

УДК 621.039.531

EDN VICEYC

Оценка влияния храпового механизма деформации на работоспособность оболочек поглощающих элементов

Е.А. Кинёв, М.В. Евсеев

*АО «Институт реакторных материалов», г. Заречный
kinev_ea@irmatom.ru*

Рассматриваются объемные изменения оболочек поглощающих элементов реакторов на быстрых нейтронах. Показано, что кроме радиационного распухания стальная оболочка испытывает локальную пластическую деформацию величиной до 1 % по храповому механизму со стороны фрагментированных вкладышей материала поглотителя на основе карбида бора. Результаты после реакторных исследований оболочек поглощающих элементов в деформированной зоне свидетельствуют об их достаточно высоких механических свойствах и сохранении остаточной пластичности.

Ключевые слова: поглощающий элемент, оболочка, вкладыш, пластическая деформация, храповик, распухание, механические свойства

Estimate of ratchet manner deformation influence on cladding efficiency of absorbing elements

E.A. Kinev, M.V. Evseev

Research institute of nuclear materials, Joint-Stock Company, Zarechny

This paper is concerned with volumetric changes in absorbing element claddings of fast neutron reactors. It is shown, in addition to radiation swelling the steel cover undergoes local plastic deformation of up to 1 % by a ratchet mechanism from the fragmented compact stuffers of the absorber material based on boron carbide. The results of post-irradiation examinations of absorbing element claddings in the deformed zone demonstrated their fairly high mechanical properties and retention of residual plasticity.

Keywords: absorbing element, cover, stuffer, plastic deformation, ratchet, swelling, mechanical properties

Введение

Известно [1–4], что основными параметрами, характеризующими работоспособность поглощающих элементов (пэлов) ядерных реакторов, являются выгорание материала поглотителя нейтронов, объемные изменения и механические свойства материала оболочек. Объемные изменения оболочек протекают в условиях комплексного воздействия термических и нейтронных потоков, а также механического взаимодействия с распухающим поглотителем [3]. Последнее явление, согласно наблюдениям [4, 5], носит стохастический по масштабам развития (от слабого до разрушительного) характер и заслуживает внимания в аспектах анализа причины возникновения, а также ве-

роятности развития в перспективе увеличения сроков эксплуатации пэлов.

В течение последнего десятилетия в АО «ИРМ» исследовано состояние четырнадцати поглощающих элементов в составе четырех стержней аварийной защиты (АЗ) и компенсирующей стержней (КС) реактора БН-600. Отдельные характеристики объектов исследования представлены в таблице 1. Пэлы АЗ были изготовлены по разным технологиям: экспериментальная партия №1 с вкладышами рефабрицированного поглотителя из ранее облученного материала в оболочке из умеренно радиационно-стойкой стали ЭИ847; партия №2 – штатные пэлы с вкладышами промышленного производства в более стойкой к распуханию оболочке (сталь ЧС68). Все исследованные пэлы КС были оснащены оболочками из стали

ЧС68 и вкладышами промышленного производства. Особенностью эксплуатации являлась более высокая (примерно двукратная) повре-

ждающая доза при меньших сроках нейтронного облучения в нижней части пэлов КС относительно пэлов АЗ.

Таблица 1

Характеристики исследованных материалов

Объект исследования	Доля изотопа ^{10}B , % ат.	Срок эффект. эксплуатации, лет	Усл. №	Материал оболочки/ вкладыша	Максимальная повреждающая доза, сна
Пэлы АЗ (9 шт.)	80,0	2	1	ЭИ-847 хд/ В ₄ С рефабрикат	32
			2	ЧС-68 хд/ В ₄ С промышл.	23
Пэлы КС (5 шт.)	19,8	1,5–1,6	3	ЧС-68 хд/ В ₄ С промышл.	59
			4	В ₄ С промышл.	60

Методика оценки вклада пластической деформации в формоизменения оболочек пэлов

Оценка послереакторного состояния оболочек пэлов и вкладышей поглотителя из карбида бора разными способами изготовления проводилась методами наружного осмотра, измерения геометрических размеров, гидростатического измерения плотности, механических испытаний на растяжение, оптической микроскопии, дилатометрии [6].

