

## ОБЛУЧЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ТВС С УРАН-ПЛУТОНИЕВЫМ ТОПЛИВОМ В РЕАКТОРЕ БН-600

М.В. Баканов\*, Г.В. Бабенко\*, В.В. Мальцев\*, В.Ф. Росляков\*,  
Б.А. Васильев\*\*, О.В. Мишин\*\*, Т.А. Климашина\*\*,  
М.Р. Фарахшин\*\*

\* Белоярская АЭС, г. Заречный

\*\* ФГУП ОКБМ им.И.А. Африкантова, г. Н. Новгород



В статье приведены конструктивные особенности экспериментальных ТВС (ЭТВС) со смешанным оксидным уран-плутониевым топливом, особенности их размещения в активной зоне реактора БН-600, условия и основные результаты облучения ЭТВС со смешанным оксидным уран-плутониевым топливом в реакторе БН-600.

### ВВЕДЕНИЕ

С целью экспериментального подтверждения работоспособности и отработки технологии смешанного оксидного уран-плутониевого топлива в реакторе БН-600 проводятся испытания экспериментальных ТВС с оксидным топливом на основе низкофонового плутония. Данные испытания необходимы как для обоснования работоспособности гибридной активной зоны реактора БН-600, предназначенной для утилизации оружейного плутония, так и для обоснования загрузки смешанного уран-плутониевого топлива строящегося реактора БН-800.

В настоящее время осуществлено облучение 39 ТВС с таблеточным смешанным уран-плутониевым топливом (СТТ) и 12 ТВС с виброуплотненным смешанным уран-плутониевым топливом (СВУТ). Ниже приведены основные результаты облучения экспериментальных ТВС со смешанным уран-плутониевым топливом в условиях урановой активной зоны реактора БН-600.

### КОНСТРУКЦИЯ ЭТВС

Первые экспериментальные ТВС были разработаны в середине 80-х годов в соответствии с имевшимися к тому времени проектами активных зон реакторов БН-600 и БН-800 со смешанным уран-плутониевым топливом. В этих проектах была принята унифицированная конструкция ТВС на основе твэл с наружным диаметром оболочки 6,6 мм и толщиной стенки 0,4 мм и шестигранного чехла размером «под ключ» 94,5 мм с толщиной стенки 2,5 мм, предназначенная для дистанционной сборки. Основные габаритные и установочные размеры ЭТВС полностью соответствовали штатным ТВС с урановым топливом, конструктивным отличием являлось наличие внутреннего переходника с пластинами для дистанционной сборки пучка твэл и штока для втягивания пучка твэл в чехол. Высота активной части составляла 950 мм, верхняя и ниж-

---

© М.В. Баканов, Г.В. Бабенко, В.В. Мальцев, В.Ф. Росляков, Б.А. Васильев, О.В. Мишин, Т.А. Климашина, М.Р. Фарахшин, 2005

няя торцевые зоны воспроизводства были одинаковой высоты – по 350 мм каждая. Максимальная тепловая нагрузка на твэл в проектах активных зон достигала 49 кВт/м, максимальная температура оболочек твэл 705°C, максимальное выгорание топлива 10% т.а. В качестве технологии изготовления были приняты технологии получения топлива как в виде таблеток из смешанной двуокиси [1], так и технология изготовления твэл на основе виброуплотнения гранулята смешанного топлива совместно с порошком металлического урана, выполняющего роль геттера [2].

Для экспериментальных ТВС, установленных в реактор с середины 90-х годов, ресурс был увеличен до 560 эфф.сут по сравнению с 460 эфф.сут для первых ЭТВС. Для обоснования «гибридной» активной зоны реактора БН-600 была использована ЭТВС СТП-3, конструкция которой полностью соответствовала конструкции штатных урановых ТВС: размер чехла «под ключ» 96 мм при использовании твэл диаметром 6,9 мм. Аналогичная конструкция разработана для ЭТВС СВУТ-3. Во всех ЭТВС используется смешанное уран-плутониевое топливо на основе низкофонового плутония.

Характеристики ЭТВС со смешанным уран-плутониевым топливом, испытанных в реакторе БН-600, приведены в табл. 1.

