

- защиты. — Изв. вузов. Ядерная энергетика, 1995, № 1, с. 20—31.
3. Сироткин А.М., Терновых М.Ю. Вычисление интеграла столкновений методом локального интегрирования дельта-функции. — В кн.: Методы и алгоритмы в исследованиях физики ядерных реакторов. М.: Энергоатомиздат, 1987, с. 59—63.
 4. Колесов В.В., Крючков Э.Ф., Терновых М.Ю., Тихомиров Г.В. Файлы ядерных данных и их использование в нейтронно-физических расчетах. Учебное пос. М., НИЯУ МИФИ, 2014.
 5. Андрианов А.Н., Баранов В.Г., Тихомиров Г.В., Хлунов А.В. Моделирование ядерно-физических процессов в поверхностном слое топливного сердечника. — Атомная энергия, 2008, т. 104, вып. 6, с. 353—358.
 6. Баранов В.Г., Терновых М.Ю., Тихомиров Г.В., Хлунов А.В. Моделирование ядерно-физических процессов в поверхностном слое топливного сердечника с выгорающим поглотителем. — Там же, 2008, т. 105, вып. 6, с. 307—310.
 7. Куликов Г.Г., Шмелев А.Н., Крючков Э.Ф. и др. Физические характеристики легководного ядерного реактора со сверхдлинной кампанией ториевого топлива. — Изв. вузов. Ядерная энергетика, 2002, № 1, с. 18—28.
 8. Крючков Э.Ф., Терновых М.Ю., Тихомиров Г.В. и др. Топливные циклы с глубоким выгоранием: анализ коэффициентов реактивности. — Там же, 2004, № 3, с. 70—78.
 9. Апсэ В.А., Куликов Г.Г., Шмелев А.Н., Сироткин А.М. О возможности улучшения нейтронно-физических и теплогидравлических параметров энергетических быстрых реакторов при использовании радиоактивного свинца в качестве теплоносителя. — Ядерная физика и инжиниринг, 2010, т. 1, № 5, с. 387—397.
 10. Сироткин А.М., Апсэ В.А., Шмелев А.Н. Комплекс программ TIME26D — модернизация программы TIME26 для нейтронно-физических расчетов быстрых реакторов в двумерной r — z -геометрии. — Там же, 2013, т. 4, № 2, с. 101—108.
 11. SCALE: a Modular Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation. Ver. 5. ORNL/TM-2005/39, v. I—III.
 12. Khromov V.V., Kryuchkov E.F., Tikhomirov G.V. et al. Probabilistic method of discrete ordinates in a neutron transport problem. — Nucl. Sci. Engng, 1995, v. 121, p. 264—276.

Поступила в Редакцию 1.11.2013

УДК 621.039.51

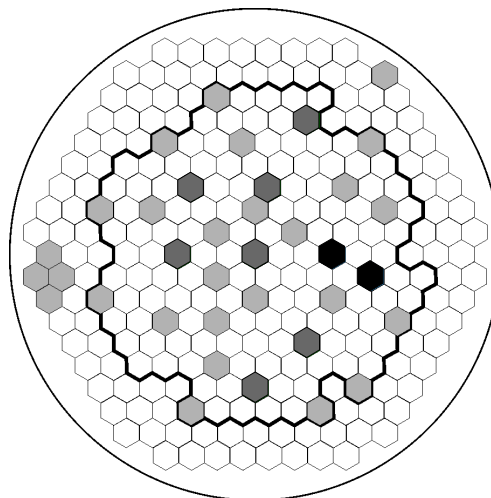
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В БОР-60 И АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ПРОДОЛЖЕНИЯ В МБИР

*Жемков И.Ю., Ижutow А.Л., Новоселов А.Е., Погляд Н.С., Святкин М.Н.
(ОАО «ГНЦ НИИАР», г. Димитровград)*

Проводимые в настоящее время в БОР-60 экспериментальные исследования направлены на обоснование новых перспективных материалов, возможности повышения максимального выгорания топлива и достижения предельной повреждающей дозы (рис. 1).

