

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ЭКОНОМИЧНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА В РЕАКТОРЕ БН-600 БЕЛОЯРСКОЙ АЭС

**Г.Б. Бабенко, А.В. Гаврилов, В.А. Желтышев, В.В. Мальцев,  
В.Ф. Росляков**  
*Белоярская АЭС, г. Заречный*



Повышение технико-экономических показателей реактора БН-600, в первую очередь, непосредственно связано с повышением эффективности и экономичности использования ядерного топлива. Начиная с физпуска в 1980 г., по 2003 г. были проведены две модернизации (активные зоны 01М, 01М1). Переход на активную зону 01М2 с четырехкратной схемой перегрузок ТВС и ресурсом ТВС в 560 эфф.сут начался с 2004 г. В статье приведены основные нейтронно-физические характеристики активных зон реактора БН-600.

### МОДЕРНИЗАЦИИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ

В течение 25-летнего периода промышленной эксплуатации реактора БН-600 Белоярской АЭС постоянно ведутся работы по повышению технико-экономических показателей реакторной установки.

С 1980 по 1986 гг. реактор БН-600 работал с активной зоной первого типа загрузки (01) при максимальном выгорании топлива 5,1% т.а. в ТВС зоны малого обогащения (ЗМО) и 7,2% т.а. в ТВС зоны большого обогащения (ЗБО). Высота активной части ТВС составляла 750 мм. Длительность микрокампании составляла 100 эфф.сут, ресурс ТВС ЗМО составлял 200 эфф.сут, ТВС ЗБО – 300 эфф.сут. В качестве конструкционных материалов ТВС для активной зоны 01 использовалась аустенитная сталь 08Х16Н11МЗ для чехла ТВС и ЭИ-847 для оболочки твэлов. Опыт эксплуатации активной зоны 01 показал, что основной причиной разгерметизации твэл является повышенная линейная нагрузка на твэл. Поэтому после получения первоначальных экспериментальных результатов по работоспособности чехловых и оболоченных стале́й в реакторе БН-600 было принято решение о разработке проекта активной зоны 01М с уменьшенной линейной нагрузкой на твэл.

В течение 1986–1987 гг. была осуществлена первая модернизация активной зоны (01М) с введением еще одной зоны обогащения – зоны среднего обогащения (ЗСО) – за счет уменьшения количества ТВС в ЗМО и в ЗБО. Высота активной части ТВС составила 1000 мм. Максимальное выгорание топлива в ТВС ЗМО составило 6,5% т.а., в ТВС ЗСО – 6,9% т.а. и в ТВС ЗБО – 8,3% т.а. Длительность микрокампании составила 165 эфф.сут, а ресурс основной части ТВС активной зоны – 330 эфф.сут, периферий-

---

© Г.Б. Бабенко, А.В. Гаврилов, В.А. Желтышев, В.В. Мальцев, В.Ф. Росляков, 2005

ных ТВС ЗБО – 495 эфф.сут. В качестве конструкционных материалов ТВС активной зоны О1М были использованы более радиационно-стойкие (по сравнению с конструкционными материалами ТВС активной зоны О1) стали 08Х16Н11М3Т х.д. для чехла ТВС и ЭИ-847 х.д. – для оболочки твэлов. В течение 1988–1990 гг. реактор БН-600 работал с этой активной зоной. За этот период в течение 23 и 24 микрокампании были проведены испытания ТВС активной зоны на повышенный ресурс. Одновременно в процессе работы активной зоной О1М был начат переход на новые, более радиационно стойкие конструкционные материалы ЭП-450 для чехла ТВС, ЧС-68 х.д. – для оболочки твэлов. Результаты исследований ТВС с этими материалами позволили обосновать повышение максимального выгорания топлива до 10% т.а., а опыт эксплуатации активной зоны О1М – обосновать возможность следующей модернизации.

В течение 1991–1993 гг. был осуществлен перевод активной зоны на использование активной зоны второй модернизации (О1М1). Для достижения выгорания топлива в активной зоне О1М1 до 10% т.а. загрузка топлива в ТВС была увеличена на 4% за счет увеличения высоты активной части с 1000 до 1030 мм и эффективной плотности топлива в твэлах с 8,5 до 8,6 г/см<sup>3</sup>. Максимальное выгорание топлива для активной зоны О1М1 в ТВС ЗМО составило 9,0% т.а., в ТВС ЗСО – 9,5% т.а. и в ТВС ЗБО – 10,0% т.а. Длительность микрокампании составила 160 эфф.сут, а ресурс всех ТВС активной зоны – 480 эфф.сут. В качестве конструкционных материалов ТВС активной зоны О1М1 использовались стали ЭП-450 х.д. для чехла ТВС и ЧС-68 х.д. – для оболочки твэлов. Опыт эксплуатации активной зоны О1М1 в течение 1993–2004 гг. продемонстрировал надежную работу ТВС. За этот период с целью дальнейшего повышения эффективности и экономичности использования ядерного топлива были проведены реакторные испытания ТВС активной зоны О1М1 на повышенный ресурс. В течение 32, 36 и 42 микрокампаний за счет увеличения их длительности наработка эфф.сут для части ТВС активной зоны поэтапно была доведена до 560 эфф.сут. После реакторных исследований этих ТВС подтвердили возможность установления ресурса в 560 эфф.сут для всех ТВС активной зоны О1М1.

