации реактора БН-600.

Ключевые слова: реактор БН-600, рабочий орган (РО) СУЗ, запас реактивности, эффективность системы РО КС1-18.

Key words: BN-600 reactor, control rod, reactivity margin, KS1-18 control rod system.

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с технологическим регламентом (ТР) [1] перед выводом реактора БН-600 в критическое состояние рабочие органы аварийной защиты (РО АЗ) извлекаются в верхнее рабочее положение. Центральный компенсирующий рабочий орган (РО КСЦ) извлекается на верхний концевик (ВК), а регулирующие (РО РС) – в положение 450 мм по указателю положения (УП). Далее вывод реактора в критическое состояние производится перемещением РО КС1-18.

Прогнозное положение РО КС1-18 в критическом состоянии определяется с использованием расчетной программы ГЕФЕСТ [2] в соответствии с алгоритмами методики [3]. Опыт эксплуатации расчетной программы ГЕФЕСТ по определению прогнозного положения РО КС1-18 в критическом состоянии в период с 29-ой по 56-ю микрокампанию (МК) показывает, что отличие прогнозного положения РО КС1-18 в критическом состоянии от фактического положения РО КС1-18 не превышает значения, регламентируемого ТР (40 мм). Тем не менее, разработка дополнительного, независимого от расчетной программы ГЕФЕСТ, метода определения прогнозного положения РО КС1-18 в критическом состоянии после проведения перегрузки составных частей активной зоны является важной задачей для эксплуатации. Уменьшение погрешности прогноза положения РО КС1-18 в критическом состоянии снижает уровень ожидания оперативным персоналом критического состояния.

В рамках выполнения работ по аттестации расчетных программ (ТРИГЕКС, ГЕ-

© В.А. Желтышев, А.А. Лыжин, В.А. Шаманский, 2011

ФЕСТ, JARFR) ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ» выпустил отчет [4], в котором рекомендовано внесение изменений в методику определения нейтронно-физических характеристик (НФХ) реактора БН-600 [5]. Для проверки приемлемости этих рекомендаций на Белоярской АЭС была выполнена работа [6], в которой приведены результаты анализа измеренных значений НФХ реактора БН-600 в период с 39-ой по 56-ю МК, в том числе и результаты сравнения измеренных значений НФХ с расчетными. Проведенный анализ показал, что отличие измеренных значений НФХ от расчетных в случае использования рекомендаций отчета [4] уменьшается по сравнению с соответствующими отличиями в случае использования существующей методики [5]. Это обстоятельство и послужило отправной точкой для проверки возможности разработки дополнительного метода определения прогнозного положения РО КС1-18 в критическом состоянии с приемлемой погрешностью.

РАЗРАБОТКА ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОГНОЗНОГО ПОЛОЖЕНИЯ РО КС1-18 В КРИТИЧЕСКОМ СОСТОЯНИИ

Для определения прогнозного положения РО КС1-18 в критическом состоянии необходимо получение прогнозной эффективности систем РО КС1-18, РО РС и прогнозного максимального запаса реактивности. Эффективность системы РО РС прогнозируется достаточно просто по результатам текущей эксплуатации, и отличие прогнозной эффективности от измеренной не вносит существенного вклада в погрешность прогнозного положения РО КС1-18 в критическом состоянии.

Определение прогнозной эффективности системы РО КС1-18

Для определения прогнозной эффективности системы РО КС1-18 были использованы измеренные эффективности системы РО КС1-18 ($\rho_{КС1-18}$) в период с начала 39-ой по начало 56-ой МК, паспортные массы бора-10 в РО КС1-18 (m) и средние наработки эффективных суток РО КС1-18 (T_{cp}).

В соответствии с этими данными были получены зависимости прогнозной эффективности системы РО КС1-18 от средней наработки эффективных суток и паспортной массы бора-10. Поскольку за указанный период в реакторе эксплуатировались РО КС двух конструкций (сборки 1161В и 2635), то зависимости были получены отдельно для каждой сборки. При получении вида зависимости прогнозной эффективности системы РО КС1-18 оценивалась также и стандартная погрешность модели (СКО). Полученные уравнения зависимости прогнозной эффективности системы РО КС1-18 и значения СКО приведены в табл. 1.