Таблица 1

#### Основные проектные характеристики ЭТВС со смешанным топливом

Параметр	СТТ-1	СТТ-2	СТТ-3	СВУТ-1	СВУТ-2
Вид топлива	Таблет.	Таблет.	Таблет.	Виброупл.	Виброупл.
Размеры чехла, мм	94,5 × 2,5	94,5 × 2,5	96 × 2	94,5 × 2,5	94,5 × 2,5
Размеры оболочки твэл, мм	6,6 × 0,4	6,6 × 0,4	6,9 × 0,4	6,6 × 0,4	6,6 × 0,4
Материал чехла	ЭП-450Ш	ЭП-450Ш	ЭП-450Ш	08Х16Н11МЗТх.д., 05Х12Н2М	05Х12Н2М; ЭП-450Ш
Материал оболочки твэл	ЧС-68 х.д., ЭП-172 х.д.	ЧС-68 х.д.	ЧС-68 х.д.	ЭП-172 х.д., ЧС-68 х.д.	ЧС-68 х.д.
Загрузка смешанной двуокиси, кг	27,4	27,4	33,3	25,8	31,1
Содержание плутония в активной части ТВС	23÷25	25	21	22÷25	24,7
Ресурс ЭТВС, эфф.сут	460	560	560	460	560

#### РАЗМЕЩЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ТВС

Содержание плутония в топливе и место размещения ЭТВС должны обеспечивать требуемые тепловые нагрузки на твэл. Поскольку сечение деления плутония-239 в спектре активной зоны реактора БН-600 близко к сечению деления урана-235, загрузка плутония на единицу длины твэл должна быть примерно такой же, как загрузка урана-235 в штатных твэл, а с учетом необходимости достижения более высоких тепловых нагрузок – несколько выше. В связи с большим числом нейтронов, образующихся при одном акте деления плутония-239, ЭТВС имеет более высокую эффективность размножения нейтронов, чем штатные ТВС с урановым топливом. Соответствующий избыток образующихся нейтронов вносит возмущение в распределение плотности нейтронного потока по активной зоне. Этот эффект может усиливаться вследствие интерференции при дополнительной установке ЭТВС со смешанным топливом.

Исследование этого вопроса [3] показало, что ЭТВС со смешанным уран-плутониевым топливом нельзя располагать ближе друг к другу, чем через две ячейки с урановым топливом. При выполнении этого условия и размещении ЭТВС на определенном радиусе увеличение удельного энерговыделения в соседних ТВС с урановым топливом ограничивается на приемлемом уровне (~2%) без превышения проектной линейной нагрузки на твэл.

Кроме того, при установке в реактор ЭТВС со смешанным уран-плутониевым топливом с уровнем тепловыделения, близким к уровню в ТВС с урановым топливом, происходит увеличение реактивности, обусловленное более эффективным размножением нейтронов в смешанном уран-плутониевом топливе по сравнению с урановым.

Замена штатной ТВС зоны малого обогащения на ЭТВС со смешанным уран-плутониевым топливом приводит к увеличению запаса реактивности до  $0,1\% \Delta k/k$ , ТВС зоны среднего обогащения на ЭТВС  $\sim 0,05\% \Delta k/k$  и ТВС зоны большого обогащения на ЭТВС  $\sim 0,02\% \Delta k/k$ . В связи с этим возникает ограничение на количество ЭТВС, исходя из требований ядерной безопасности по компенсации запаса реактивности реактора. Количество ЭТВС должно быть ограничено 18 сборками, причем в зоне малого и среднего обогащения не должно располагаться больше, чем по 6 ТВС со смешанным уран-плутониевым топливом.

### ОБЛУЧЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ТВС

За период с 1988 по 2004 гг. в реакторе БН-600 осуществлено облучение 39 ЭТВС с таблеточным топливом и 12 ТВС с виброуплотненным топливом.

Первые экспериментальные ТВС СВУТ были установлены в активную зону в 20 перегрузку реактора в июле 1988 г. Одна из этих ТВС отработала две микрокампании (МКК), а вторая – 3 МКК. Вторая партия ЭТВС, состоящая из 4 ЭТВС СВУТ и 4 ЭТВС СТП, была загружена в 24 перегрузку реактора. Данные ТВС, а также все последующие, облучались в течение трех микрокампаний. В 26 перегрузку в активную зону была установлена третья партия ЭТВС СТП и в течение 27 МКК в активной зоне одновременно находились 12 ЭТВС со смешанным уран-плутониевым топливом (вторая и третья партии). С 30 по 39 МКК в активной зоне облучались только ЭТВС СТП: в 29 перегрузку были загружены 4 ЭТВС, в 32-ю перегрузку – 6 ЭТВС, в 35 перегрузку – 2 ЭТВС и в 38 – 8 ЭТВС. В 39 перегрузку в реактор были загружены 3 ЭТВС СВУТ и в 40 МКК реактор работал с 11 ЭТВС в активной зоне. В течение 41, 42 и 43 МКК в реакторе облучалось по 14 ЭТВС. В 44 МКК в реакторе облучалось 11 ЭТВС. В 45 МКК в активной зоне оставались только 3 ЭТВС СВУТ.

В 46 перегрузку в реактор были загружены 3 ЭТВС СВУТ.

