Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом» АО «ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РФ — ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ имени А. И. ЛЕЙПУНСКОГО»

ФЭИ-3296

В. Ю. СТОГОВ, Р. А. ШАГИНЯН, А. М. ШАКИРОВ

ВОЗМОЖНОСТЬ ЗАМЕНЫ КАРБИДА БОРА НА ГИДРИД ГАФНИЯ В ОРГАНАХ СУЗ БЫСТРЫХ РЕАКТОРОВ

Обнинск – 2022

УДК 621.039.54

Стогов В.Ю., Шагинян Р.А., Шакиров А.М. Возможность замены карбида бора на гидрид гафния в органах СУЗ быстрых реакторов : Препринт ФЭИ–3296. Обнинск: ГНЦ РФ – ФЭИ, 2022. 20 с.

Ключевые слова: гидрид гафния, карбид бора, HfH, B₄C, поглотитель, CУЗ, быстрый реактор.

Рассмотрены поглощающие свойства HfH_x как замены B_4C в органах СУЗ быстрых реакторов.

Stogov V. Yu., Shaginyan R.A., Shakirov A.M. *Possibility of carbide bor replacement by hafnium hydride in Control Rods of FBR*. Preprint FEI–3296. Obninsk, IPPE Publ., 2022. 20 p.

введение

Наиболее освоенным поглотителем СУЗ отечественных быстрых реакторов является карбид бора. Он хорошо освоен и в основном удовлетворяет потребности проектировщиков. Однако карбид бора имеет ряд недостатков, поэтому идёт поиск альтернативных материалов [1].

Целью настоящей работы является исследование использования гидрида гафния вместо карбида бора для регулирующих стержней быстрого реактора. Интерес к такой замене вызван, в частности и наличием запасов гафния, как сопутствующего элемента при добыче циркония.

Дополнительным толчком к работе явились результаты, полученные японскими учеными в работах [2, 3, 4]. Их работы посвящены применению гидрида гафния в японском быстром реакторе (Japan Sodium Fast Reactor, JSFR).

Привлекательность того или иного поглотителя определяется рядом факторов, в том числе:

1. Уровнем влияния на реактивность в реакторе;

2. Степенью возмущения поля энерговыделения;

3. Сохранностью свойств в условиях облучения;

4. Технологичностью производства и утилизации отработавших изделий.

В нашей работе мы ограничимся первым пунктом, сосредоточив внимание главным образом на нейтронно-физических аспектах

1. ОСОБЕННОСТИ ГИДРИДА ГАФНИЯ И КАРБИДА БОРА КАК ПОГЛОТИТЕЛЕЙ В ОРГАНАХ СУЗ БЫСТРЫХ РЕАКТОРОВ

Свойства карбида бора

Поглощение нейтронов в карбиде бора происходит в основном на изотопе B^{10} . Его содержание в естественной смеси составляет около 20%. Для увеличения эффективности поглощения бор обогащают по изотопу B^{10} до содержания 60...92%.



Рис. 1. Сечения $B^{10}(n, \alpha)Li^7$ и $Li^7(n, \gamma)Li^8$. Данные из РОСФОНД 2010 [5]

Известно, что B₄C является практически чистым (n, α)-поглотителем. Это означает, что захват нейтрона бором сопровождается выходом α -частиц. Получающийся при этом Li⁷ имеет существенно меньшие сечения поглощения (рис. 1). Накопление гелия приводит к распуханию поглотителя и к нежелательному силовому воздействию на оболочку пэла со стороны частиц карбида бора. Возникающие напряжения из-за накопления α -частиц являются причиной образования микротрещин в пэлах.

Выгорание В¹⁰ приводит к снижению физической эффективности стержней СУЗ из В₄С. Таким образом, ресурс борного стержня ограничен деструктивным процессом образования интенсивных микротрещин из-за распухания (рис. 2). Для уменьшения деструктивного воздействия поглотителя на оболочку приходится применять различные конструкторские модификации. Следует ожидать, что из-за больших радиационных повреждений карбида бора, прежде всего распухания до 30–40% при

выгорании 40–50% В¹⁰, максимальные ресурсные возможности не будут превышать 900–1000 эфф. сут [1].



