

ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ПРОЕКТНОГО РЕСУРСА ОПЫТНЫХ СТЕРЖНЕЙ АЗ С РЕФАБРИЦИРОВАННЫМ КАРБИДОМ БОРА ПОСЛЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ В РЕАКТОРЕ БН-600

А.И. Карпенко*, Е.А. Козманов*, В.В. Мальцев*, А.В. Захаров,
В.Д. Рисованный**, А.А. Худяков****

**Белоярская АЭС, г. Заречный*

***ФГУП «ГНЦ РФ НИИАР», г. Димитровград*



Представлены основные результаты реакторных испытаний и комплекса научно-исследовательских работ, выполненных ГНЦ РФ НИИАР и БАЭС, в обоснование использования в быстром реакторе стержней АЗ с рефабрицированным карбидом бора. Опытные стержни отработали в реальных условиях без замечаний и не имели каких-либо повреждений, изменений размеров и формы. Совокупность результатов реакторных испытаний, первичных и материаловедческих послереакторных исследований опытных стержней АЗ позволяет рекомендовать к использованию конструкцию этих стержней в качестве штатной для стержней АЗ реактора БН-600 с ресурсом 580 эфф. сут.

Действующая в настоящее время «Программа НИР и ОКР в области органов регулирования реактора БН-600 на период 2000-2005гг.» направлена на повышение технико-экономических параметров стержней СУЗ. В качестве путей достижения этой цели рассматриваются:

- повышение назначенного ресурса стержней за счет внедрения новых конструкционных материалов и конструкторских решений;
- применение рефабрицированного поглотителя (карбида бора) в стержнях аварийной защиты (АЗ).

Опытные стержни АЗ РНАТ-006 и РНАТ-007 были изготовлены с использованием конструкционных материалов с улучшенными физическими свойствами. В качестве поглощающего материала в этих стержнях применен рефабрицированный карбид бора высокого обогащения по ^{10}B , полученный путем химической переработки карбида бора из отработавших штатных стержней АЗ реактора БН-600.

Стержень АЗ на сегодняшний день является самым дорогим элементом активной зоны. Его стоимость в ~1,5 раза превышает стоимость ТВС самого большого (26%) обогащения топлива. Доля стоимости карбида обогащенного бора в стоимости самого стержня составляет почти 70%. Применение технологии рефабрикации обогащенного карбида бора, используемого в стержнях АЗ реакторов на быстрых нейтронах, дает возможность создания замкнутого цикла с многократным возвратом доро-

© **А.И. Карпенко, Е.А. Козманов, В.В. Мальцев, А.В. Захаров, В.Д. Рисованный,
А.А. Худяков, 2005**

гостоящего поглотителя в реактор с одновременной утилизацией отработавших изделий.

Важным этапом работ в этом направлении, начатых в 1992 г., стала разработка и изготовление двух опытных стержней АЗ для реактора БН-600. В августе 1999 г. стержни были изготовлены, приняты приемочной комиссией и переданы на Белоярскую АЭС. В техническом проекте предусматривалась эксплуатация опытных стержней РНАТ-006 и РНАТ-007 при работе реактора на номинальной мощности до 580 эфф. сут. В апреле 2000 г. был поставлен в реактор БН-600 на эксплуатацию стержень РНАТ-007, а в октябре 2001 г., после его извлечения и отправки на исследования, установлен стержень РНАТ-006. Данные по условиям эксплуатации приведены в табл. 1. Замечаний по эксплуатации стержней не было.

