

ОЦЕНКА МИНИМАЛЬНО ВОЗМОЖНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТЕРЖНЕЙ СУЗ РЕАКТОРА БН-600

**М.В. Баканов*, В.А. Желтышев*, А.А. Лыжин*, В.В. Мальцев*,
В.Ф. Росляков*, М.Р. Фарахшин****

**Белоярская АЭС, г. Заречный,*

*** ГУП ОКБМ им. И.И. Африкантова, г. Нижний Новгород*



В настоящее время на реакторе БН-600 осуществляется поэтапная замена существующих стержней СУЗ с назначенным ресурсом 365 эфф.сут модернизированными стержнями с назначенным ресурсом 560 эфф. сут. Модернизированные стержни СУЗ по сравнению с существующими имеют конструктивные отличия, приводящие к отличию физической эффективности. В статье приведены оценки минимально возможной эффективности модернизированных стержней СУЗ.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время на реакторе БН-600 осуществляется поэтапная замена стержней СУЗ (АЗ тип 1663.00.000, АЗ-П тип 1663.00.000-01, РС тип 1157А.00.000, КС тип 1161В.00.000, далее – существующие стержни СУЗ) модернизированными стержнями СУЗ с назначенным ресурсом 560 эфф.сут (АЗ тип 2637.00.000, АЗ-П тип 2633.00.000, РС тип 2631.00.000, КС тип 2635.00.000, далее – модернизированные стержни СУЗ, если речь идет о какой-либо присущей только этому типу стержней особенности, или стержни СУЗ).

Модернизированные стержни СУЗ по сравнению с существующими стержнями СУЗ характеризуются следующими, приводящими к отличию эффективностей, основными особенностями:

- в стержне КС увеличена масса и высота карбида бора;
- в стержне АЗ увеличена масса и высота карбида бора;
- в стержне АЗ-П уменьшена масса карбида бора;
- в стержнях РС заменен поглотитель – окись европия на карбид бора с естественным содержанием изотопа бора-10.

Модернизированные стержни СУЗ реактора БН-600 будут эксплуатироваться в активной зоне 01М2, нейтронно-физические характеристики которой отличаются от нейтронно-физических характеристик активной зоны 01М1.

В статье проведен анализ эффективности существующих стержней СУЗ, обоснована возможность переноса выводов, полученных при анализе эффективности существующих стержней СУЗ, на эффективность модернизированных стержней СУЗ и разработаны критерии предельного состояния модернизированных стержней СУЗ с точки зрения физической эффективности.

© М.В. Баканов, В.А. Желтышев, А.А. Лыжин, В.В. Мальцев, В.Ф. Росляков,
М.Р. Фарахшин, 2005

КРИТЕРИИ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ СТЕРЖНЕЙ СУЗ РЕАКТОРА БН-600

В соответствии с ГОСТ [1] под предельным состоянием объекта понимается такое состояние, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима, а критерии предельного состояния объекта устанавливаются нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной документацией). Критериев предельного состояния объекта может быть несколько.

1. В материалах технического проекта в качестве критерия предельного состояния модернизированных стержней СУЗ принято значение снижения эффективности одиночных стержней СУЗ. Причем снижение эффективности одиночных стержней СУЗ может быть вызвано как уменьшением количества изотопа бора-10 за счет его выгорания, так и аварийным состоянием стержней СУЗ за счет потери поглотителя после разрушения оболочки пэл.

2. В соответствии с Правилами ПБЯ [2] подкритичность активной зоны реактора в любой момент кампании после взвода рабочих органов аварийной защиты в рабочее положение с введенными в активную зону остальными органами СУЗ должна быть не менее $1\% dk/k$ в состоянии активной зоны с максимальным эффективным коэффициентом размножения. Таким образом, для второй системы стержней КС1-18,Ц+РС1,2 в качестве критерия предельного состояния может быть выбран критерий обеспечения подкритичности активной зоны в $1\% dk/k$ при взведенных стержнях АЗ в состоянии активной зоны с максимальным эффективным коэффициентом размножения, т.е. минимально допустимое значение эффективности системы стержней КС1-18,Ц+РС1,2 на начало МК.

