

## РАСЧЕТНОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕАКТОРА БН-600

**В.В. Мальцев, В.Ф. Росляков, Х.Ф. Гиззатулин**

*Белоярская АЭС, г. Заречный*



В статье приведены основные отличительные характеристики активных зон за время эксплуатации реактора БН-600. Проведен анализ нейтронно-физических расчетов реактора БН-600 комплексом программ URAN и комплексом программ ГЕФЕСТ. Приведена оценка влияния методики расчетов реактора БН-600 комплексом программ ГЕФЕСТ на результаты расчетных характеристик ТВС.

В этом году исполняется 25 лет энергоблоку № 3 Белоярской АЭС. Натриевый реактор на быстрых нейтронах БН-600 был введен в эксплуатацию в 1980 г. Физический пуск проведен 26 февраля, энергетический пуск – 8 апреля. В течение полутора лет осуществлялся поэтапный набор мощности и освоение режимов работы оборудования. 18 декабря 1981 г. была достигнута номинальная мощность энергоблока (1470 МВт – тепловая, 600 МВт – электрическая). Начиная с 1982 г., энергоблок БН-600 работает в режиме коммерческой выработки электрической и тепловой энергии, выполняя одновременно задачи по испытанию и проверке прототипного оборудования и новых научно-технических достижений в области быстрых реакторов.

Активная зона реактора является урановой. Нарботка плутония производится как собственно в активной зоне, так и в торцевой и боковой зонах воспроизводства. В проектном варианте активная зона имела две зоны обогащения по U-235 (21 и 33%), максимальное выгорание 9,7% т.а., высоту активной зоны – 75 см и двух- и трехкратную схему перегрузки соответственно по зонам обогащения. Это предполагало проведение перегрузки через 150 эфф.сут работы реактора.

За более чем 20-летний срок эксплуатации реактора БН-600 на БАЭС было проведено две модернизации его активной зоны.

С топливной загрузкой первого типа реактор работал с 1980 по 1986 гг. Основные характеристики этой активной зоны: длина топливной части ТВС – 750 мм, две зоны обогащения по урану 235 – 21 и 33%.

В конце 1987 г. было принято решение о разработке нового проекта и осуществлении перевода активной зоны реактора БН-600 на топливную загрузку первой модернизации. Для улучшения показателей эксплуатации активной зоны была увеличена длина обогащенной части твэла с 750 до 1000 мм, с применением ТВС трех обогащений по урану-235: 17, 21 и 26%. С топливной загрузкой первой модернизации реактор работал в течение 1988–1991 гг. Фактически достигнутые выгорания соответствовали проектным. В процессе работы был начат переход на новые, более радиационно стойкие конструкционные материалы. Результаты исследований ТВС с этими материалами позволили обосновать возможность повышения максимального выгорания топлива до 10% т.а.

© В.В. Мальцев, В.Ф. Росляков, Х.Ф. Гиззатулин, 2005

В течение 1991–1993 гг. был осуществлен перевод реактора на активную зону второй модернизации, с максимальным выгоранием топлива – 10% т.а. Для обеспечения необходимого запаса топлива в активной зоне второй модернизации была увеличена его загрузка на 4%, за счет увеличения высоты топливного столба в ТВС с 1000 до 1030 мм и эффективной плотности топлива в твэлах с 8,5 до 8,6 г/см.

С топливной загрузкой второй модернизации реактор работал в течение 1991–2004 гг. В течение работы реактора с этой активной зоной постоянно проводились испытания чехловых и оболочечных стержней с целью увеличения их ресурса работы.

Переход на третью модернизированную активную зону начался весной 2004 г., и должен завершиться осенью 2005 г. За время этого перехода на реакторе БН-600 пройдет четыре перегрузки топлива.