В качестве контрольного параметра объемных изменений принято формоизменение диаметров ($\Delta D/D$) оболочки и вкладышей поглотителя на различной относительной высоте пэлов L/H , где L – координата от низа, H – общая длина столба поглотителя.

Под действием нейтронного облучения происходит объемное радиационное распухание исследуемых материалов $S = \Delta V/V$, измеряемое методом гидростатического взвешивания. В условиях изотропного распухания принято считать, что формоизменение $\Delta D_{\text{расп.}}/D$, обусловленное радиационным распуханием, определяется как:

$$\Delta D_{\text{расп.}}/D = \frac{1}{3} \times S = \frac{1}{3} \times \frac{\Delta V}{V} \quad (1)$$

Вклад пластической деформации (ε) в формоизменение оболочек, вызванной механическим взаимодействием с распухающим поглотителем, определяется разностью полного (по данным геометрии) и радиационного формоизменений, %:

$$\varepsilon = \frac{\Delta D}{D} - \frac{\Delta D_{\text{расп.}}}{D} \quad (2)$$

Относительные погрешности измерений $\Delta D/D$ и $\Delta V/V$, расчетов $\Delta D_{\text{расп.}}/D$ и ε составили 0,11 %, 2 %, 2 % и 2,11 % соответственно.

Результаты и обсуждение

В составе стержней АЗ и КС наиболее интенсивное воздействие нейтронного потока приходится на нижний участок сердечника поглотителя и оболочки пэла [2, 3]. Максимальные параметры эксплуатации, достигнутые для объектов настоящего исследования на координате $L/H=0$, указаны в таблице 1. Группа пэлов АЗ характеризовалась низкой повреждающей дозой, не превышающей инкубационные периоды распухания обоих (ЭИ847 и ЧС68) конструкционных материалов. Измеренное значение S в этих условиях равно нулю. Пэлы КС с оболочками из стали ЧС-68 при более высокой повреждающей дозе испытали начальную стадию радиационного распухания (т.е. $S > 0$).

Из опыта исследований [4, 5] видно, что тщательный анализ взаимных объемных изменений оболочки и поглотителя проведен в нижней трети пэлов ($L/H < 0,3$), где зарегистрированы процессы аномальной деформации оболочек, не отвечающей измеренным уровням радиационного распухания. Особенность такого рода деформации заключается в повышенных и нерегулярных по величине (стохастических) значениях формоизменения оболочек, систематически превышающих вклад радиационного распухания. Общий характер формоизменений по длине объектов исследования показан на рис. 1, где приведены значения прироста диаметра оболочек по двум образующим через 90° и их средние значения.