Таблица 1

Основные параметры эксплуатации стержней АЗ

№ п/п.	Характеристика	РНАТ-007	РНАТ-006
1.	Даты загрузки / выгрузки стержня в реактор	11.04.00 19.10.01	19.10.01 21.10.03
2.	Календарные сутки	556	732
3.	Эффективные сутки	428	570
4.	Физическая эффективность, %Δk/k	0,47÷0,52	0,47÷0,56
5.	Флюенс, $\times 10^{23}$ н/см ² на пэл: E>0,1МэВ E>0 МэВ на хвостовике: E>0,1МэВ E >0 МэВ	0,24 0,39 1,28 2,19	0,37 0,61 1,71 2,95
6.	Повреждающая доза, с.н.а. на пэл: на хвостовик:	10,1 54,3	15,7 71,7
7.	Количество плановых остановов	3	4
8.	Время падения стержня в зону, с	0,67÷0,72	0,68÷0,78

Начальная физическая эффективность стержня АЗ РНАТ-007 превышала среднюю физическую эффективность штатных стержней (сб.1663) в среднем на 12%. Превышение начальной физической эффективности РНАТ-006 над средней физической эффективностью штатных стержней АЗ (сб. 1663) составило 16%. Физическая эффективность опытных стержней соответствовала значению, приведенному в проектных материалах на опытный стержень (0.50%dk/k).

Экспериментальные данные для обоснования работоспособности стержней АЗ с рефабрицированным карбидом бора на полный ресурс 580 эфф. сут получены при послереакторных исследованиях стержней АЗ РНАТ-007, который отработал в реакторе БН-600 в течение 427,9 эфф. сут и РНАТ-006 – после 570 эфф. сут.

Стержень АЗ РНАТ-007 (рис. 1) состоит из головки с удлинительным звеном (верхняя часть) и нижней части (поглощающая часть с хвостовиком). Верхняя и нижняя части стержня соединены между собой шарниром. Поглощающая часть содержит 7 негерметичных пэлов (рис. 2) диаметром 23 мм, заключенных в кожух Ø 73 мм. Оболочки пэлов, концевые детали и дистанционирующая проволока изготовлены из стали ЭИ-847 х.д. Для изготовления головки и верхнего удлинительного звена, шарнира и хвостовика использована сталь 05Х12Н2М. Для изготовления чехловой трубы поглощающей части стержня использована сталь ЭП-450.

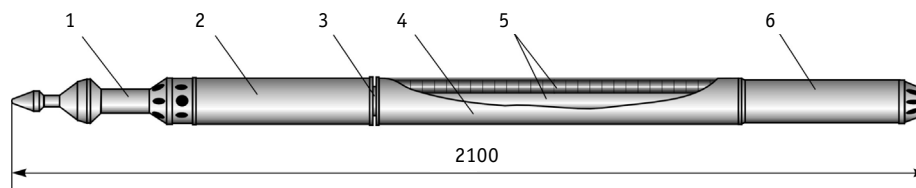


Рис. 1. Конструкция опытного стержня АЗ РНАТ-007: 1 – головка; 2 – верхнее удлинительное звено; 3 – шарнир; 4 – поглощающее звено, 5 – пэлы; 6 – нижний хвостовик

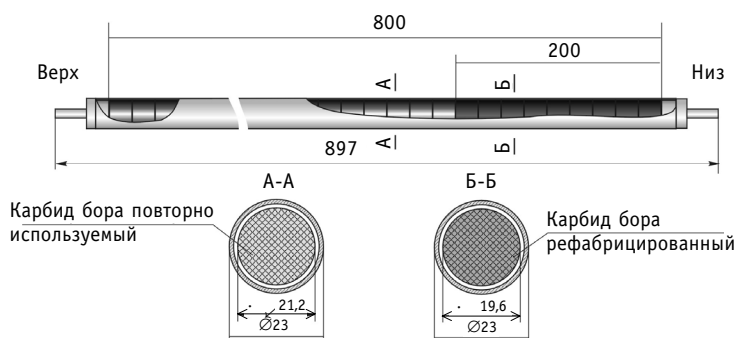


Рис. 2. Поглощающий элемент опытного стержня АЗ РНАТ-007: $\varnothing 19,6$ мм и обогащения по ^{10}B 79,6% ат., ~ 600 мм в верхней части пэл – вкладыши, извлеченные целыми из пэлов отработавших стержней АЗ 1663, диаметр $\leq 21,2$ мм и обогащение по ^{10}B 80,2% ат.