Расчет первых микрокампаний реактора БН-600 осуществлялся комплексом программ JAR, затем комплексом ядерно-физических расчетов URAN, а с 1992 г. комплексом программ ГЕФЕСТ. Таким образом, не существовало банка данных по всем сборкам реактора, насчитанных единой программой, что не давало возможности уверенно обрабатывать данные по различным функционалам, по всем типам ТВС, СУЗ и гильз СУЗ. Соответственно не было единого набора данных по поведению реактора БН-600 за весь период эксплуатации, т.е. это запасы реактивности,  $k_{эфф.}$ , темп потери реактивности  $\beta_{эфф.}$  и др. Тем более набор расчетных данных по сборкам реактора для активных зон реактора 01 и 01М, насчитанных комплексом URAN, был существенно ниже, чем мог предложить ГЕФЕСТ (например, комплекс URAN вел расчет и выдавал данные по одной точке на каждую сборку, а комплекс программ ГЕФЕСТ – 18 точек и, кроме того, большое количество ранее не рассчитываемых функционалов – десять трансуранов, доза на противоположную грань, потоки 1 и 2-ой группы,  $KR$ ,  $Qv$  и прочее, по высоте каждой сборки, на конец и начало каждой микрокампании).

Начиная с 1999 г., с завода изготовителя ТВС стали поступать точные данные о содержании U-235 в обедненном уране ТВС БЗВ и ТЭ ТВС АЗ, а также было ими же подтверждено, что до этого периода содержание последнего было 0,295%, а не 0,48% как было утверждено и заложено в исходные данные для расчетов.

Предварительными расчетами было показано, что неопределенность данных по содержанию используемого в ТВС боковой зоны воспроизводства обедненного урана и в ТЭ ТВС активной зоны может существенным образом повлиять на интегральные характеристики реактора.

Таким образом, с целью повышения безопасности эксплуатации реактора БН-600, для улучшения качества предсказаний характеристик реактора, для создания банка данных, по всем элементам активной зоны реактора, а также с целью более точного учета в расчетах изотопного состава было принято решение о проведении перерасчета всех микрокампаний реактора комплексом программ ГЕФЕСТ. Также данная работа позволит оценить накопленный флюенс и дозу на элементы конструкции реактора, что, в свою очередь, необходимо для проведения работ по продлению ресурса оборудования энергоблока.

Большую часть отсутствующих исходных данных занесено на ПК вручную (из технических решений на перегрузку, паспортов и чертежей ТВС и СУЗ).

Для проведения данной работы были разработаны и рассчитаны:

- новый регламент расчетов ГЕФЕСТ;
- расчетные модели ТВС, СУЗ, гильз СУЗ, ФНИ и ПИ;
- постоянные концентрации – на ТВС, СУЗ, гильзы СУЗ, ФНИ и ПИ.

Были внесены изменения в изотопный состав «свежих» ТВС (заменено количество U-235 в ТВС БЗВ и ТЭ ТВС АЗ с 0,48 на 0,295% у всех ТВС до 1999 г. поступления, т.е. по 38 за микрокампанию).

При расчетах пересчет плотности нейтронного потока, а также вычисление текущих запасов реактивности проводились примерно через каждые 30 сут. Для начала каждой микрокампании пересчитывались 26-групповые спектры.

Результатом расчетов стал банк данных сборок реактора, который содержит:

- расчетные модели и постоянные концентрации на все элементы активной зоны;
- $k_{эфф.}$ , запасы и темп потери реактивности, на каждые 30 эфф.сут;
- файлы и архивы ГЕФЕСТ, где хранятся значения почти 1500 функционалов по каждой сборке, на начало и конец каждой мкк.

Анализ изменения  $k_{эфф.}$  показал:

- изменения  $k_{эфф.кр.}$  не связаны с изменением загрузки реактора, как-то: наличие ТВС с плутонием, дополнительным ФНИ и изменением их мест, наличием ЭОУ, что говорит о корректном учете в комплексе программ ГЕФЕСТ всех изменений загрузки;
- максимальные погрешности определения  $k_{эфф.}$  проявляются на начальных положениях СУЗ, что связано с тем, что нижний срез поглотителя (в этих состояниях) проходит через область максимальных градиентов поля нейтронов в активной зоне реактора;
- большой разброс значений  $k_{эфф.}$  в первых микрокампаниях связан с тем, что в физрасчете применялись граничные условия для активной зоны 01М1, а в первых микрокампаниях загрузка по реактору была неоднородной, особенно в первую мкк (в ВРХ находилось всего три ТВС, а остальное – это ПИ, в активной зоне было установлено 13 ПКР и один ПИ).

В результате расчетов установлено следующее:  $k_{эфф.кр.}$  и  $q_p$  (темп потери реактивности) падал с каждым переходом на новую АЗ (см. табл.1).