В соответствии с Правилами ПБЯ [2] стержни АЗ (без одного наиболее эффективного органа) должны обладать эффективностью, достаточной для перевода активной зоны реактора в подкритическое состояние и поддержания ее в подкритическом состоянии при нарушениях нормальной эксплуатации и проектных авариях. В качестве проектной аварии принимается «самоход» стержня РС. Таким образом, для системы стержней АЗ1-5,П в качестве критерия предельного состояния может быть выбрано требование о недопустимости снижения эффективности системы стержней АЗ1-5,П (без одного наиболее эффективного органа) менее значения, равного сумме величин температурного, мощностного, непуниевго эффекта реактивности и эффективности стержня РС.

3. Требование минимально допустимого значения эффективности одиночных стержней СУЗ вытекает из особенностей технологии реактора БН-600 и функций, выполняемых отдельными стержнями СУЗ.

При сбросе в активную зону стержня АЗ-П во время отключения теплоотводящей петли эффективность стержня АЗ-П должна быть достаточной для снижения мощности реактора на $1/3$ от исходной. Это требование и должно быть выбрано в качестве критерия предельного состояния стержня АЗ-П.

Стержни РС при работе реактора дают вклад (п. 2) в обеспечение необходимой эффективности второй системы стержней КС1-18,Ц+РС1,2, участвуют в перекомпенсации стержней КС1-18,Ц, производят компенсацию введенной стержнем АЗ-П отрицательной реактивности при отключении теплоотводящей петли. Поэтому величина минимально-допустимой эффективности стержней РС зависит от условия обеспечения нормальной эксплуатации реактора БН-600 в указанных режимах эксплуатации стержней РС.

4. В начале эксплуатации стержней (при нулевой наработке) эффективность систем стержней СУЗ значительно выше, чем минимально допустимое значение эффективности систем стержней СУЗ.

Для удобства эксплуатации в качестве признака, при котором достигаются критерии предельного состояния – минимально допустимые значения эффективности систем стержней СУЗ, может быть принята средняя наработка стержнями СУЗ эфф.сут.

5. Таким образом, в качестве критериев предельного состояния модернизированных стержней СУЗ с точки зрения эффективности следует принять следующие параметры:

- снижение эффективности одиночных стержней СУЗ;
- минимально допустимое значение эффективности системы стержней КС1-18,Ц+РС1,2;
- минимально допустимое значение эффективности систем стержней АЗ1-5,П без одного наиболее эффективного органа;
- минимально допустимое значение эффективности стержня АЗ-П;
- минимально допустимое значение эффективности стержня РС.

В качестве признаков, при которых достигаются критерии предельного состояния – минимально допустимые значения эффективности систем стержней СУЗ, следует принять следующие параметры:

- максимально допустимое значение средней наработки стержней КС1-18,Ц;
- максимально допустимое значение средней наработки стержней АЗ1-5,П.

ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ И ПРИЗНАКОВ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ

Снижение эффективности одиночных стержней СУЗ

В материалах технического проекта в качестве критерия предельного состояния модернизированных стержней СУЗ принято значение снижения эффективности одиночных стержней АЗ на 10%, РС на 36%, АЗ-П на 10%, КС на 36%. Снижение эффективности одиночных стержней СУЗ может быть вызвано как уменьшением количества изотопа бора-10 за счет его выгорания, так и аварийным состоянием стержней СУЗ за счет потери поглотителя после разрушения оболочки пэл.

Минимально допустимое значение эффективности систем модернизированных стержней СУЗ

Минимально допустимое значение эффективности второй системы модернизированных стержней КС1-18,Ц+РС1,2

Для активной зоны О1М2 номинальный расчетный запас реактивности в «холодном» состоянии в соответствии с проектом [3] составляет 4.38% dk/k . Расчетное значение эффективности системы модернизированных стержней КС1-18,Ц+РС1,2 составляет 6.40% dk/k . Таким образом, эффективность системы модернизированных стержней КС1-18,Ц+РС1,2 достаточна для обеспечения подкритичности активной зоны в 1% dk/k на начало МК при взведенных стержнях АЗ.

Из опыта эксплуатации активной зоны О1М1 известно, что среднее значение темпа потери реактивности за счет выгорания топлива в период с 32–1 МК по 47 МК составляет 0,0149% $dk/k/эфф.сут$. Соответственно значение запаса реактивности, необходимое для обеспечения наработки 160 эфф.сут, составляет 2.56% dk/k .