Рис. 2. Типичное воздействие нейтронного облучения на пэл из В₄С в реакторе [3]

Особенности гидрида гафния HfH_x

Природный гафний состоит из пяти стабильных изотопов (Hf¹⁷⁶, Hf¹⁷⁷, Hf¹⁷⁸, Hf¹⁷⁹ и Hf¹⁸⁰) и одного очень долгоживущего радиоактивного изотопа, Hf¹⁷⁴ с периодом полураспада от 2×10^{15} лет [6] (табл. 1).

Таблица 1. Состав пр		риродного гафния
	Изотоп	Солеругацие в природної

Изотоп	Содержание в природной смеси	Примечание	
Hf^{174}	0,16%	$2 imes 10^{15}$ лет а	
Hf^{176}	5,26%	стабильный	
Hf^{177}	18,60%	стабильный	
Hf^{178}	27,28%	стабильный	
Hf ¹⁷⁹	13,62%	стабильный	
Hf^{180}	35,08%	стабильный	

Изотопы природного гафния имеют достаточно высокие сечения поглощения, однако в тех же энергиях в основном меньше, чем у В¹⁰ (рис. 3 [5], 4 [5]). Таким образом, необходимы дополнительные меры для обеспечения сопоставимой эффективности. Одним из вариантов решения является смягчение спектра. Поэтому использование гафния в виде гидрида HfH_x может оказаться подходящим для быстрых реакторов. Здесь х — количество атомов водорода на атом гафния, которое составляет от 1 до порядка 1,6. Этот вариант был рассмотрен японскими специалистами [2] для условий

JSFR. Ими было показано, что при отношении водорода к гафнию x = 1,3 в HfH_{1.3}, гидрид гафния обладает такими же ядерными характеристиками, что и B₄C, обогащенный по B¹⁰ на 80%.



Рис. 3. Энергетическая зависимость сечений поглощения изотопов гафния и В¹⁰. Данные из РОСФОНД 2010 [5]



Рис. 4. Энергетическая зависимость сечений поглощения Та¹⁸¹ в сравнении с В¹⁰ (*n*, α). Данные из РОСФОНД 2010 [5]

Остановимся на результатах взаимодействия нейтронов с гафнием. Есть два различия, выгодно отличающих гафний от бора в связи с этой реакцией. Во-первых, происходит испускание γ-квантов и, как следствие, распухание будет наблюдаться в наименьшем числе случаев, в отличие от реакций с бором. Во-вторых, в результате реакции радиационного захвата (рис. 5 [7]) получаются продукты с достаточно высоким сечением взаимодействия.



Рис. 5. Схема радиоактивных превращений Hf (сечения для спектра ВВЭР) [7]

В таблице 2 приведены сечения захвата нейтронов с энергией более 1 МэВ для В¹⁰, Нf без водорода и Hf с водородом. Поскольку изотопы гафния обладают сравнимыми сечениями, можно прогнозировать, что на протяжении нескольких кампаний физическая эффективность гидрида гафния будет снижаться слабо. По предварительным оценкам считается, что ресурс HfH_x окажется в 2–3 раза больше B₄C [1].

Повышенный интерес к гидриду гафния как к перспективному материалу пэлов обусловлен следующими причинами. Во-первых, HfH является радиационно стойким и слабо распухающим материалом. Во-вторых, возможностью кардинального увеличения ресурса.

Химическая формула поглотителя	Нуклиды	Сечение захвата, барн	Продукты захвата	Сечение захвата продуктов, барн
В4С, 80% по В ¹⁰	\mathbf{B}^{10}	2,28	Li ⁷	0,00003
	${ m Hf^{176}}$	0,38	Hf^{177}	1,00
	${ m Hf^{177}}$	1,00	Hf^{178}	0,21
Hf	Hf^{178}	0,21	Hf^{179}	0,63
	${ m Hf^{179}}$	0,63	${ m H}{ m f}^{180}$	0,10
	Hf^{180}	0,10	Ta ¹⁸¹	6,65
	Hf^{176}	1,93	${ m Hf}^{177}$	6,11
	${ m Hf}^{177}$	6,11	Hf^{178}	0,93
$HfH_{1.3}$	Hf^{178}	0,93	Hf^{179}	3,67
	${ m Hf^{179}}$	3,67	$\mathrm{H}\mathrm{f}^{180}$	0,21
	${ m H}{ m f}^{180}$	0,21	Ta ¹⁸¹	6,65