Таблица 1

**Изменения  $k_{эфф.}$  и  $q_p$  для всех активных зон реактора БН-600**

Параметр	Активная зона реактора БН-600		
	01	01М	01М1
Средний $k_{эфф.кр.}$	1,0064	1,0035	1,0018
Средний $q_p$	0,000237	0,000173	0,000164

Анализируя отклонения расчетов эффективностей рабочих органов СУЗ от эксперимента, можно указать на систематическое значительное превышение расчетных данных над экспериментальными для стержней КС из их внешнего кольца, находящихся ближе других к блоку ионизационных камер (БИК) (стержни № 7, 8, 17, 18). Это указывает на возможные погрешности в процессе обработки экспериментальных данных, а именно, при учете пространственного эффекта, приводящем к занижению экспериментальных данных для указанных стержней СУЗ. Кроме этой экспериментальной погрешности, расчетные оценки весов стержней СУЗ несут и расчетную погрешность, связанную с недостаточной детализацией модели стержня (в топливном архиве ТВС сегодня хранится лишь среднее выгорание по длине стержня) и использованием диффузионного приближения. Для снижения отмеченной выше экспериментальной погрешности возможно проведение нестационарных расчетов с переопределением коэффициентов пересчета, учитывающих пространственное распределение стержней СУЗ по реактору.

Таким образом, при использовании комплекса ГЕФЕСТ существует возможность корректировки методики обработки экспериментальных данных по определению эффективности рабочих органов СУЗ со снижением экспериментальной погрешности.

За период с 1 по 46 мкк было произведено две модернизации активной зоны реактора БН-600, что, соответственно было отражено в исходных данных комплекса (см. табл. 2). Переход с активной зоны 01 на активную зону 01М (в комплексе программ ГЕФЕСТ) был проведен в начале 19 мкк, а на активную зону 01М1 – в начале 26 мкк.

Начиная с 47 микрокампании начался переход на новую активную зону 01М2. Основная идея, лежащая в данной модернизации состоит в том, чтобы не меняя конструкцию ТВС активной зоны второй модернизации, увеличить их ресурс и соответственно добиться значительного экономического эффекта за счет повышения выгорания топлива и коэффициента использования установленной мощности. По проекту на данную активную зону, величина максимального выгорания будет составлять 11,1% т.а., что достигается увеличением времени облучения ТВС (с 480 до 560 эфф. сут).

Таблица 2

**Высотное распределение изотопного состава штатных ТВС АЗ**

Активная зона 01				Активная зона 01М				Активная зона 01М1			
№ слоя	Высота слоя, см	Содержание		Высота слоя, см	Содержание		Высота слоя, см	Содержание			
18 – верх сборки	10,167	Уран обедн.	ВТЭ	10,167	Уран обедн.	ВТЭ	10,167	Уран обедн.	ВТЭ		
17	10,167	Уран обедн.		10,167	Уран обедн.		10,167	Уран обедн.			
16	10,167	Уран обедн.		10,167	Уран обедн.		10,167	Уран обедн.			
15	6,5	Уран обедн.		6,5	Уран обог.		9,5	Уран обог.			
14	9,5	Уран обог.	АЧ	9,5	Уран обог.	АЧ	9,5	Уран обог.	АЧ		
13	9,5	Уран обог.		9,5	Уран обог.		9,5	Уран обог.			
12	9,5	Уран обог.		9,5	Уран обог.		9,5	Уран обог.			
11	9,5	Уран обог.		9,5	Уран обог.		9,5	Уран обог.			
10	9,5	Уран обог.		9,5	Уран обог.		9,5	Уран обог.			
9	9,5	Уран обог.		9,5	Уран обог.		9,5	Уран обог.			
8	9,5	Уран обог.		9,5	Уран обог.		9,5	Уран обог.			
7	9,5	Уран обог.	НТЭ	9,5	Уран обог.	НТЭ	9,5	Уран обог.	НТЭ		
6	9,5	Уран обедн.		9,5	Уран обог.		9,5	Уран обог.			
5	9,5	Уран обедн.		9,5	Уран обог.		9,5	Уран обог.			
4	9,5	Уран обедн.		9,5	Уран обедн.		8,75	Уран обедн.			
3	9,5	Уран обедн.	НТЭ	9,5	Уран обедн.	НТЭ	8,75	Уран обедн.	НТЭ		
2	9,5	Металл		9,5	Уран обедн.		8,75	Уран обедн.			
1 – низ сборки	9,5	Металл		9,5	Уран обедн.		8,75	Уран обедн.			