В 48 перегрузку (апрель 2005) в реактор планируется загрузить 3 ЭТВС СВУТ.

Данные по количеству ЭТВС в активной зоне в различные микрокампании представлены в табл. 2.

Параметры эксплуатации ЭТВС находились на уровне параметров наиболее напряженных штатных ТВС с урановым топливом. Максимальное значение тепловой нагрузки на твэл при испытаниях ЭТВС составляло от 35 до 49 кВт/м. При облучении в активной зоне в течение ~ 560 эфф.сут для таблеточного топлива достигнуто максимальное значение выгорания ~11,8% т.а. при повреждающей дозе 78 с.н.а., а для виброуплотненного топлива соответственно ~10,5% т.а. при 77 с.н.а. После выдержки ЭТВС во внутриреакторном хранилище (ВРХ) указанные значения составили: для таблеточного топлива – 11,8% т.а., 79 с.н.а.; для виброуплотненного топлива – 10,6% т.а., 78 с.н.а.

Условия и параметры облучения наиболее напряженных ЭТВС каждой партии приведены в табл. 3 (значения приведены по комплексу программ ГЕФЕСТ без учета наработки в ВРХ).

Таблица 2

**Количество ЭТВС в активной зоне в различные микрокампании**

Тип ТВС	Номер МКК													
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
СТТ-1					4	4	8	4	4				6	6
СВУТ-1	2	2	1		4	4	4							
СТТ-2										4	4			
Тип ТВС	Номер МКК													
	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
СТТ-2	6	2	2	2			3	4	4	1				
СТТ-3					8	8	8	7	7	7				
СВУТ-2						3	3	3	3	3	3		3	3

Таблица 3

**Параметры облучения наиболее напряженных ЭТВС каждой партии**

Тип ЭТВС	Количество ЭТВС	Номер ячейки	Макс. линейная нагрузка, кВт/м	Наработка, эфф.сут	Максимальное выгорание, % т.а.	Повреждающая доза, с.н.а.	Номер МКК
СВУТ-1	1	13–20	43,1	345	6,7	50	21–22
СВУТ-1	1	23–17	42,7	510	9,6	75	21–23
СТТ-1	4	23–23	49,2	460	10,4	68	25–27
СВУТ-1	4	11–11	46,1	460	9,5	69	25–27
СТТ-1	4	14–09	48,7	424	9,4	60	27–29
СТТ-2	4	09–14	47,1	540	11,4	76	30–32
СТТ-2	6	10–13	48,1	449	9,5	62	33–35
СТТ-2	2	21–14	45,6	559	11,8	78	36–38
СТТ-3	8	08–15	39,2	479	8,3	63	39–41
СВУТ-2	3	13–21	42,3	559	10,5	77	40–42
СТТ-2	3	10–08	43,3	560	11,0	74	41–43
СТТ-2	1	25–25	42,9	560	11,0	75	42–44
СТТ-3	7	14–24	35,3	560	8,9	68	42–44
СВУТ-2	3	12–19	44,4	440	8,9	62	43–45

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Начиная с 1988 г., в реакторе БН-600 были испытаны 39 ЭТВС с таблеточным уран-плутониевым смешанным топливом и 12 ЭТВС с виброуплотненным смешанным уран-плутониевым топливом. В различные микрокампании в активной зоне испытывалось от 1 до 14 ЭТВС. По условиям ядерной безопасности допустимо испытание одновременно не более 18 ЭТВС, поскольку ЭТВС со смешанным уран-плутониевым топливом имеют повышенную эффективность размножения нейтронов и соответственно дают избыточный запас реактивности. ЭТВС размещались на расстоянии не менее двух ячеек друг от друга и не более, чем по 6 ЭТВС в ЗМО и ЗСО.

С учетом результатов этих испытаний для реактора БН-600 может быть обоснована гибридная активная зона с совместным использованием уранового и смешанного уран-плутониевого топлива. реактора БН-600 и обоснована загрузка топлива реактора БН-800.

## **Литература**

1. Никифоров А.С., Захаркин В.С., Головнин И.С. и др. НИР и ОКР в области топливного цикла быстрых реакторов/Докл. на Междунар. конф. FR 91. Киото, 1991.
2. Цыканов В.А., Маершин А.А., Петухов А.А. и др. Анализ работоспособности твэлов реактора БОР-60 с виброуплотненным уран-плутониевым оксидным топливом//Атомная энергия. – 1989. – Т. 66. – Вып.5. – С. 299-302.
3. Васильев Б.А., Зиновьев А.И., Радионьчева А.А. и др. Испытания экспериментальных ТВС со смешанным топливом в реакторе БН-600. Физика и теплофизика реактора БН-600/Сб. научн. трудов. – Екатеринбург, 1994.

Поступила в редакцию 22.02.2005

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.