Пэлы снаряжены цилиндрическими вкладышами из карбида бора высокого обогащения по ^{10}B . Высота столбов вкладышей составляет ~ 800 мм, из них ~ 200 мм в нижней части пэлов составляют вкладыши из рефабрицированного карбида бора.

В стержне РНАТ-006 по всей длине пэла применяется рефабрицированный карбид бора, полученный путем химической переработки карбида бора из отработавших штатных стержней.

При исследованиях в ГНЦ РФ НИИАР по обоим опытным стержням были получены близкие результаты.

Следов механического и коррозионного повреждения не обнаружено. Искривлений чехловой трубы и хвостовика также не обнаружено. Поверхности деталей шарнира матовые, темно-серые с минимальным количеством отложений, слабо сцепленных с металлом. Подвижность шарнирного соединения не нарушена. Диаметр деталей, составляющих шарнирное соединение, $73,9 \div 74,0$ мм.

На наружной поверхности чехловой трубы рабочего звена также имелось небольшое количество отложений. Цвет поверхности темно-серый, поверхность матовая. Хвостовик выглядит более темным по сравнению с чехловой трубой, по-видимому, из-за более толстого слоя отложений.

Диаметр по длине чехловой трубы и хвостовика измеряли микрометром с точностью 0,01 мм в двух взаимно перпендикулярных плоскостях с шагом ~100 мм. Результаты измерений показали, что значения диаметров чехловых труб и хвостовиков находятся в пределах допуска на изготовление этих деталей и после эксплуатации не изменились.

Поверхность оболочек всех пэлов чистая, светло-серого цвета с характерным металлическим блеском. На некоторых пэлах вблизи верхних заглушек наблюдались отдельные пятна из продуктов выщелачивания натрия. Следов механического и коррозионного повреждения оболочек пэлов и заглушек не обнаружено. Все пэлы сохранили прямолинейность. Данные измерения диаметров пэлов свидетельствуют о

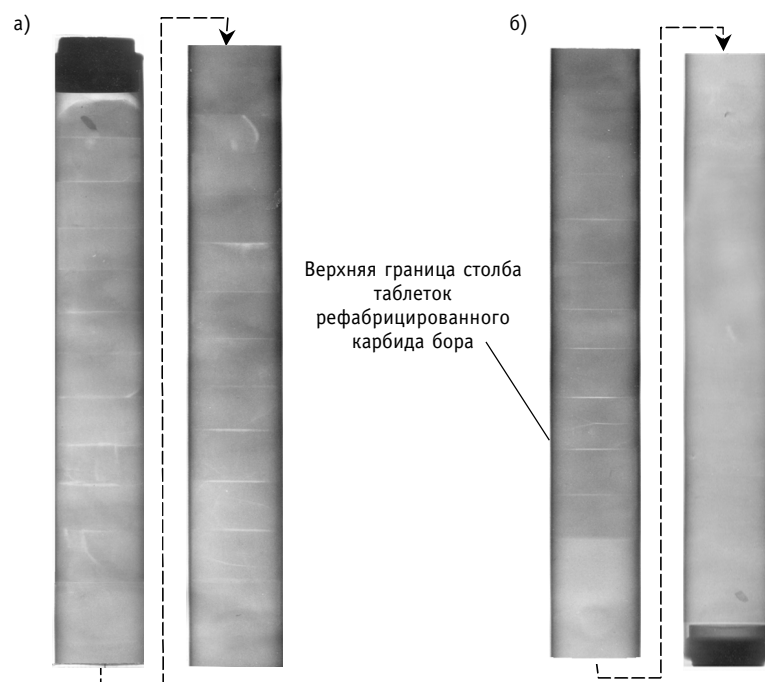


Рис. 3. Рентгеновские снимки концов периферийного пэла: а – верхний конец; б – нижний конец

том, что в результате эксплуатации стержней их диаметры не изменились.

Некоторые отличия отмечались по результатам рентгеновского просвечивания пэл и при проведении разделки пэл стержней РНАТ-007 и РНАТ-006.