За время расчетов было проверено влияние состава стали, потоков и спектров на величину расчетной максимальной повреждающей дозы. Для проведения данного анализа был проведен ряд расчетов для одной из микрокампаний реактора, и было получено следующее:

**1. Состав стали элементов активной зоны.** Так, применение чехловой стали ЭП450 вместо стали, которая сейчас используется в расчетах комплекса программ ГЕФЕСТ, уменьшает максимальную повреждающую дозу на 4%, а применение оболочечной стали ЭП172, наоборот, увеличивает ее на 1%.

**2. Используемый 2-групповой поток.** В настоящее время в комплексе программ ГЕФЕСТ для расчета максимальной повреждающей дозы используется 2-групповой поток на конец микрокампании, более правильным было бы использование 2-группового потока на середину микрокампании, что привело бы к следующему:

- в ЗМО повреждающая доза увеличится в среднем до 0,5%;
- в ЗСО повреждающая доза увеличится в среднем до 0,5%;
- в ЗБО повреждающая доза увеличится в среднем до 0,8%;
- в 1-ом ряду ВБЗВ повреждающая доза практически не изменится;
- во 2-ом ряду ВБЗВ повреждающая доза уменьшится в среднем на 1%;
- в 1-ом ряду НБЗВ повреждающая доза уменьшится в среднем на 2%;
- во 2-ом ряду НБЗВ повреждающая доза уменьшится в среднем на 2%;
- в 3-м ряду НБЗВ повреждающая доза уменьшится в среднем на 2,4%.

**3. Изменение максимальной повреждающей дозы по высоте реактора.** В комплексе программ ГЕФЕСТ расчет максимальной повреждающей дозы учитывает высотное распределение повреждающей дозы (т.е. когда максимум повреждающей дозы ТВС в разных микрокампаниях находился в разных расчетных слоях), что приводит в отдельных ТВС к уменьшению (если не учитывать данный эффект) максимальной повреждающей дозы до 0,5%.

**4. Групповые сечения смещения для 26-группового разбиения.** В комплексе ГЕФЕСТ эти сечения взяты на основе работы [2], там же указывается, что использование данных сечений для расчета повреждающей дозы, для нержавеющей стали Х18Н8, приблизительно на 10% меньше по сравнению с вычисленными на основании рекомендованных [3].

**5. Используемые 26-групповые спектры нейтронов.** На основе проведенного расчета, указанного выше, вытекает, что изменение 26-групповых спектров даже в пределах одной микрокампании дает изменение максимальной повреждающей дозы от 1,25 до -0,8%, в зависимости от местоположения конкретного элемента активной зоны.

Необходимо также указать на то, что в комплексе программ ГЕФЕСТ при расчете максимальной повреждающей дозы для СУЗ и гильз СУЗ, не учитывается конкретный состав стали данных элементов активной зоны, а берутся одинаковые постоянные концентрации для всех этих элементов. Для более правильного расчета максимальной повреждающей дозы (учитывающего конкретный состав сталей) для СУЗ и гильз СУЗ необходима модернизация комплекса ГЕФЕСТ его разработчиком.

Таким образом, основным результатом расчетов всех мкк реактора является получение информации о локальных характеристиках реактора, используемой в обоснование безопасной эксплуатации реактора.

В настоящее время комплекс программ ГЕФЕСТ эксплуатируется на РС PENTIUM-III, что позволило сократить расчетное время одной микрокампании (по сравнению с первой версией комплекса) в сотни раз.

В будущем планируется увеличение в несколько раз количества расчетных точек модели комплекса, проведение всех расчетов в 26-групповом приближении и увеличение топливного архива ТВС (для учета трансуранов по всей высоте ТВС).

Проведенная работа показала предсказуемость поведения реактора БН-600, что очень важно для безопасной его эксплуатации.