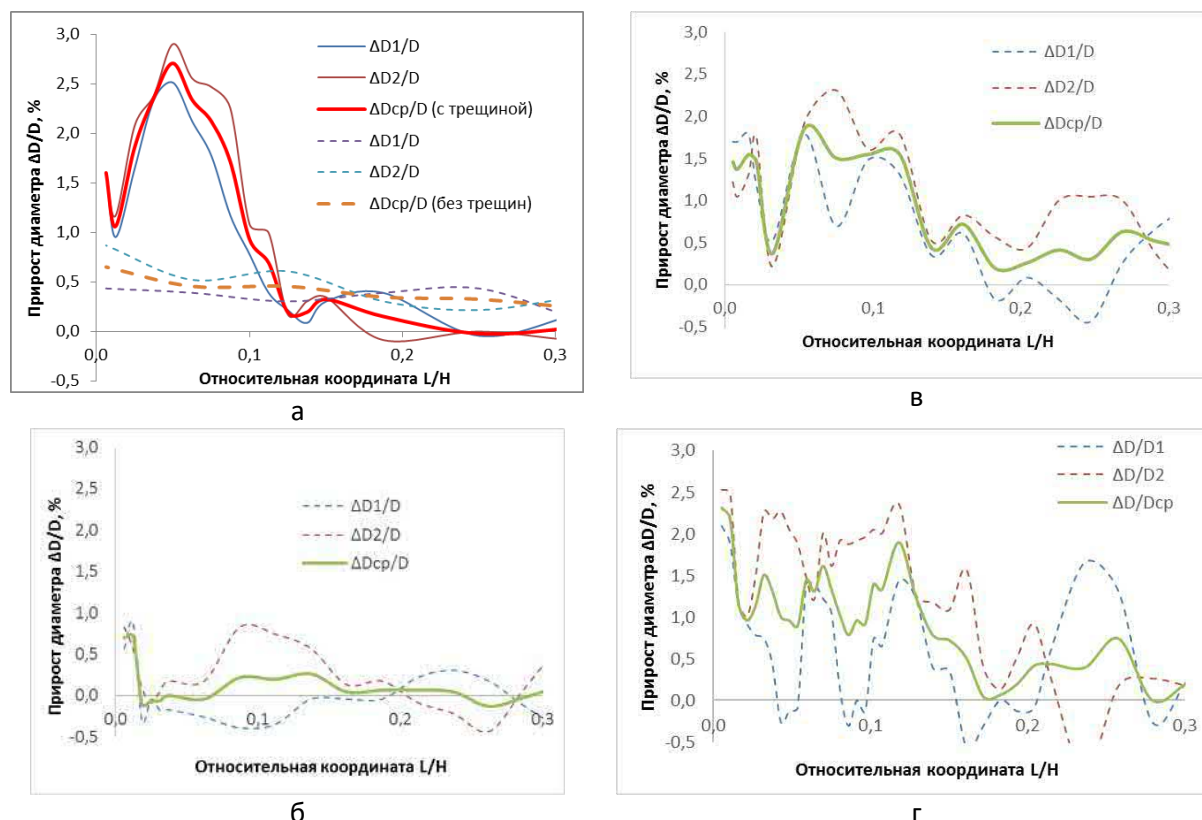


Рис. 1. Характер формоизменения оболочек в нижней части пэлов АЗ (а, б) и КС (в, г)

Графики на рис. 1 а (экспериментальный объект №1) соответствуют состоянию нижней части оболочек из стали ЭИ847 дефектного пэла с аксиальным растрескиванием и сохранившего целостность пэла при менее развитой окружной деформации. Пэлы штатных стержней АЗ и КС с оболочкой из стали ЧС68 не имели сквозных механических дефектов, но также характеризовались эллипсностью и стохастической деформацией, наиболее выраженными в нижних координатах (рис. 1 б–г): на объектах №2 – признаки, №3–№4 – отчетливая бугристость наружной поверхности. На более высоких координатах бугристые формоизменения оболочек у всех объектов отсутствовали. Для изучения механизма указанной деформации пэлов выполнен комплексный анализ объемных изменений материалов поглотителя и оболочки.

Наличие бугристой поверхности является формальным признаком механического взаимодействия оболочки с материалом поглотителя. Для подтверждения этого предположения произведена абразивная резка на толщину оболочек пэлов. Вид образцов из нижних координат объектов исследования в порядке увеличения условной нумерации представлен на рис. 2.

Сквозная трещина внизу оболочки пэла АЗ с рефабрицированным поглотителем (объект №1) образовалась в результате полного выбора технологического зазора слабо растрескавшимся и увеличившимся в диаметре плотным вкладышем (рис. 2 а). Извлечение компактного тела вкладыша сопровождалось схлопыванием берегов трещины. Таким же образом сужались надрезы деформированной оболочки образцов, прилегающих к дефектному участку. Состояние промышленного поглотителя АЗ (объект №2) в идентичных эксплуатационных условиях продемонстрировало множественное растрескивание и крупную фрагментацию, также завершившуюся выбором значительной части зазора – ростом площади контакта с неповрежденной оболочкой (рис. 2 б, 1 б).