Экспериментальные исследования в БОР-60. Ресурсные испытания ядерных материалов в реакторах длительны по времени. Так, для достижения повреждающей дозы стали примерно 200 смещ./ат., которая закладывается в перспективные проекты быстрых реакторов, облучение должно длиться 10—15 лет. Экспериментальные исследования в БОР-60 в последние годы эксплуатации будут зависеть от возможности их продолжения после окончательного останова. Очевидно, что такие испытания не могут быть выполнены за оставшееся до окончательного останова реактора время. Таким образом, продолжение экспериментальных исследований в МБИР является важной составляющей проекта [1, 2].

В настоящей статье рассмотрены основные направления исследований и типы экспериментальных устройств, используемые для облучения материалов в БОР-60.



Р и с. 1. Картограмма загрузки реактора БОР-60 на начало 2013 г.: ■ — РО СУЗ; □ — экспериментальные ТВС; ● — материаловедческий пакет; ○ — ТВС

Основные исследования конструкционных материалов (сталь, сплавы, поглотители, замедлители) следующие:

низкотемпературное облучение (320—350 °С) в экспериментальных устройствах, в которых за счет высокого расхода натрия, протекающего через устройство, обеспечивается его низкий подогрев (5—30 °С). Такие устройства можно устанавливать в любую ячейку реактора, для высокого расхода натрия (4—8 м³/ч) их запитывают натрием из камеры высокого давления;

облучение при средней температуре (350—450 °С) в экспериментальных устройствах с размещением образцов в герметичных ампулах. Требуемая температура обеспечивается посредством выбора ячейки (удельного тепловыделения) в реакторе, расхода натрия через экспериментальное устройство и частично конструкции ампулы, например, включения в состав устройства дополнительных нагревателей, как правило, из стали или вольфрама. Образцы в ампулах находятся, в основном, в натрии. Такие экспериментальные устройства обычно устанавливают в ячейки активной зоны реактора;

высокотемпературное облучение (450—700 °С и выше) в экспериментальных устройствах с размещением образцов в теплоизолированных ампулах. Необходимая температура образцов достигается за счет подбора толщины теплоизолирующего зазора и его состава, как правило, газа (аргон, гелий и их смеси). Образцы в ампулах могут находиться в различных средах (натрий, свинец—висмут, свинец, газ). Такие устройства можно устанавливать в любую ячейку реактора, но обычно их располагают в ячейках активной зоны;

высокотемпературное облучение (450—700 °С) в экспериментальных устройствах с подогревом твэлов. В них образцы находятся в проточном натрии. Необходимая температура образцов достигается посредством подогрева натрия на расположенном в нижней части экспериментального устройства пучке твэлов за счет изменения загрузки и обогащения ядерного топлива, аксиального расположения твэлов и расхода натрия через сборку. Такие экспериментальные устройства можно устанавливать в любую ячейку реактора.

Температурные условия облучения ядерного топлива разного типа и обогащения и облучки твэла определяются линейной мощностью твэлов и в меньшей степени расходом натрия через сборку. Требуемая температура обеспечивается за счет выбора ячейки (тепловыделения) в реакторе, расхода натрия через экспериментальное устройство, изменения обогащения ядерного топлива, иногда и параметров твэлов.

Размеры экспериментального устройства определяются габаритами ТВС. Исследуемые образцы обычно располагаются в области активной части тепловыделяющей сборки, высота которой составляет 450 мм, иногда они могут находиться и в области торцевых зон воспроизводства. Радиальные размеры определяются внутренним размером «под ключ» до 42 мм, диаметр ампул, в которых размещаются образцы, составляет 32—38 мм.

Следует отметить, что почти все экспериментальные устройства для теплоизоляции образцов от соседних ТВС по конструкции двухчехловые (размер внутреннего чехла «под ключ» 38×0,8 мм). В результате полезный объем в экспериментальном устройстве существенно уменьшается, образцы размещаются столь плотно, что сложно обеспечить достаточную равномерность распределения температуры по образцам.