Аналогичным образом были получены уравнения зависимости прогнозной эффективности системы РО КС1-18,Ц (табл. 1).

Для системы РО КС1-18 существующей сборки 2635 погрешность прогноза (модели) не превышает $0,11\%dk/k$ для вероятности 0,99. Это хороший результат с

Таблица 1

Уравнения зависимости прогнозной эффективности системы РО КС

Система	Сборка	Уравнение	СКО, %dk/k
КС1-18	1161В	$\rho_{КС1-18} = -0,00188 \cdot T_{cp} + 0,5482 \cdot m$	0,104
	2635	$\rho_{КС1-18} = -0,00219 \cdot T_{cp} + 0,4840 \cdot m$	0,041
КС1-18,Ц	1161В	$\rho_{КС1-18,Ц} = -0,00177 \cdot T_{cp} + 0,5503 \cdot m$	0,120
	2635	$\rho_{КС1-18,Ц} = -0,00210 \cdot T_{cp} + 0,4859 \cdot m$	0,042

учетом того факта, что в указанной погрешности имеются составляющие за счет погрешностей эффективной доли запаздывающих нейтронов и паспортной массы бора-10 за счет технологических допусков по загрузке поглотителя бора-10 при изготовлении РО КС. Кроме того, в период с 50-ой по 56-ю МК в реакторе БН-600 эксплуатировались различные опытные составные части активной зоны и были проведены мероприятия по продлению ресурса РО КС. В начале 54-ой МК в реактор БН-600 загружены два опытных РО КС сборки 2635 с повышенной плотностью карбида бора. В начале 50-й и 51-й МК РО КС сборки 2635 еще не вышли на стационарный режим перегрузок и перед началом 50-й МК были осуществлены их перестановки в реакторе для реализации дальнейшей равномерно-частичной перегрузки.

Для РО КС сборки 1161В значения разброса оказались несколько выше, поэтому был проведен анализ причин повышенного разброса. Анализ показал, что можно уменьшить значения СКО за счет усложнения модели как для РО КС сборки 1161В, так и для РО КС сборки 2635. Усложнение модели заключалось, в первую очередь, за счет изменения расчета средней наработки эффективных суток РО КС. Немаловажное значение для системы РО КС1-18,Ц имеет учет положения РО КСЦ при эксплуатации. Если учесть предысторию эксплуатации остальных РО КС1-18, а именно, их начальное положение в горячем состоянии в предыдущих МК, то СКО также снижается. В частности, для системы РО КС1-18 сборки 2635, у которых назначенный ресурс составляет четыре МК, учет положения РО КС в предыдущих МК снижает СКО до $0,028\%dk/k$. Кроме того, для системы РО КС1-18 сборки 1161В ряд измеренных эффективностей может быть отбракован из-за существенных отличий, касающихся методической части измерения. Определение эффективности одиночных РО КС было проведено в режиме «off-line», т.е. имеющиеся файлы с записанными токами камеры КНК-15-1 были обработаны ныне существующей программой и по существующей методике. Так в конце 42-2 МК измеренные эффективности одиночных РО КС были определены с использованием параметров запаздывающих нейтронов на конец МК (160 эфф.сут), тогда как истинная наработка составляла 240 эфф.сут. С учетом предыстории эксплуатации РО КС сборки 1161В в предыдущих МК и отбраковки ряда МК значение СКО может быть снижено до $0,082\%dk/k$, что дает соответствующее снижение погрешности определения прогнозного положения РО КС1-18 в критическом состоянии на 5 мм.

Тем не менее, для удобства дальнейшего применения на практике нижеприведенные прогнозные положения РО КС1-18 в критическом состоянии получены с использованием упрощенных уравнений, приведенных в табл. 1.

Определение прогнозного максимального запаса реактивности

Прогнозный максимальный запас реактивности на следующую МК определялся как сумма измеренного запаса реактивности в конце предыдущей МК и изменения запаса реактивности за счет перегрузки составных частей активной зоны.