При воздействии более высоких плотностей нейтронного потока и температур на стержни КС нижние вкладыши промышленного поглотителя в их составе подверглись глобальной фрагментации, обеспечившей выбор радиального зазора (рис. 2 в) и наличие наиболее выраженной внешней стохастической бугристости оболочек, но без образования трещин (рис. 2 г, объект № 4).

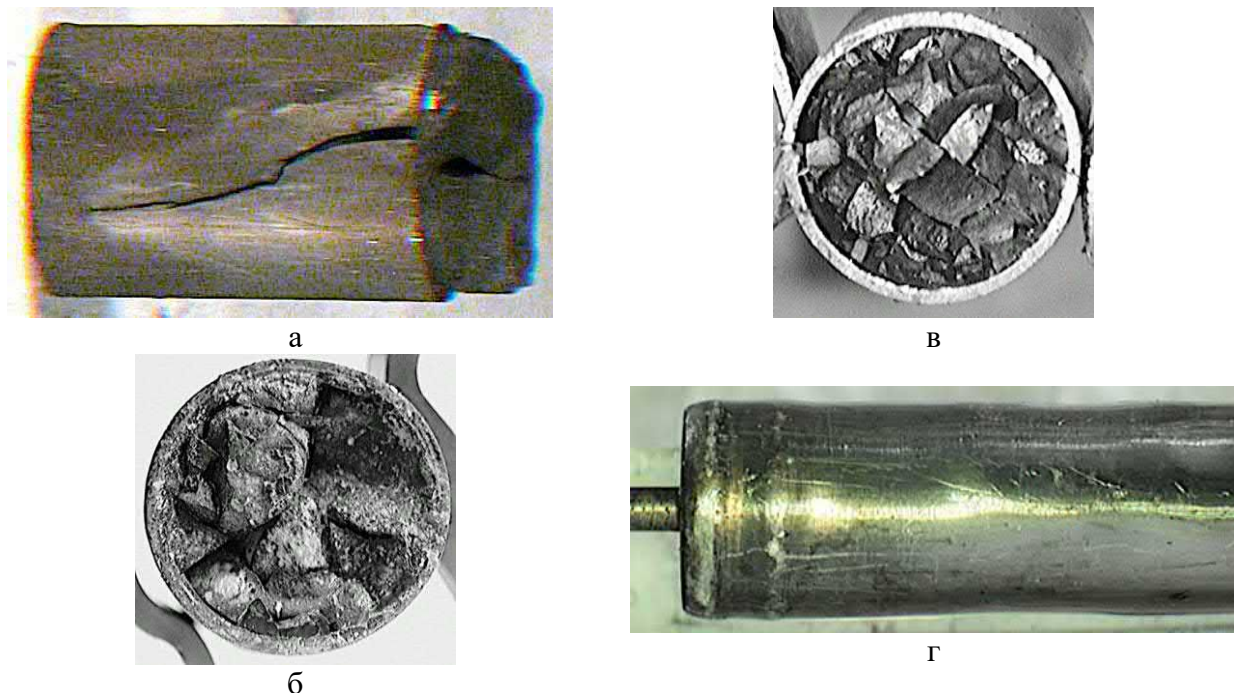


Рис. 2. Механическое воздействие вкладышей на оболочку пэлов АЗ (а, б) и КС (в, г)

В соответствии с методикой отдельной оценки вкладов деформации, формулами (1, 2) выполнены расчеты ожидаемых и реальных деформаций вкладышей и оболочек (таблица 2). При оценке радиальной деформации стали использовалось следующее допущение. По данным дилатометрии вкладышей в составе стержня КС усл. №4, сохранивших форму на координатах $L/H > 0.8$, линейный коэффициент температурного расширения (ЛКТР) карбида бора в диапазоне (25–1200) °С составил $(7,2–8,7) \times 10^{-6}$ 1/К. Для оболочек из стали ЧС-68 после облучения до повреждающей дозы (50–70) сна ЛКТР находится на уровне $(16–19) \times 10^{-6}$ 1/К [7]. Таким образом, в грубом приближении

термическое расширение материалов пэлов не оказывает существенного вклада на изменение технологического зазора, вследствие чего не принималось в расчет.