**Литература**

1. Расчеты физические модернизированной активной зоны первого типа загрузки. п/я А-7755, 1984.
2. Авраменко В.И., Конобеев Ю.В., Строкова А.М.//Атомная энергия. – 1984. – Т. 56. – Вып. 3. – С. 139.
3. Быков В.Н., Конобеев Ю.В.//Атомная энергия. – 1977. – Т. 43. – Вып. 1. – С. 20.
4. Селезнев Е.Ф. Некритичность критического реактора//ВАНТ. Сер. Физика и техника ядерных реакторов. – Вып. 1. – 1999. – С. 60-66.

Поступила в редакцию 14.02.2005

**УДК 621.039.526**

*Evaluation of the Radiation Risks Related to the Beloyarsk NPP BN600 Power Unit Operation on General Public* | I.I. Koltik, N.N. Oshkanov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2005. – 4 pages, 3 tables, 1 illustration. – References, 9 titles.

The basic criterion used to evaluate the radiological danger related to an NPP operation is general public exposure to radiation. The article presents the results of the analysis of the annual doses taken by general public for the period of the BN600 unit operation. The data on the individual and collective doses received by the critical groups of general public due to the atmospheric and liquid discharges from the BN600 power unit are given. The data on the standardized collective doses for other reactor types are presented. The results of the calculation of the individual and collective risks on general public show that the risks for the fast reactors are lower by about two orders than the risk for the graphite-moderated water-cooled reactors and PWR's and beyond an absolutely acceptable risk of  $1 \cdot 10^{-6} \text{ yr}^{-1}$ .

**УДК 621.039.526**

*Justification of the Tritium Radiation Safety of the Beloyarsk NPP BN600 Power Unit Personnel* | N.N. Oshkanov, M.V. Bakanov, E.M. Rafikov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2005. – 5 pages, 5 tables. – References, 6 titles.

On the basis of the conducted measurements of the volume tritium concentration in Beloyarsk NPP BN600 power unit room air the personnel tritium radiation safety has been justified. The method of the personnel dose calculation is presented.

**УДК 621.039.526**

*Assessment of the Partial Errors of the Beloyarsk NPP BN600 Reactor Relative Power Measurements* | M.V. Bakanov, V.A. Zhyoltyshev, V.V. Maltsev, V.F. Roslyakov, A.L. Kochetkov, Yu.S. Khomyakov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2005. – 9 pages, 3 tables, 3 illustrations. – References, 3 titles.

In this article the composite and partial errors of the Beloyarsk NPP BN600 reactor relative power measurements are considered and justified.

**УДК 621.039.526**

*Assessment of the Minimum Possible Worth of the BN600 Reactor Control Rods* | M.V. Bakanov, V.A. Zhyoltyshev, A.A. Lyzhin, V.V. Maltsev, V.F. Roslyakov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2005. – 7 pages, 2 illustrations. – References, 6 titles.

In this article the estimates of the minimum possible worth of the BN600 reactor control rods are reported and the criteria of the ultimate condition of the control rods as well as the indications of the achievement of the ultimate condition in terms of physical worth are considered and justified.

**УДК 621.059.526**

*Computational Support to the BN600 Reactor Operation* | V.V. Maltsev, V.F. Roslyakov, Kh.F. Gizzatulin; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2005. – 6 pages, 2 tables. – References, 4 titles.

The article presents the main features of the core modifications implemented during the BN600 reactor operation. The neutron physics calculations of the BN600 reactor using the software packages named Uran and Hephaestus are analyzed. The effect of the BN600 reactor calculation method using the Hephaestus software package on the results of the calculation of the fuel characteristics has been evaluated.

**УДК 621.039.526**

*The Influence of Change of the BN-600 Core Composition on Value of Sodium Void Reactivity Effect* | E.V. Balahnin, A.M. Tuchkov, I.A. Chernov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2005. – 4 pages, 4 tables. – References, 7 titles.

The influence of change of the BN-600 core composition on value of Sodium Void Reactivity Effect (SVRE) is presented in this article. The procedure of the design models preparation and calculation results of the SVRE for different of the BN-600 core composition's are presented.

**УДК 621.039.526**

*Research into BN600 Reactor Irradiated Fuel Decay Heat Released in the Irradiated Fuel Cooling Pond* | A.I. Karpenko, E.L. Rozenbaum, V.P. Zabegaev; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2005. – 8 pages, 1 table, 5 illustrations.