При рентгеновском просвечивании РНАТ-007 (рис. 3) четко видна граница рефабрицированного и повторно использованного карбида бора. В столбе рефабрицированного карбида бора (низ пэл) не видны границы между вкладышами. Столб повторно использованного карбида бора состоит из отдельных вкладышей, имеющих трещины произвольной ориентации. Зазор между столбом поглотителя и верхней заглушкой составляет ~3 мм.

Вкладыши из верхней части извлекали путем многократного повторения операций замачивания в спиртовом растворе и встряхивания.

Верхнюю половину столба с рефабрицированным карбидом бора удалось извлечь в виде порошка и фрагментов вкладышей, которые не имели механической прочности и разрушались при прикосновении манипулятора. Нижние части пэлов были разрезаны алмазным кругом на отрезки длиной ~20 мм. При резке выкрашивания сердечника не наблюдалось. Вид поперечных сечений из низа пэла показан на рис. 4.

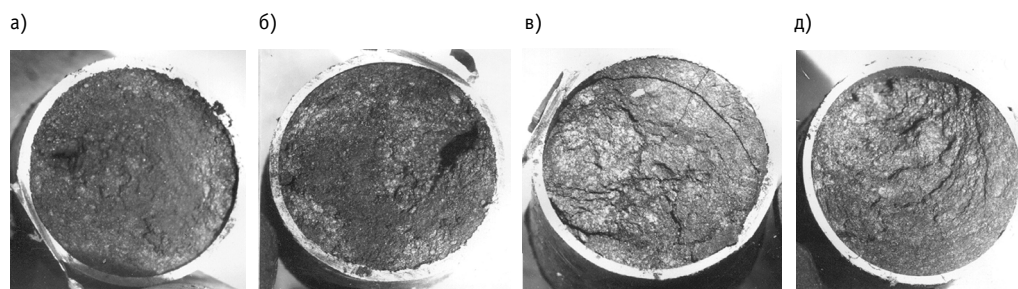


Рис. 4. Поперечные сечения периферийного пэла на различном расстоянии от низа столба поглотителя: а – 20 мм; б – 40 мм; в – 60 мм; д – 80 мм

Исходный диаметральный зазор 2 мм между вкладышами и оболочкой пэла выбран полностью. На уровне 80 мм от низа сердечник представляет собой плотную массу, сохраняющую рельефную поверхность хрупкого излома по месту разреза, наблюдаются крупные трещины. На уровне 0–60 мм от низа сечение сердечника представляет собой зернистую поверхность с рельефом, характерным для разрушения по слабо сцепленным границам зерен.

Вкладыши повторно использованного карбида бора извлекались из пэлов относительно свободно после выщелачивания натрия. Достаточно большое количество вкладышей сохранило целостность, часть вкладышей имеет сколы, некоторые разрушены на мелкие фрагменты. Из 5 периферийных пэлов было извлечено более 80 неразрушенных вкладышей. Измерениями с помощью микрометра было установлено, что значения их диаметров находятся в пределах 20,31–21,15 мм.

Рентгеновское просвечивание пэл РНАТ-006 показало однородный состав поглотителя по высоте и наличие аксиального зазора 20–21 мм. Структура поглотителя практически повторяла структурные особенности нижней части поглотителя стержня РНАТ-007 с рефабрицированным карбидом бора.

При изучении металлографических шлифов сварных соединений установлено, что во всех сварных соединениях стержня и пэлов отсутствуют непровары, поры, трещины, включения. На внутренней поверхности оболочек пэлов не обнаружено следов взаимодействия материала оболочки с рефабрицированным и повторно использованным карбидом бора и с натрием. Внешняя поверхность оболочек пэлов не имеет следов коррозионного и механического повреждений.

Микроструктура материала оболочек пэлов типична для аустенитной нержавеющей стали ЭИ-847 в холоднодеформированном состоянии и практически одинакова по длине пэлов. Микроструктура материала кожуха рабочего звена (сталь ЭП-450) не имеет принципиальных отличий микроструктуры материала в нижней и верхней частях чехловой трубы. Микроструктура стали 05Х12Н2М, из которой изготовлены хвостовик и шарнир стержня, также не имеет видимых отличий от исходной.