Таблица 2. Сечения захвата бора В^{10b} изотопов гафния без водорода и с водородом из работы [2]

2. РАСЧЁТЫ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ГЕОМЕТРИИ

Гидрид гафния содержит в себе две сильные компоненты: поглотитель и замедлитель. Поэтому локальное поведение нейтронно-физических свойств установки при его введении существенно отличается от варианта с карбидом бора. Для оценки поведения потока и сечений вблизи поглотителя из карбида бора и гидрида гафния проведены расчёты в цилиндрической геометрии.

Модель представляет бесконечную среду составов топливных изотопов зоны малого обогащения реактора типа БН-800 [8] толщиной 90 см. Сверху и снизу граничные условия представляются вакуумом. В эту среду помещается стержень поглотителя радиусом 10 см.

На рисунке 6 показано изменение потока по радиусу модели. Результат вполне предсказуемый – поток падает к центру поглотителя. Падение потока для гидрида гафния $HfH_{1.3}$ больше, чем для карбида бора 60% обогащения по B^{10} . Форма кривой показывает снижение скорости захвата по мере прохождения нейтронов в центральные области поглотителя.



Чем больше водорода в гидриде, тем уменьшение потока больше.

Радиус, см

Рис. 6. Поток около поглотителя

На рисунке 7 показано поведение макросечений поглотителей. Сечение поглощения карбида бора 60% обогащения практически не меняется по радиусу модели. Есть только небольшое снижение к центру поглотителя. Для карбида бора 92%-го обогащения снижение более существенное. Напротив, сечение поглощения гибрида гафния существенно растёт при переходе от топливной композиции к поглотителю. Особенно быстрый рост наблюдается во внешнем слое. В центральной области сечение гидрида гафния существенно больше, чем сечение карбида бора 92%-го обогащения.

Для гидрида гафния эффект от увеличения сечения компенсируется падением потока.



Рис. 7. Распределения макросечений захвата, см⁻¹

3. РАСЧЕТЫ В ГЕКСАГОНАЛЬНОЙ ЯЧЕЙКЕ

Построенная модель и приведенные расчетные условия для этой модели позволяют утверждать, что результаты, полученные в ходе исследования, обладают качественной достоверностью.

Расчетные условия

Вычисления проводились при помощи расчетного программного обеспечения MCNP-5 [9], разработанного национальной исследовательской лабораторией Лос-Аламоса. Данные о ядерных сечениях взяты из библиотеки, в основе которой лежат данные РОСФОНДа-2010[5]. В каждом расчете было зарегистрировано порядка 1,5 миллиона историй нейтронов. На границах модели установлено условие отражения для симуляции потока нейтронов с соседних ячеек активной зоны. В ходе расчетов было обнаружено, что торцевая утечка нейтронов несущественна, поэтому было решено, что дополнительное уточнение в торцевых сторонах модели не является необходимым.

Расчетная модель

Построена модель ячейки активной зоны, которая качественно отражает основные физические процессы, протекающие в ячейке активной зоны БН-800. Рис. 8 представляет картограмму активной зоны реактора БН-800 [10]. Из этой картограммы для построения модели вырезается сектор области малого обогащения, состоящий из семи ячеек. Одна ячейка с поглотителем в окружении шести ячеек с топливом. Рисунок 9 показывает поперечное и продольное сечения модели, по существу вырезанного сектора. Из работы [10] известны геометрические характеристики ячейки активной зоны, например, известен шаг между ячейками — 10,06 см, высота активной зоны — 100 см.