Изменение запаса реактивности за счет перегрузки составных частей активной зоны определялось в соответствии с коэффициентами для каждой зоны реактора (отчет [7]). Влияние опытных составных частей активной зоны на запас реактивности принималось в соответствии с их техническими проектами. Прогнозный максимальный запас реактивности сравнивался с измеренным максимальным запасом реактивности. Результаты сравнения прогнозного максимального запаса реактивности ($ZP_{\text{прог.}}$) и измеренного, полученного по новой методике ($ZP_{\text{н.м.}}$), приведены в табл. 2. Для сравнения в таблице приведены также соответствующие отличия для случая измерения запасов реактивности в начале и конце МК по существующей методике ($ZP_{\text{ст.м.}}$).

Таблица 2

Отличия максимальных запасов реактивности, %dk/k

№ МК	ЗР _{ст.м.} – ЗР _{прог.}	ЗР _{н.м.} – ЗР _{прог.}	ЗР _{н.м.} – ЗР _{прог. поп.}
н40	0,187	0,098	0,097
н41	-0,106	-0,348	-0,037
н42-1	0,245	0,036	0,031
н43	0,288	0,080	-0,113
н44	-0,188	-0,340	-0,029
н45	0,039	-0,179	0,132
н46	0,040	-0,186	0,030
н47	-0,088	-0,150	0,161
н48	0,312	0,159	0,030
н49	0,252	0,050	0,110
н50	0,044	-0,206	-0,077
н51	-0,003	-0,166	-0,009
н52	0,043	-0,139	0,078
н53	0,247	0,130	0,128
н54	-0,300	-0,490	-0,245
н55	-0,350	-0,390	-0,234
н56	-0,180	-0,250	-0,054
Среднее	0,029	-0,135	0,000
СКО	0,208	0,197	0,120
Макс	0,312	0,159	0,161
Мин	-0,350	-0,490	-0,245
Пог(0,99)	0,54	0,51	0,31
	01М2 (50–56)	01М2 (50–56)	01М2 (50–56)
Среднее	-0,071	-0,216	-0,059
СКО	0,214	0,198	0,143
Макс	0,247	0,130	0,128
Мин	-0,350	-0,490	-0,245
	01М1 (40–49)	01М1 (40–49)	01М1 (40–49)
Среднее	0,098	-0,078	0,041
СКО	0,182	0,186	0,085
Макс	0,312	0,159	0,161
Мин	-0,188	-0,348	-0,113

Проведенный анализ отличий в табл. 2 показал, что имеется корреляционная зависимость [8] между отличием прогнозного максимального запаса реактивности от измеренного и изменением запаса реактивности за счет перегрузок тепло-выделяющих сборок (ТВС) наружного экрана (НЭ). Для иллюстрации эта зависимость приведена на рис. 1.

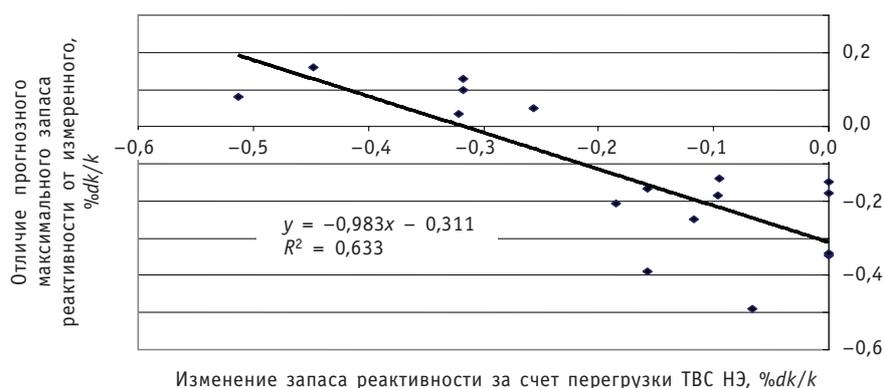


Рис. 1. Зависимость отличия прогнозного максимального запаса реактивности от измеренного за счет эффекта от перегрузки ТВС НЭ