В таблице 2 представлены экспериментальные данные по полному формоизменению оболочки пэла и результаты расчёта ожидаемых формоизменений вкладышей (по формуле 1) в предположении сохранения целостности вкладышей и выбора зазора между вкладышами и оболочкой в процессе облучения с учётом оценочного распухания карбида бора и оболочки. То есть расчёт ожидаемых формоизменений выполнен исходя из экспериментальных данных по радиационному распуханию (1/3·S).

Таблица 2

Граничные характеристики материалов после эксплуатации (координаты $L/H < 0,1$)

Усл. №	Оболочка					Вкладыш		
	$\Delta D_{ср}/D$, %	$1/3 \cdot S_{об}$, %	Деформация ϵ_1 , %	σ_b^{**} , МПа	$\delta_{общ}^{**}$, %	$\Delta D_{ср}/D$, %	$1/3 \cdot S_{вкл}$, %	Деформация ϵ_2 , %
1	2,7*	0*	$\leq 2,7$	790/530	0,9/0,3	13,7	4,4	9,3
2	0,9	0	0,9	805/650	8,9/6,0	11,4 (4,5 для $L/H=0,2$)	4,1	7,3
3	1,9	-	Не опред.	-	-	12,0	-	Не опред.
4	2,2	1,0	1,1	830/730	6,5/2,9	12,6	4,2	8,4

* в зоне сквозного дефекта после отмывки от натрия
** числитель для 25 °С, знаменатель – 500 °С

Расчеты радиационного воздействия на материалы показали существенные превышения полных средних формоизменений диаметров оболочки и поглотителя $\Delta D_{ср}/D$ над формоизменениями ($1/3 \cdot S_{об}$) за счет распухания. Механическая деформация оболочек (ϵ_1) составила (0,9–2,7) %, таблица 2. Следует отметить, что максимальное значение получено в области сквозного дефекта объекта №1 и в настоящее время является исключительно демонстрационным, поскольку относится к стали ЭИ847, снятой с эксплуатации. При этом уровень типичной окружной деформации 1 % (см. неповрежденные объекты № 2 и 4 из стали ЧС-68, таблица 2) оказался достаточным для локального растрескивания двух из шести оболочек из ЭИ847 (объект №1) с общим относительным удлинением $\delta_{общ}^{25}$ не выше 0,9 %. Для оболочек АЗ и КС из стали ЧС68 окружная деформация 1 % после эксплуатации в течение 1,5–2 лет, по данным механических свойств, не является критической, т.к. сохраняются высокие значения прочности и остаточной пластичности ($\delta_{общ}^{500}$ из таблицы 2). Тем не менее рост диаметров оболочек выше значений, обусловленных радиационным распуханием, отражает наличие механического взаимодействия оболочек с поглотителем, которое может быть различной степени для стержней АЗ и КС по условиям эксплуатации, но одинаковым по своей природе (механизму).

Условный (в предположении целостности) расчет среднего полного $\Delta D_{ср}/D$ изменения диаметра фрагментированных вкладышей (от 11 до 14 %, таблица 2) получен в приближении нулевого остаточного зазора относительно значеный внутреннего, пересчитанного из внешнего, диаметра деформированных участков оболочек. Реальное полное формоизменение 4,5 % измерено лишь на единичном минимально расколоте вкладыше на координате $L/H=0,2$ пэла АЗ с оболочкой из стали ЧС-68 (см. таблицу 2). Радиационное формоизменение поглотителя $1/3 \cdot S_{вкл}$ на всех объектах исследования (по гид-

ростатическим данным распухания фрагментов, в т.ч. рефабрицированного монолита из зоны дефекта), независимо от условий эксплуатации, составило около 4 %. Таким образом, интегральная деформация вкладышей (точнее массива фрагментов) за счет растрескивания (ϵ_2) достигла (7–9) %, что вдвое превысило вклад от распухания. Здесь уместно отметить, что величина деформации вкладышей возрастала в следующей последовательности: от пэлов АЗ с умеренной фрагментацией (крупные сегменты на рис.2 б), далее пэлы КС с повышенной фрагментацией (мелкие сегменты, рис. 2 в) до экспериментального рефабрицированного материала АЗ (отсутствие фрагментации, рис. 2 а). Формально во всех случаях наблюдалось заполнение свободного под оболочкой пространства материалом фрагментированного в разной степени поглотителя.