Таким образом, расчетная модель представляет собой две концентрических шестиугольных призмы. Внутренняя призма моделирует регулирующий стержень СУЗ. Призма большего размера моделирует окружающие топливные сборки вокруг стержня. Поперечные размеры призм 10,06 и 30,18 см, соответственно, продольный размер — 100 см. Ячейка, моделирующая окружающие топливные сборки, заполняется МОХ-топливом и закрашена на рис. 9. Размеры ячеек подобраны таким образом, чтобы эффективность системы сохранялась. Кроме того, по боковым сторонам ячейки с топливом задано условие отражения для симуляции потока нейтронов с соседних топливных ячеек активной зоны. В построенной модели не были смоделированы отражающие пластины над ячейками, так как при проведении расчетов было установлено, что утечка нейтронов с торцевых сторон несущественна. Помимо семи пэлов, изображенных на рис. 9, ячейка с поглотителем в данной модели способна вместить в себя в общей сложности 19 пэлов. Диаметр пэла — 19 мм.



Рис. 8. Картограмма активной зоны реактора БН-800 и выделенный сектор зоны малого обогащения для проведения расчетов на модели



Рис. 9. Поперечное и продольное сечения построенной модели на основе выделенной области в активной зоне реактора БН-800

4. СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ В4С И НFHx

Сравнение эффективности стержней из карбида бора и гидрида гафния является ключевым в рассмотрении на потенциальное замещение B_4C на HfH.

Ядерные концентрации В⁴С и НfH

Ядерные концентрации для $HfH_{1.3}$ и природное процентное содержание изотопов Hf были выбраны согласно [2]. Ядерные концентрации для B_4C были взяты согласно данным из [11] для компенсирующих стержней СУЗ, при обогащении 80% по B^{10} . В Таблице 3 приведены значения ядерных концентраций для B_4C и HfH_x . Для удобства принято, что ядерная плотность карбида бора не меняется для различного обогащения по B^{10} . В гидриде гафния ядерные концентрации гафния сохраняются, меняется только концентрация водорода для x=1.0, 1.3, 1.5.

Таблица 3 Ядерные концентрации исследуемого	B ₄ C 80%	обогащения	(по
В ¹⁰), HfH _x (x=1,3) и их плотности			

Химическая формула	Нуклид	Ядерная концентрация, 10 ²⁴ 1/см ³	Процентное содержание ядер, %	Суммарная ядерная кон- центрация, 10 ²⁴ 1/см ³	Плотность, г/см ³
HfH _{1,3}	Hf ¹⁷⁶ Hf ¹⁷⁷ Hf ¹⁷⁸ Hf ¹⁷⁹ Hf ¹⁸⁰ H	0,203e-2 0,720e-2 1,057e-2 0,527e-2 1,365e-2 5,037e-2	5,26 18,6 27,28 13,62 35,24	8,912e-2 ⁽¹⁾	11,57
B ₄ C	B ¹⁰ B ¹¹ C	5,924e-2 1,481e-2 1,852e-2	80 20	9,257e-2	1,62

(1) из работы [2].

Расчет эффективности В4С (80, 60, 20%) и HfH_x (x=1,0, 1,3, 1,5)

Результаты, полученные японскими специалистами в работах [2, 3] для реактора на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем четвертого поколения JSFR, серийное строительство которых ожидается в 2030 – 2040 гг., свидетельствуют об успешной потенциальной замене стержней из карбида бора. В этом исследовании проверяется такая возможность для российских быстрых реакторов.

В Таблице 4 представлены результаты расчета эффективности стержня из карбида бора B_4C при разной степени обогащения по B^{10} , а также эффективность для стержня из гидрида гафния HfH_x при разном отношении водорода к гафнию (x = 1,0, 1,3, 1,5).

Vonue	Доля	Эффективность $\Delta k/kk'$, (%)					
ство пэл	HfH в ячейке	B-10 (20%)	B-10 (60%)	B-10 (80%)	HfH _{1.0}	HfH _{1.3}	HfH _{1.5}
1	0,043	0,28	1,16	1,68	0,17	0,24	0,16
3	0,129	0,72	3,65	5,05	0,94	1,20	1,40
5	0,216	1,56	6,09	8,10	2,36	3,19	3,97
7	0,302	2,45	8,64	10,99	4,92	6,60	7,84
9	0,388	3,39	10,99	13,93	6,96	9,19	10,62
11	0,474	4,34	13,46	16,83	9,15	11,93	13,63
13	0,561	5,46	15,73	19,46	11,68	14,80	17,03
15	0,647	6,49	18,00	22,21	14,41	18,28	20,47
17	0,733	7,62	20,12	24,61	17,16	21,20	23,85
19	0,820	8,87	22,23	27,04	19,84	24,47	27,16
Весь							
объем, S_{Σ}	1,000	16,37	33,84	39,74	34,91	40,73	43,80