Среднее изменение запаса реактивности при переходе из «холодного» состояния в «горячее» в начале МК (в период с 32–1 МК по 47 МК) составляет 1.20% dk/k . Соответственно для обеспечения подкритичности 1.00% dk/k в «холодном» состоянии при взведенных стержнях АЗ эффективность системы модернизированных стержней КС1-18,Ц+РС1,2 должна быть не менее 4.76% dk/k .

Погрешность эффекта реактивности за счет выгорания топлива в период с 32–1 МК по 47 МК составляет 0.19% dk/k , погрешность изменения запаса реактивности при

переходе из «холодного» состояния в «горячее» в начале МК – 0.07% dk/k . Погрешность определения эффективности системы стержней КС1-18,Ц+РС1,2 в соответствии с отчетом [4] составляет 0.22% dk/k . С учетом указанных погрешностей суммарная погрешность составляет 0.30% dk/k .

Таким образом, критерий предельного состояния – минимально допустимое значение эффективности системы стержней КС1-18,Ц+РС1,2 составляет 5.06% dk/k .

Минимально допустимое значение эффективности системы стержней АЗ1-5,П

Эксплуатационный предел величины эффективности органов аварийной защиты без одного наиболее эффективного органа в соответствии с техническим обоснованием безопасности составляет 2.3 $\beta_{эфф}$ или 1.61% dk/k .

Погрешность определения эффективности системы стержней АЗ1-5,П без одного наиболее эффективного органа в соответствии с дополнением к отчету [5] составляет 0.34% dk/k . Итак, критерий предельного состояния – минимально допустимое значение эффективности системы стержней АЗ1-5,П без одного наиболее эффективного органа составляет 1.95% dk/k .

Минимально допустимое значение эффективности одиночных стержней СУЗ

Минимально допустимое значение эффективности стержня АЗ-П

При отключении петли циркуляции избыточную реактивность, внесенную стержнем АЗ-П при сбросе в активную зону, компенсируют стержни РС1,2, перемещаясь из активной зоны. Избыточная реактивность, компенсируемая стержнями РС1,2, равна

$$\rho_{РС} = \rho_{АЗ-П} - \rho_{МЭР} - \rho_{ТЭР}, \quad (1)$$

где $\rho_{РС}$ – реактивность, компенсируемая стержнями РС-1,2, % dk/k ; $\rho_{АЗ-П}$ – эффективность стержня АЗ-П, % dk/k ; $\rho_{МЭР}$ – средний мощностной эффект реактивности, реализующийся при снижении мощности реактора в диапазоне от 100% $N_{ном}$ до 67% $N_{ном}$, равный 0.118% dk/k ; $\rho_{ТЭР}$ – температурный эффект реактивности, реализующийся при отключении петли циркуляции и равный минус 0.008% dk/k .

Из формулы (1) следует, что минимально допустимое значение эффективности стержня АЗ-П следует признать таким, при котором происходит компенсация введенной стержнем АЗ-П отрицательной реактивности мощностным и температурным эффектами реактивности. Стержни РС1,2 при этом не перемещаются (рассматривается ситуация сразу после перекомпенсации, когда стержни РС1,2 находятся в положении приблизительно 300 мм по УП), т.е. введенная стержнем АЗ-П отрицательная реактивность полностью компенсируется мощностным и температурным эффектами реактивности.

В соответствии с формулой (1) минимально допустимое значение эффективности модернизированного стержня АЗ-П составляет 0.110% dk/k , а с учетом погрешностей определения составляющих в формуле (1) – 0.137% dk/k .

Минимально допустимое значение эффективности модернизированного стержня РС

Стержни РС при работе реактора дают вклад в обеспечение необходимой эффективности второй системы стержней КС1-18,Ц+РС1,2, участвуют в перекомпенсации стержней КС1-18,Ц, производят компенсацию введенной стержнем АЗ-П отрицательной реактивности при отключении теплоотводящей петли. Поэтому величина минимально допустимой эффективности стержней РС зависит от условия обеспечения нормальной эксплуатации реактора БН-600 в указанных режимах эксплуатации стержней РС.

Вклад эффективности стержней РС в суммарную эффективность системы стержней КС1-18,Ц+РС1,2 незначителен. Для обеспечения необходимой эффективности системы стержней КС1-18,Ц+РС1,2 можно не накладывать ограничения на эффективность стержней РС1,2, т.к. всегда необходимую эффективность системы стержней КС1-18,Ц+РС1,2 можно обеспечить за счет эффективности системы стержней КС1-18,Ц.