Зависимость между отличием прогнозного максимального запаса реактивности от измеренного и изменением запаса реактивности при перегрузке ТВС НЭ объясняется тем, что коэффициенты для ТВС НЭ, рекомендованные в отчете [7], получены с дополнительной систематической погрешностью. Подтверждающие этот вывод результаты были получены при проведении гамма-сканирования, когда измеренное энерговыделение в ТВС НЭ отличалось от расчетного [9]. Это отличие незначительно и не снижает безопасность эксплуатации ТВС НЭ, но суммарный вклад неопределенности коэффициентов в неопределенность изменения запаса реактивности, особенно при перегрузке значительного количества ТВС НЭ, оказывается существенным.

С учетом выявленной зависимости в прогнозное значение максимального запаса реактивности ($ZP_{\text{прог.пол.}}$) была введена поправка и получены повторно отличия прогнозного максимального запаса реактивности от измеренного. Результаты сравнения и статистические характеристики этих отличий приведены в табл. 2.

Из данных таблицы следуют важные выводы. Наблюдается систематическое (но незначимое) отличие между активными зонами 01M1 и 01M2, что подтверждает возможность использования коэффициентов активной зоны 01M1 для активной зоны 01M2. Отличие, равное $0,100\%dk/k$, в пересчете в положение системы РО КС1-18 не превышает 12 мм.

Второй и главный вывод заключается в том, что введение соответствующих поправок к прогнозируемому максимальному запасу реактивности приводит к уменьшению среднеквадратического отклонения отличия практически в два раза. Соответственно, погрешность прогнозного максимального запаса реактивности снижается с $0,51$ до $0,31\%dk/k$ для доверительной вероятности $0,99$.

Определение прогнозного положения РО КС1-18 в критическом состоянии

Прогнозное положение РО КС1-18 в критическом состоянии определялось исходя из прогнозного максимального запаса реактивности с поправкой на перегрузку ТВС НЭ, прогнозной эффективности системы РО КС1-18, измеренных эффективностей системы РО РС и интегральных характеристик системы РО КС1-18, РО РС, приведенных в методике [3]. Прогнозное положение РО КС1-18 в критическом состоянии соответствовало значению интегральной характеристики системы РО КС методики [3].

Из полученных данных следует, что с вероятностью $0,99$ прогнозируемое положение РО КС1-18 по предлагаемому дополнительному методу не будет отличаться от

фактического положения РО КС1-18 на величину более 45 мм. При снижении уровня доверия до 0,98 погрешность метода снижается до 40 мм.

Большая часть в СКО отличия фактического положения РО КС1-18 от прогнозного положения РО КС1-18 объясняется систематическим отличием прогнозного максимального запаса реактивности для активной зоны О1М2 от прогнозного максимального запаса реактивности для активной зоны О1М2 (0,100%dk/k). По мере накопления опыта эксплуатации активной зоны О1М2 это систематическое отличие можно будет учесть. Такой учет позволит снизить погрешность прогнозного положения РО КС1-18 в критическом состоянии до 36 мм и не превышать значения, требуемого ТР.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОГНОЗНОЙ ПОДКРИТИЧНОСТИ ПРИ ВЗВЕДЕННЫХ РО АЗ

Кроме определения прогнозного положения РО КС1-18 в критическом состоянии указанные выше алгоритмы получения прогнозных нейтронно-физических характеристик позволяют оценить и прогнозную подкритичность при взведенных РО АЗ. Такая оценка прогноз подкритичности при взведенных РО АЗ полезна при сопровождении эксплуатации реактора. Она может быть использована для случая частичной (неполной) перегрузки реактора, которая достаточно часто используется при проведении планово-предупредительных работ (ППР) или при оценке влияния на запас реактивности опытных составных частей активной зоны. В таблице 3 приведены значения прогноз подкритичности при взведенных РО АЗ ($P_{\text{прог.}}$) и сравнение ее с измеренной подкритичностью при взведенных РО АЗ ($P_{\text{изм.}}$).