Таблица 4. Результаты расчета эффективности для разной степени обогащения В¹⁰ и разном отношении водорода к гафнию

При проведении расчетов на физическую эффективность было установлено, что при малой доле поглотителя в ячейке, моделирующей стержень, эффективность HfH_x намного меньше, чем у B₄C, даже при небольшом обогащении по B¹⁰. С другой стороны, по мере заполнения ячейки гидридом гафния оказалось, что при большей доле HfH в ячейке разность между эффективностью HfH и B₄C уменьшается. Таким образом, можно добиться того, что эффективности B₄C и HfH окажутся практически одинаковыми. Однако при дальнейшем увеличении количества HfH в ячейке можно добиться того, что эффективности гидрида гафния станет выше, чем у B₄C.

Такое наблюдение объясняет факт того, что в работе [2] $HfH_{1.3}$ эквивалентен в эффективности с B_4C (80% по B^{10}), потому что в стержнях регулирования JSFR пэлы располагаются плотно и сама ячейка больше (20,6 см в японском исследовании (рис. 10)/10,06 см в этом исследовании). Однако начальные расчеты на примере штатного стержня СУЗ (рис. 11 [13]) показывали, что HfH однозначно уступает в эффективности карбиду бора.



Рис. 10. Ячейка японского исследования

Рис. 11. Штатный стержень СУЗ [13]

Из рисунка 12 видно, что при малой доле HfH_x в ячейке его эффективность явно проигрывает B_4C , даже при x = 1,5. По мере увеличения количества HfH_x его эффективность растет быстрее, чем эффективность B_4C . На количестве в 15 пэл ($S_{norn}/S_{\Sigma} \approx 0,65$) эффективность $HfH_{1.3}$ эквивалентна эффективности B^4C (60%). Однако $HfH_{1.5}$ эффективнее B_4C (60%) еще на 11 пэлах (доля $\approx 0,48$). При доли гидрида около 0,92 объема ячейки, эффективность $HfH_{1.3}$ близка к B_4C (80%). Одновременно, при 19 пэлах (доля $\approx 0,82$) эффективность $HfH_{1.5}$ выше, чем B_4C (80%).

Таким образом, чем выше загрузка HfH_x в объеме стержня СУЗ, тем меньше разница в эффективности между B_4C и HfH_x . При увеличении содержания водорода в HfH или увеличении его количества в ячейке можно добиться большей эффективности, чем у B_4C .



Рис. 12. Кривые эффективности для B₄C и HfH_x при увеличении количества поглотителя

5. СПЕКТР НЕЙТРОНОВ В СЛУЧАЕ НFH_x И В₄С

В этом разделе объясняется причина получения данного результата.

Смягчение нейтронного спектра является одной из причин увеличения эффективности стержней из HfH. Поскольку наличие водорода позволяет смягчить спектр в области ячейки с поглотителем, то одновременно с этим растет сечение захвата ядер Hf. На рис. 13 представлен нейтронный спектр для почти полностью заполненной ячейки (0,82) с материалом поглотителя. Рисунок 13 даёт явное представление о преобладании теплового потока у гидрида гафния над карбидом бора. На рис. 14 представлены макроскопические сечения B₄C (60 и 80%) и HfH_x (x = 1,3, 1,5). Из рис. 14 видно, что макросечение карбида остается практически неизменным по мере заполнения ячейки поглотителя, в то время как с гидридом гафния ситуация обратная, наблюдается практически линейный рост.



Рис. 13. Нейтронный спектр для различных случаев обогащения карбида и разного отношения H/Hf



Рис. 14. Макроскопическое сечение в ячейке с поглотителем

Уменьшение энергии нейтронов из-за замедления водородом приводит к росту сечения Hf как «1/v». Рост сечения и потока тепловых нейтронов в ячейке с замедлителем приводит к росту скорости реакции захвата (рис.15). Поскольку содержание водорода в HfH позволяет значительно увеличить количество тепловых нейтронов, то сначала скорость захвата увеличивается. Примерно при половине занятой ячейки HfH, скорость выходит на плато – равное количество родившихся тепловых нейтронов и их убыль из-за захвата. После наблюдается спад кривой скорости захвата, по большей мере связанный с эффектом самоэкранировки. Однако в случае B₄C имеет место нисходящий тренд. В карбиде бора ядра водорода отсутствуют, значит «лишним» тепловым нейтронам появиться неоткуда и, соответственно, наблюдается спад скорости захвата.