Поскольку в настоящее время на Белоярской АЭС в эксплуатации находится только один энергоблок, то для надежного прохождения осенне-зимнего максимума несения нагрузки для реактора БН-600 требуется проведение перегрузки ядерного топлива весной и осенью. Это условие выполнимо при сокращении одной микрокампании со 160 до 120 эфф.сут. При этом будет происходить недовыгорание топлива. Эту проблему можно решить, если перегрузка будет 4-кратной. Соответственно максимальное выгорание топлива достигнет 11,1% т.а., кампания основной части ТВС активной зоны – 560 эфф.сут, периферийных ТВС ЗБО – 730 эфф.сут. Проведенные реакторные испытания ТВС с продленным ресурсом показали реальную возможность разработки и создания активной зоны с выгоранием 11,1% т.а. (О1М2). В настоящее время, начиная с 47 микрокампании, осуществляется перевод реактора БН-600 на активную зону О1М2. Максимальное проектное выгорание топлива для активной зоны О1М2 в ТВС ЗМО составит 9,9% т.а., в ТВС ЗСО – 10,5% т.а. и в ТВС ЗБО – 11,1% т.а. Длительность зимней микрокампании составит 160 эфф.сут, летней микрокампании – 120 эфф.сут, ресурс основной части ТВС активной зоны – 560 эфф.сут, периферийных ТВС ЗБО – 730 эфф.сут. В качестве конструкционных материалов ТВС активной зоны О1М2 будут использоваться стали, что и для ТВС активной зоны О1М1.

## ИТОГИ МОДЕРНИЗАЦИЙ

Свое 25-летие реактор БН-600 встречает в процессе проведения 3-й модернизации активной зоны. После окончания каждой модернизации проводились исследования нейтронно-физических характеристик активных зон для подтверждения основ-

Таблица 1

**Основные характеристики активных зон реактора БН-600**

Характеристика	01	01М	01М1	01М2
1. ТВС ак.з., шт				
ЗМО	215	136	136	136
ЗСО	–	94	94	94
ЗБО	146	139	139	139
КР*	8	–	–	–
2. Об. уран, кг (% об.)				
ЗМО	20,0 (21)	27,6 (17)	28,9 (17)	28,9 (17)
ЗСО	–	27,6 (21)	28,9 (21)	28,9 (21)
ЗБО	20,0 (33)	27,6 (26)	28,9 (26)	28,9 (26)
3. Высота ак.з., мм	750	1000	1030	1030
4. Выг., % т.а.				
ЗМО	5,1	6,5	9,0	9,9
ЗСО	–	6,9	9,5	10,5
ЗБО	7,2	8,3	10,0	11,1
5. Повр. доза., сна				
ЗМО	49,1	53,3	75,0	82,0
ЗСО	–	51,0	72,0	79,0
ЗБО	42,5	54,0	69,0	75,0
6. Кам. ТВС, э.с.				
ЗМО	200	330	480	560
ЗСО	–	330	480	560
ЗБО/ЗБО периферия	300	330/495	480	560/730
7. Конструкционные материалы оболочка твэла чехол ТВС	ЭИ847 08Х16Н11М3	ЭИ847хд 08Х16Н11 МЗТхд	ЧС68хд ЭП450	ЧС68хд ЭП450
8. Высота торцевых экранов, мм				
верхнего	400	300	300	300
нижнего	400	380	350	350
9. Высота газовой полости, мм	800	660	660	660
10. Макс. мощность ТВС, мВт				
ЗМО	4,5	4,3	4,33	4,31
ЗСО	–	4,4	4,54	4,58
ЗБО	4,7	4,5	4,61	4,63
11. Макс. линейная нагрузка, кВт/м				
ЗМО	53	41,6	42,4	41,2
ЗСО	–	43,7	44,3	45,1
ЗБО	54	47,2	47,1	47,5
12. Эфф. плотность топлива, г/см <sup>3</sup>	8,2	8,5	8,6	8,6

КР – компенсаторы реактивности из обедненной двуокиси урана

ных проектных показателей. Исследования подтвердили правильность принятых при разработке активных зон проектных решений и хорошее соответствие расчетных параметров измеренным.