Из данных таблицы с учетом погрешности измеренной подкритичности при взведенных РО АЗ была получена погрешность прогноз подкритичности при взведенных РО АЗ. Для вероятности 0,99 она составила 0,39%dk/k. Для сравнения погрешность расчетной по ГЕФЕСТ подкритичности при взведенных РО АЗ составляет 0,31%dk/k для той же вероятности. Таким образом, предлагаемый метод с небольшой потерей точности позволяет получать прогнозную подкритичность при взведенных РО АЗ. Оперативность предлагаемого метода существенно выше при проведении оценки подкри-

Таблица 3

Измеренные и прогнозные подкритичности при взведенных РО АЗ, %dk/k

№ МК	$P_{\text{прог.}}$	$P_{\text{изм.}}$	$P_{\text{прог.}} - P_{\text{изм.}}$
н40	1,685	1,666	0,019
н41	1,366	1,279	0,087
н42-1	1,804	1,505	0,299
н43	2,023	2,067	-0,044
н44	2,185	2,147	0,038
н45	1,766	1,631	0,135
н46	1,463	1,472	-0,009
н47	2,964	2,805	0,159
н48	2,288	2,391	-0,103
н49	2,252	2,300	-0,048
н50	1,748	1,820	-0,072
н51	1,873	1,923	-0,050
н52	1,634	1,513	0,121
н53	1,850	1,743	0,107
н54	1,435	1,620	-0,185
н55	2,132	2,410	-0,278
н56	2,136	2,110	0,026
Среднее			0,012
СКО			0,137
Макс			0,299
Мин			-0,278
Пог(0,99)			0,353

тичности после неполной (частичной) перегрузки составных частей активной зоны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемые методы получения прогнозных нейтронно-физических характеристик просты при реализации и не требуют использования расчетных программ. Их использование позволяет уменьшить влияние человеческого фактора при определении нейтронно-физических характеристик и тем самым повысить безопасность и экономичность эксплуатации реактора БН-600.

Погрешность прогнозного максимального запаса реактивности за счет выявленной зависимости ее от величины перегрузки ТВС НЭ и учета этой зависимости снижается практически в два раза.

Погрешность метода определения прогнозного положения РО КС1-18 в критическом состоянии с вероятностью 0,98 позволяет не превышать величину, рекомендованную технологическим регламентом.

По результатам данной работы разработаны рекомендации по использованию предлагаемых методов получения прогнозных нейтронно-физических характеристик реактора БН-600 для практической работы при проведении измерений и подтверждении расчетных и проектных значений. Рекомендованы также изменения в эксплуатационно-техническую документацию.

Авторы выражают благодарность заместителю директора ИЯРЯЭ ФГУП ГНЦ РФ-ФЭИ Ю.С. Хомякову за ценные замечания при обсуждении темы статьи.

Литература

1. Технологический регламент безопасной эксплуатации энергоблока №3 Белоярской АЭС, инв. №02-41-157. – Белоярская АЭС, 2008. – 106 с.
2. Комплекс программ ГЕФЕСТ с системой подготовки констант CONSYST и библиотекой БНАБ-93, регистрационный номер паспорта аттестации ПС №216 от 19.09.2006. – 9 с.
3. Методика расчета запаса реактивности, положения рабочих органов СУЗ и подкритичности реактора БН-600, инв. №38-4/16-34 от 12.11.2007. – Белоярская АЭС. – 25 с.
4. Отчет о НИР «Расчетный анализ экспериментов по измерению эффективности РО СУЗ, эффектов и запаса реактивности в реакторе БН-600 и оценка точности расчетов», инв. №11976, 2008. – Обнинск: ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ». – 77 с.
5. Методика определения нейтронно-физических характеристик на реакторе БН-600 Белоярской АЭС, №38-3/8-1. – Белоярская АЭС, ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ», ФГУП ОКБМ, 2004. – 40 с.
6. Техническая справка «Результаты измерений нейтронно-физических характеристик реакторной установки энергоблока №3 Белоярской АЭС в период с 39 по 53 МК», №38-3/4-1186 от 15.12.2008. – Белоярская АЭС. – 30 с.
7. Методика расчета запаса реактивности реактора БН-600 на основе данных по эффективности ТВС, научно-технический отчет по ОКР. – ОКБМ, 1993. – 21 с.
8. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. – 2 изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 304 с.
9. Отчет о НИР «Контроль распределения энерговыделения в реакторе БН-600 до и после перехода на модернизированную активную зону 01М2», инв. №11529. – ФГУП «ОКБМ», ОАО «ВНИИАЭС», ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ», 2005. – 150 с.