С точки зрения физического объяснения данной закономерности можно рассуждать так. При увеличении количества HfH растет количество ядер водорода. Хорошо известно, что водород — лучший замедлитель среди всех ядер. Поскольку его количество растет в рабочем объеме ячейки-замедлителя, то можно предположить, что нейтронный спектр смягчается сильнее, чем в случае B₄C. Таким образом, увеличивается поток тепловых нейтронов, которые затем эффективно захватываются ядрами Hf.



Рис. 15. Макроскопическая скорость захвата

выводы

Выявлено, что:

1. Разница между эффективностями HfH_x и B₄C определяется долей, занимаемой поглотителем в ячейке.

2. Существенная зависимость эффективности HfH_x от количества поглотителя объясняет, почему в работах [3, 4] японских специалистов HfH почти также эффективен как B_4C , в то время как при оценочных расчетах HfHоднозначно уступал карбиду при его замене в условиях российских быстрых реакторах.

3. Лучшая эффективность HfH при большом количестве гидрида в стержне может объясняться более глубоким смягчением спектра при увеличении количества водорода.

4. Содержание водорода в HfH позволяет значительно увеличить количество тепловых нейтронов, из-за чего скорость захвата сначала вырастает, затем максимум – равное количество тепловых нейтронов и убыль изза захвата. После – монотонный спад, как у B₄C, по большей мере связанный с эффектом самоэкранировки.

5. Геометрическая составляющая имеет вклад в эффективность стержней.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рисованый В.Д., Захаров А.В., Клочков Е.П. Поглощающие материалы и стержни СУЗ инновационных ядерных реакторов // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. — 2011. — № 1. — С. 240—248.

2. K. Ikedaa, H. Moriwakia, Y. Ohkuboa, et al. Application of hafnium hydride control rod to large sodium cooledfast breeder reactor. *Nuclear Engineering and Design*. Vol 278 (2014) p. 97–107

3. T. Iwasaki & K. Konashi. Development of Hydride Absorber for Fast Reactor—Application of Hafnium Hydride to Control Rod of Large Fast Reactor. *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 46 (2009), No. 8, p. 874–882

4. K. Konashi, M. Yamawaki. Utilization of Hydride Materials in Nuclear Reactors. *Advances in Science and Technology*. Vol 73 (2010) p. 51-58

5. IPPE, Institute for Physics and Power Engineering: ROSFOND. — Режим доступа: http://www.ippe.ru/podr/abbn/libr/intr-rosfond.php/.

6. Википедия: свободная энциклопедия. — Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Изотопы_гафния/.

7. Ефимов А.В., Ажажа В.М., Пилипенко Н.Н., Мухачев А.П. Гафний — перспективный материал для ядерной энергетики // Вестник Харьковского политехнического института. — 2004. — № 23. — С. 37—44

8. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Transient and accident analysis of a BN-800 type LMFR with near zero void effect. TECDOC Series, 2000.

9. X-5 Monte Carlo Team: MCNP-A general Monte Carlo N-particle transport Code, Version 5, 2003.

10. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Fast Reactor Database 2006 Update. TECDOC Series, 2006.

11. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Working materials: Updated Codes and Method reduce the Calculational Uncertainties of Liquid Metal Fast Reactor. IAEA-RC-803.4, TWG-FR/113 Vienna, Austria, 2003

12. Рисованый В.Д., Захаров А.В., Гусева Т.М., Гаджиев Г.И., Тейковцев А.А. Опыт исследования поглощающих материалов и стержней регулирования реактора бор-60 и перспективы его использования в инновационных реакторах на быстрых нейтронах // Сборник трудов АО ГНЦ НИИАР. — 2010. — № 1. — С. 15—26.