При определении выгорания изотопа ^{10}B в пэлах опытных стержнях АЗ было установлено, что среднее по сечению пэла выгорание изотопа ^{10}B в нижней части поглощающего сердечника не превышает 10%.

Были проведены рентгеноструктурные исследования карбида бора. Параметры кристаллической решетки показывают увеличение объема на 2,08% в карбиде бора повторно использованных вкладышей и уменьшение объема на 2,23% в рефабрицированном карбиде бора.

Таблица 2

Механические свойства облученной стали ЭИ847 х.д.

Образцы	Флюенс, н/см ² (E>0,1МэВ)	T, °C	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_p , %	δ_0 , %
Верх пэла	Не установлен	20	933	793	8,0	12,9
		500	733	649	2,7	5,5
		550	684	630	1,8	4,1
Низ пэла	$2,4 \cdot 10^{22}$	20	1123	970	4,7	6,3
		500	792	706	2,4	3,1
		550	814	766	1,6	1,6
Низ пэла	$3,7 \cdot 10^{22}$	20	930	840	2,5	2,5
		500	740	700	1,8	1,8
		550	550	540	0,4	0,4

Результаты механических испытаний на растяжение кольцевых образцов материала оболочек пэлов при температурах 20, 500 и 550°C приведены в табл. 2.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведены реакторные испытания и послереакторные исследования опытных стержней АЗ после эксплуатации в реакторе БН-600 в течение 427 и 570 эфф. сут. Максимальные повреждающие дозы на оболочке поглощающих элементов и хвостовике стержня составили соответственно 15,7 и 71,7 с.н.а. Максимальное выгорание ^{10}B на наружных поверхностях нижних вкладышей пэлов составило 24%.

2. Установлено, что в результате эксплуатации все элементы конструкции опытных стержней АЗ сохранили целостность и прямолинейность. Подвижность шарнирного соединения не нарушена. Диаметры основных элементов конструкции (верхнего шарнира, чехловой трубы рабочего звена и хвостовика) не изменились.

3. Поглощающие элементы сохранили целостность и прямолинейность. Поверхность оболочек пэлов чистая, блестящая, без следов механического и коррозионного повреждений. Диаметры оболочек пэлов не изменились. Осевой зазор между столбом поглотителя из рефабрицированного карбида бора и заглушкой в верхней части пэла составляет 20÷21 мм, а верхние блочки сохранили форму.

4. Металлографическими исследованиями подтверждено отсутствие коррозионных и иных повреждений внутренних и наружных поверхностей оболочек пэлов, чехловой трубы рабочего звена и хвостовика.

5. Сварные соединения пэлов и стержня соответствуют требованиям чертежей и технических условий и не ограничивают работоспособность пэлов и стержня АЗ в целом.

6. Механические свойства материала оболочек поглощающих элементов сохранились на достаточно высоком уровне. При температуре испытаний 500°C равномерное удлинение стали ЭИ-847 х.д. составляет в среднем $(1,8 \pm 0,4)\%$, а предел текучести – (700 ± 40) МПа.

7. Материал рефабрицированного карбида бора после эксплуатации в нижней части пэла до высоты 150–200 мм представляет собой однородную массу, контактирующую с оболочкой пэла, но не оказывающую на нее заметного силового воздействия из-за отсутствия механической прочности. Выше 150–200 мм контакт оболочки и сердечника ослабевает, а поглотитель представляет собой порошок и фрагменты вкладышей, также не имеющих механической прочности.

8. Стержень конструкции РНАТ-006 отработал в реальных условиях без замечаний 570 эфф.сут и не имел каких-либо повреждений, изменений размеров и формы. Результаты его эксплуатации можно считать прямым, необходимым и достаточным экспериментальным подтверждением проектного ресурса 580 эфф.сут.