Минимальная эффективность модернизированного стержня РС по опыту эксплуатации составит 0.086% dk/k . Такая эффективность реализуется при загрузке в стержень минимально возможной в соответствии с ТУ массы бора-10 и установке стержня в ячейку реактора с минимальной плотностью нейтронного потока. При такой эффективности стержня РС увеличивается число перекомпенсаций стержней КС, но нормальная эксплуатация в режиме перекомпенсации стержней КС обеспечивается – как минимум девять стержней КС могут быть перемещены в активной зоне на 10 мм по УП.

Анализ возможности стержней РС1,2 с эффективностью 0.086% dk/k каждый, обеспечить нормальную эксплуатацию реактора в режиме отключения теплоотводящей петли проведен для эффективности стержня АЗ-П, равной 0.190% dk/k . Эффективность стержня АЗ-П, равная 0.190% dk/k , получена для максимальной согласно ТУ загрузки бора-10 в стержень (0.334 кг) и опыта эксплуатации стержня АЗ-П в 1990 – 1992 гг. При разработке дополнения к проекту на модернизированные стержни СУЗ в ТУ на стержень АЗ-П было внесено изменение и максимально возможная загрузка бора-10 в настоящее время составляет 0.375 кг. При такой загрузке бора-10 и максимальной плотности потока нейтронов в ячейке стержня АЗ-П эффективность стержня АЗ-П составит 0.207% dk/k . При этой эффективности стержня АЗ-П нормальная эксплуатация реактора во время отключения теплоотводящей петли обеспечивается, если эффективность каждого стержня РС составит 0.095% dk/k .

Таким образом, минимально допустимая эффективность стержня РС должна быть принята равной 0.095% dk/k . Необходимо отметить, что данная величина получена из консервативной оценки для случая, когда совпадают «неблагоприятные» факторы изготовления и эксплуатации стержней АЗ-П и РС1,2.

Максимально допустимое значение средней наработки стержней

Максимально допустимое значение средней наработки стержней КС1-18,Ц

Из минимально допустимой эффективности системы стержней КС1-18,Ц+РС1,2 и минимально допустимой эффективности стержней РС следует, что минимально допустимая эффективность системы КС1-18,Ц составляет 4.87% dk/k . Для оценки времени снижения эффективности системы модернизированных стержней КС1-18,Ц до указанного значения воспользуемся опытом измерений эффективности системы существующих стержней КС1-18,Ц. Опыт измерений показывает, что зависимость эффективности системы существующих стержней КС1-18,Ц от средней наработки стержнями КС1-18,Ц эфф.сут определяется формулой, приведенной на рис. 1.

В начале 48 МК были измерены эффективности существующих и модернизированных стержней КС, имеющих «нулевую» наработку. Результаты измерений показывают, что эффективность модернизированных стержней КС больше эффективности существующих стержней КС на 0.9%. Эти отличия приведены для средних согласно ТУ на стержни значений загрузки бора-10 в стержни КС. Из вида зависимости (рис. 1) и отличия эффективности (0.9%) следует, что эффективность системы модернизированных стержней КС1-18,Ц, равная 4.87% dk/k , будет достигнута при средней наработке модернизированными стержнями КС1-18,Ц 589 эфф.сут, а с учетом погрешности – 496 эфф.сут.

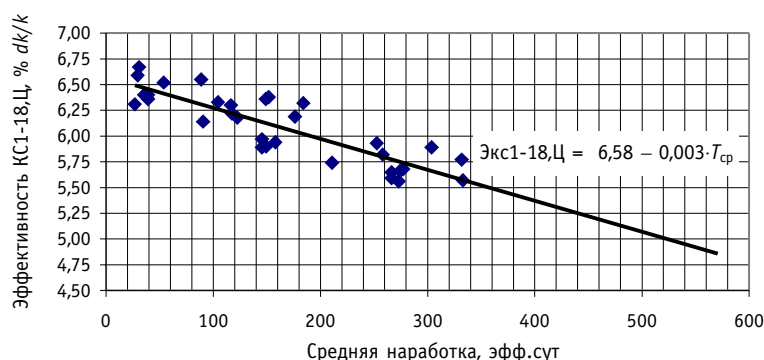


Рис. 1. Зависимость эффективности системы существующих стержней КС1-18,Ц от средней наработки стержнями КС1-18,Ц (эфф.сут)

При проектном запасе реактивности для активной зоны О1М2 в «холодном» состоянии на начало кампании 4.38% dk/k [3] для обеспечения подкритичности 1% dk/k при взведенных стержнях А31-5,П с учетом вышеобоснованных погрешностей минимально допустимая эффективность системы модернизированных стержней КС должна составлять 5.49% dk/k , а максимально допустимая наработка – 383 эфф.сут.