Состояние диаметрального технологического зазора в исходном (исх.) и облученном (облуч.) состояниях относительно наружного диаметра вкладыша $D_{вклад.}$ и внутреннего диаметра оболочки $D_{внутр.}$ приведено в таблице 3. Исходный диаметральный зазор составляет 10,2 % от диаметра необлученного (100 %) вкладыша. Толщина оболочки, в соответствии с конструкцией [1, 2], составляет 3,6 % соответственно. Таким образом, с учетом радиационных формоизменений диаметров и толщины оболочек, рассчитанных по значениям для $1/3 \cdot S$ из таблицы 2, ожидаемый остаточный диаметральный зазор (без растрескивания поглотителя) должен составить от 5,8 до 7,1 % относительно исходного диаметра вкладыша. Это означает наличие участков внутреннего периметра оболочки с просветами, превышающими толщину оболочки. Однако фактическое состояние фрагментированных вкладышей, плотно контактирующих с оболочкой, зарегистрировано на рис. 2. Дополнительные металлографические исследования более высокого разрешения, исключаяющие помехи заусенцев, подтвердили это наблюдение (рис. 3).

Таблица 3

Состояние технологического зазора в исходном состоянии и после облучения, %

Усл. №	$D_{вклад.}$ (исх.)	$D_{внутр.}$ (исх.)	$D_{вклад.}$ (облуч.)	$D_{внутр.}$ (облуч.)	Ожидаемая доля зазора диаметрального
1	100	110,2	104,4	110,2	5,8
2			104,1	110,2	6,1
4			104,2	111,3	7,1

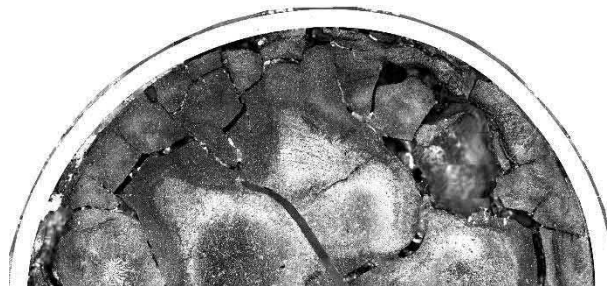


Рис. 3. Фрагмент шлифа в зоне храпового воздействия вкладыша на оболочку КС

В итоге, вопреки деформационным расчетам и реальным уровням радиационного распухания, глобальная фрагментация растрескивания вкладышей в нижней части пэлов, подверженной максимальному радиационному воздействию, сопровождается полным выбором остаточного зазора по однонаправленному механизму хrapовика. После растрескивания вкладыша многочисленные осколки поглотителя АЗ и в большей степени КС получают возможность необратимого взаимного разворота и релокации относительно друг друга. Свободное пространство возникающих трещин и технологического зазора случайным образом заполняются более мелкой крошкой от вышерасположенных вкладышей. Изменения реакторной мощности, рабочие перемещения стержней СУЗ сопровождаются температурными перепадами, ответственными за расширение и сужение диаметра оболочек пэлов. В этих условиях на стадии расширения фрагменты поглотителя случайным образом формируют жесткий каркас, ограниченный внутренним свободным пространством; на стадии охлаждения оболочка осаживается на каркас, получая деформацию и рост внутренних микронапряжений. Храповой механизм деформации носит стохастический по масштабу характер и в максимальной степени проявляется наличием бугристости произвольной формы наружной поверхности оболочек, визуальнo зарегистрированный для пэлов КС.