9. Совокупность результатов реакторных испытаний, первичных и материаловедческих послереакторных исследований опытных стержней АЗ РНАТ-006 и РНАТ-007 позволяют рекомендовать данную конструкцию стержней в качестве штатных стержней АЗ реактора БН-600 на основе рефабрицированного карбида бора.

Поступила в редакцию 22.02.2005

The behaviour of the sodium-heated once-through steam generator evaporator stage hydrodynamic instability range boundaries has been analyzed. The recommendations on the evaporator stage stability improvement under startup transients are given.

УДК 621.039.526

About Connection of the Sodium Flow Rate Distribution in the BN-600 Reactor Primary Circuit with the Reactor Vessel Thermocouples Reading Pattern \A.A. Bychkov, I.M. Krysan'tev; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2005. – 5 pages, 2 tables, 2 illustrations. – References, 2 titles.

The authors present analysis results of the reading of the thermocouples for sodium temperature measurements into the BN-600 reactor vessel (reactor vessel thermocouple) for several operating cycles the BN-600 reactor. The reactor vessel thermocouples reading dependence from hydraulic condition of the BN-600 reactor primary circuit is presented in this article.

УДК 621.039.542

Features of Constructional Materials' Behavior within Fast High-Power Reactor's Spectrum of Neutrons \V.V. Chuyev, V.F. Rosljakov, V.V. Maltsev; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2005. – 14 pages, 5 tables, 13 illustrations. – References, 5 titles.

Present work reviews basic research results of the of experimental and regular fuel subassemblies and fuel pins using an example of reactor's FN-600 for its transformation to the fuel burn out ~11 % h.a.. These results are necessary for substantiation of constructional materials' safe and reliable work within an active third modernization zone.

УДК 621.039.526

Radiation Swelling of Steels in the Fast Reactor Neutron Field \E.A. Kozmanov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2005. – 6 pages, 4 illustrations. – References, 9 titles.

At present the vast experimental material validating the fact that the pores in steel are formed during in-reactor irradiation due to the unbalanced strains induced by the structural stresses caused by the processes of forming the secondary phases against a background of the degraded internal links. The loss of the phase stability causes an essential change in the physical and mechanical properties of the irradiated materials. The sizes and concentration of pores and precipitations are dependent on temperature. In this paper the phenomenologic presentation of the steel swelling process in the fast reactor neutron field is made on the basis of the applicable experimental data.

УДК 621.039.526

Confirmation of the Design Lifetime of the Test Safety Rods Manufactured of Refabricated Boron Carbide after Operation in the BN600 Reactor \A.V. Zakharov, A.I. Karpenko, E.A. Kozmanov, V.V. Maltsev, V.D. Risovany, A.A. Khudyakov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2005. – 6 pages, 2 tables, 4 illustrations.

The main results of the in-reactor testing and integrated research conducted by the Russian nuclear reactor research centre and Beloyarsk NPP in support of the utilization of the safety rods manufactured of refabricated boron carbide in the fast reactor are presented. The test rods have smoothly operated under actual conditions without any damage or any change in dimensions or geometry. The total results of the in-reactor testing and primary and scientific post-irradiation examinations of the test safety rods allow the use of the design of these rods having got design lifetime of 580 efpd as a standard one for the BN600 reactor to be recommended.

УДК 621.039.542

Optimization of the Structural Condition of Fuel Cladding Material \M.V. Bakanov, V.V. Chuev, O.V. Kryukov, A.V. Lukin, S.A. Bychkov, Yu.P. Budanov, O.S. Korostin, A.V. Tselishchev, V.B. Tarasyuk; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2005. – 7 pages, 2 tables, 5 illustrations. – References, 7 titles.

The technology of the especially thin-walled cold-worked tubes sizing 6.9 by 0.4 mm of '4C68' steel is outlined. The ways of the fuel pin technology advancement aimed at obtaining better fuel pin radiation resistance in the BN600 reactor are reviewed. The long-term strength of the tubes manufactured following the advanced technology is better than that of the tubes supplied earlier.