Максимально допустимое значение средней наработки стержней А31-5,П

В отчете [6] проведен подробный анализ эффективности 135 существующих стержней АЗ, отработавших в реакторе в период с 22 по 40 МК. Анализ показал, что зависимость приведенной эффективности от наработки стержнями АЗ эфф.сут определяется формулой, приведенной на рис. 2.

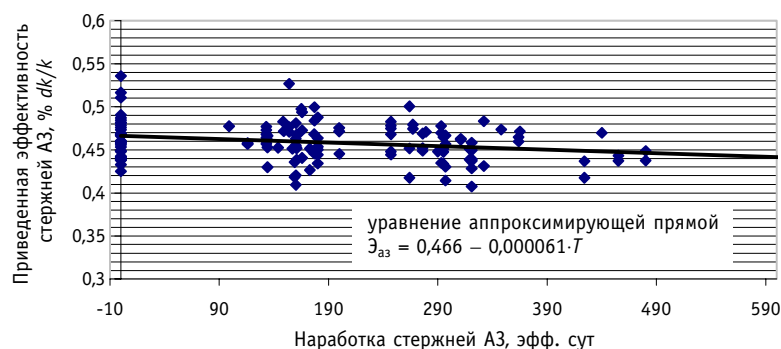


Рис. 2. Зависимость приведенной эффективности стержней АЗ от наработки стержнями АЗ (эфф. сут)

С учетом погрешности снижение эффективности стержня АЗ за счет выгорания поглотителя составляет не более 0.000064% dk/k за 1 эфф.сут, а для всех стержней системы А31-5,П – не более 0.00038% dk/k за 1 эфф.сут.

В дополнении к отчету [5] показано, что среднее значение эффективности А31-5,П без одного наиболее эффективного органа составляет 2.40% dk/k . Соответственно наработка, при которой происходит снижение эффективности рабочих органов АЗ без одного наиболее эффективного органа с 2.40 до 1.95% dk/k , составит 1184 эфф.сут.

Таким образом, с учетом погрешности максимально допустимое значение средней наработки модернизированными стержнями АЗ составляет 1184 эфф.сут.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В активной зоне О1М2 интегральная плотность нейтронного потока будет больше, чем в активной зоне О1М1. В связи с этим выгорание поглотителя бора-10 в стержнях КС и РС будет больше. С другой стороны, меньшее значение запаса реактивности в активной зоне О1М2 приведет к более «высокому» начальному положению стержней КС в активной зоне и соответственно к меньшему выгоранию поглотителя бора-10 в них. Указанные изменения в эксплуатации модернизированных стержней не приведут к существенным изменениям разработанных критериев и признаков, но, тем не менее, по мере накопления опыта эксплуатации модернизированных стержней СУЗ, их критерии предельного состояния и признаки должны быть уточнены.

Литература

1. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.
2. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций ПБЯ РУ АС-89.
3. Зона активная О1М2. Расчет физический. РНАТ.501341.022 РР. Инв. № 841648. – Нижний Новгород: ГУП ОКБМ, 2003.
4. Отчет «Анализ погрешностей определения нейтронно-физических характеристик реактора БН-600». – ОЯБиН Белоярская АЭС, ФЭИ, 1997.
5. Дополнение к отчету «Анализ погрешностей определения нейтронно-физических характеристик реактора БН-600». – ОЯБиН Белоярская АЭС, ФГУП ГНЦ РФ-ФЭИ, 2004.
6. Отчет «Влияние длительности облучения рабочих органов аварийной защиты реактора БН-600 на их эффективность». № 38-3/4-187 от 27.03.2001. – ОЯБиН Белоярская АЭС.

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. Gizzatuln; 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.