В целом объемные изменения и механические свойства оболочек пэлов контролируются уровнем достигнутых повреждающих доз. Механическая деформация оболочек отсутствует до момента выбора зазора, но возникает после его выбора и процесса термоциклического контакта с каркасом фрагментов поглотителя. Оче-

видно, что сквозные повреждения оболочки экспериментальных пэлов АЗ (объект №1) не являются показательными ввиду неблагоприятного сочетания недостаточной радиационной стойкости стали ЭИ847 и склонности рефабрицированных вкладышей к мелкодисперсной фрагментации. Для штатных стержней КС, тем более АЗ (объект №2), на основе промышленного поглотителя и стали ЧС68 с окружной деформацией не более 1,1 % хrapовой механизм деформации оболочек в условиях сохранения трехкратного (таблица 2: добщ 500 °С) запаса пластических свойств может быть отнесен к явлению второго плана. Этот механизм следует учитывать и держать на контроле в рамках задач напряженно-деформированного состояния и увеличения ресурса эксплуатации органов СУЗ ядерных реакторов.

Выводы

Выполнена оценка влияния хrapового механизма деформации на сверхструктурную радиальную геометрию (гофрирование) оболочек пэлов со стороны поглотителя из карбида бора естественного и повышенного обогащений по изотопу ^{10}B .

Храповая деформация, отмеченная на отдельных исследованных элементах СУЗ, находится на уровне (0,9–1,1) %, что с учётом сохранения остаточной пластичности облучённого материала (стали ЧС68) не ограничивает поэтапного увеличения сроков их установленной эксплуатации, при условиях обязательного и своевременного контроля.

Эффект хrapового механизма нагружения оболочки следует учитывать в расчете напряженно-деформированного состояния оболочки пэла в процессе эксплуатации.

Список литературы

1. Тарасиков В.П. Опыт послерадиационных исследований стержней СУЗ реакторов БН-350 и БН-600 // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы, 2025. № 2. С. 167–182.

2. Рисованый В.Д., Захаров А.В., Клочков Е.П., Соколов В.Ф., Осипенко А.Г., Мальцев В.В., Карпенко А.И., Козманов Е.А., Тучков А.М., Васильев Б.А., Мишин О.В., Александров Ю.К. Создание стержней АЗ реактора БН-600 на основе рефабрицированного карбида бора с ресурсом 745 эфф. суток // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2011. №1. С. 249–259.

3. Рисованый В.Д., Захаров А.В., Клочков Е.П., Гусев Т.М. Бор в ядерной технике. – Димитровград: ОАО «ГНЦ НИИАР», 2011. – 668 с.

4. Кинёв Е.А., Устинов А.Е. Распухание нейтронного поглотителя на основе V_4C промышленного и рефабрицированного качества после двухлетнего облучения в стержнях аварийной защиты // ВАНТ. Сер. Ядерно-реакторные константы. 2020. Вып. 4. С. 60–68.

5. Козманов Е.А. Работоспособность стержней регулирования ядерного реактора на быстрых нейтронах // Сб. тезисов Российской научно-технической конференции «Материалы и технологии энергетических установок» (ЛУЧ-МТ-2025). С. 119 – 120.

6. Синельников Л.П., Аверин С.А., Козлов А.В., Шихалёв В.С., Барсанова С.В., Евсеев М.В., Кинёв Е.А., Лютикова М.С., Цыгвинцев В.А., Глушкова Н.В., Панченко В.Л., Пастухов В.И., Барыбин А.В. Оборудование и методики послереакторных исследований материалов в комплексе защитных камер АО «ИРМ» // Атомная энергия. 2016. Т. 121. Вып. 4. С. 187–194.

7. Щербakov Е.Н., Синельников Л.П., Козлов А.В., Шихалев В.С., Портных И.А., Ершова О.В., Яговитин П.И., Кузеванов А.Я., Исаков А.П., Асипцов О.И. Дилатометрические исследования объемных изменений стали 06X16H15M2ГТФР после высокодозового нейтронного облучения // ВАНТ. Сер. Материаловедение и новые материалы. 2007. Вып. 1 (68–69). С. 389–398

Поступила в редакцию / Received 24.10.2025

Поступила после рецензирования / Revised 12.12.2025

Принята к публикации / Accepted 15.12.2025