Поэтапное улучшение нейтронно-физических характеристик активной зоны, применение новых конструкционных материалов для изготовления ТВС и твэлов приве-

ли к увеличению в 2005 г. по сравнению с 1980 г. максимального выгорания топлива более чем в 1,5 раза, ресурса ТВС – более чем в 2,5 раза.

### **ПЕРСПЕКТИВЫ**

Дальнейшее повышение эффективности и экономичности использования ядерного топлива в реакторе БН-600 связано с разработкой новых перспективных активных зон и доведением максимальной глубины выгорания топлива в ТВС до 15% т.а. Для осуществления этой задачи потребуются решить ряд научно-технических проблем, основной из которых является разработка новых конструкционных материалов для оболочек твэл. Успешная эксплуатация реактора БН-600 в течение 25 лет и проведенные модернизации активной зоны позволяют надеяться, что в содружестве с другими предприятиями отрасли эта задача будет также успешно решена.

В табл. 1 приведены основные характеристики активных зон, которые прошли испытания в реакторе БН-600.

Поступила в редакцию 14.02.2005

The method has been developed and the facility manufactured to measure irradiated fuel decay heat directly in the irradiated fuel cooling pond. The important advantage is that the facility has been implemented using the standard equipment and the operations of the irradiated fuel permutation are conducted using the standard means and technologies, thereby providing for the design safety of the work fulfilment. For the first time decay heat of numerous irradiated fuel sub-assemblies of various types has been directly measured.

**УДК 621.039.526**

*Improvement of the Efficiency and the Economics of the Fuel Utilization at the Beloyarsk NPP BN600 Reactor* \ G.V. Babenko, A.V. Gavrilov, V.A. Zhyoltyshev, 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. – 4 pages, 1 table.

Better efficiency and cost advantages of the fuel utilization at the BN600 reactor are offered by increasing fuel burn-up step by step and upgrading the core.

**УДК 621.039.526**

*Irradiation of Experimental MOX Fuel in the BN600 Reactor* \ M.V. Bakanov, G.V. Babenko, V.V. Maltsev, V.F. Roslyakov, B.A. Vasiliev, O.V. Mishin, T.A. Klimashina, M.R. Farakshin; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2005. – 5 pages, 3 tables. – References, 3 titles.

The design features of the experimental MOX fuel sub-assemblies, their specific location in the BN600 reactor core, the conditions and the main results of the experimental MOX fuel irradiation in the BN600 reactor are reported.

**УДК 621.039.526**

*The Calculate of Temperature Conditions of the BN-600 Sub-assemblies into Gaseous Medium* \ V.V. Golovin, A.I. Karpenko, A.M. Tuchkov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2005. – 4 pages, 1 table, 2 illustrations.

The possibility of estimated modelling of the heat-up temperature conditions of the BN-600 spent sub-assemblies elements during transportation of them into gaseous medium is showed in article. The estimated modelling of the BN-600 spent sub-assemblies heat-up into gaseous medium with different values residual heat release of the spent sub-assemblies permits to substantiate and optimise the safety procedures of post-irradiation handling with that sub-assemblies.

**УДК 532.552**

*Hydrodynamic Instability in the BN600 Power Unit Steam Generators and its Diagnosis* \ P.P. Govorov, A.A. Kuznetsov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2005. – 4 pages, 2 illustrations.

The article considers the hydrodynamic instability in the once-through steam generators of the BN600 power unit under the transients (startup, shutdown). This process is dangerous because there is a probability of the hydrodynamic instability spread over the entire circuit. This would cause the heating coolant outlet temperature fluctuations and transfer of the temperature perturbations to the primary circuit. Two methods of diagnosing such a process are proposed. On the basis of the covariance analysis method the software which is now under industrial operation has been written for the Beloyarsk NPP data reduction system named Uran.

**УДК 621.039.526**

*Determination of the Allowable Limits of the Steam Superheating Downstream the Evaporators under the Sodium Steam Generator Operating Conditions* \ A.I. Beltyukov, P.P. Govorov, A.I. Karpenko; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2005. – 8 pages, 1 table, 3 illustrations.

The paper summarizes the experimental results of the research into the processes of moisture entrainment from the modular water-sodium steam generator evaporator stages of the BN600 power unit and steam generator operating conditions characterizing by the hydrodynamic instability for various running time accumulated by the evaporator stages. By test the optimum operating ranges of the steam generator operational parameters providing for reliable and safe operation of the steam generator within a given lifetime were determined.

**УДК 532.552**

*Improvement of the BN600 Power Unit Sodium Steam Generator Transients* \ P.P. Govorov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2005. – 5 pages, 3 illustrations. – References, 9 titles.