Поступила в редакцию 14.10.2010

УДК 621.039.546.54

Analysis of the Dynamics of Hydrogen Ingress into Secondary Sodium after Replacement of the BN-600 Power Unit Steam Generator Stages \ Yu.V. Nosov, G.N. Tsygankov, A.I. Beltyukov, P.P. Govorov, A.A. Kuznetsov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 9 pages, 4 illustrations. – References, 3 titles.

The technique of calculation of hydrogen ingress into the secondary circuit of the BN-600 power unit after replacement of the PGN200M steam generator stages is presented. The hydrogen diffusion from the water-steam circuit from the new evaporator stages of which the heat exchange surfaces have not been subjected to the passivation yet is shown to be the main source of ingress.

УДК 621.039.54

Operating Experience from Europium Absorbers in the BN-600 Reactor and Perspectives of Their Further Utilization in the Innovation Nuclear Reactors \ V.D. Risovany, A.V. Zakharov, E.P. Klochkov, V.V. Maltsev, A.I. Karpenko, V.I. Ogleznev, A.M. Tuchkov, I.A. Chernov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 5 pages, 2 tables, 2 illustrations.

An extensive operating experience from the europium control rods has been accumulated. Research into materials has shown that the BN-600 reactor europium rods have high lifetime characteristics. A set of the studies on utilization of europium radionuclides in the gamma-emitting sources has been conducted. The most promising line is a utilization of double-purpose designs of the control rods with an absorbing kernel in the form of the inserts of the active part of the standard gamma-emitting sources.

УДК 621.039.54

Genetic Algorithm for the Localization of Defective Fuel Assemblies in the BN-600 Reactor Core \ A.O. Skomorokhov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 8 pages, 2 tables, 3 illustrations. – References, 10 titles.

The article considers the problem of determining the location of the fuel assemblies with leaky fuel rods in the reactor BN-600. The problem is solved by the method of neutron flux tilting at the operating reactor. Perturbations of the neutron field in the motion of control rods can be approximated by using a radial-basis neural network. A genetic algorithm for the localization of defective fuel assemblies is proposed.

УДК 621.039.56

Additional Method of Determination of the Predictive Position of the Shim Rods of the Beloyarsk NPP \ V.A. Zhyoltyshev, A.A. Lyzhin, V.A. Shamansky; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 7 pages, 3 tables, 1 illustration. – References, 9 titles.

BN-600 reactor in the critical condition The additional method of determination of the predictive position of the KS1-18 control rods in the critical condition after refuelling is justified. Together with the existing method the above-mentioned method makes it possible to reliably determine the KS1-18 control rod position in the critical condition and improve safety and effectiveness of the BN-600 reactor operation.

УДК 621.039.56

Experimental and Computational Justification of the Reactivity Balance and Power Distribution in the BN-600 Core \ V.A. Zhyoltyshev, V.V. Maltsev, V.F. Roslyakov, A. V. Moiseev, M.Yu. Semyonov, Yu.S. Khomyakov, A.A. Belov, E.F. Seleznyov, B.A. Vasilev, M.R. Farakshin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 15 pages, 4 tables, 12 illustrations. – References, 13 titles.

For the 30-year history of the BN-600 reactor operation a set of the computational and experimental measures on the monitoring of the reactor core neutron-physical characteristics has been perfected. In this paper the results achieved by means of the reactivity and spectrum measurements and their computational analysis by all the available domestic software packages are presented.