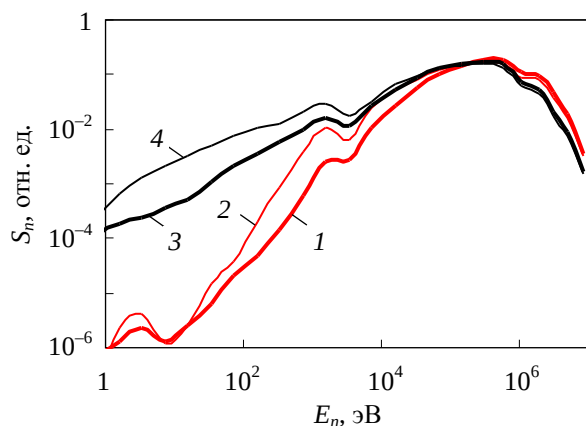
В настоящее время в БОР-60 начаты испытания перспективных топливных композиций и конструкционных материалов, рассчитанные на облучение до его останова и продолжение исследований в МБИР. В БОР-60 облучают:

перспективные конструкционные материалы до достижения повреждающей дозы 150—300 смещ./ат., т.е. предполагается облучение в течение 5—6 лет в БОР-60 (80—120 смещ./ат.), затем в МБИР;

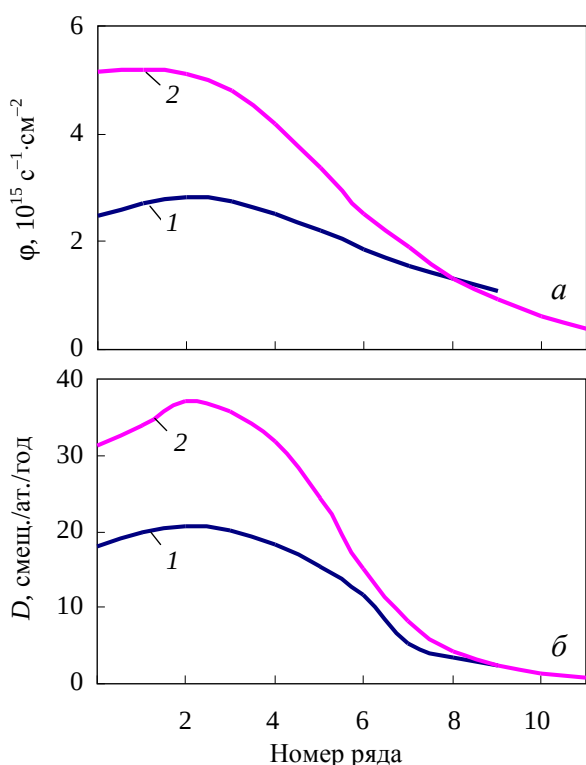
топливо обогащением до 20% до выгорания 12—15% тяж. ат., т.е. облучение в течение 5—6 лет в БОР-60 (достижение выгорания 6—8% тяж. ат.), затем в МБИР.

Результаты исследований обеспечат пуск новых перспективных реакторов и позволят обосновать возможности продления срока эксплуатации действующих.

Условия облучения в БОР-60 и МБИР. На рис. 2, 3 сравниваются основные параметры реакторов с точки зрения их влияния на воз-



Р и с. 2. Спектр нейтронов в центре активной зоны БОР-60 (1), МБИР (2) и боковом экране БОР-60 (3), МБИР (4)



Р и с. 3. Радиальное распределение плотности потока нейтронов (а) и повреждающей дозы (б) в центральной плоскости активной зоны БОР-60 (1), МБИР (2)

возможность продолжения облучения, начатого в БОР-60.

Основные характеристики БОР-60 и планируемые характеристики МБИР следующие:

	БОР-60	МБИР
Плотность потока нейтронов в активной зоне, $10^{15} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2} \dots$	2,2—2,9	2,5—5,2
Доля плотности потока нейтронов $E > 0,1 \text{ МэВ}$, отн. ед.:		
активная зона . . .	0,72—0,8	0,65—0,72
боковой экран . . .	0,45—0,65	0,25—0,6

Средняя энергия нейтронов в активной зоне, кэВ	120—300	100—190
Скорость накопления повреждающей дозы в стали в год, смещ./ат. . . .	3—22	1—38

Отметим главные отличия условий облучения и параметров реакторов:

полезный объем, в котором находятся исследуемые материалы, внутри чехла ТВС БОР-60 составляет 686 см^3 , МБИР — 2280 см^3 и существенно выше при использовании петлевых каналов;

максимальная плотность потока нейтронов и скорость набора повреждающей дозы в МБИР выше примерно в 1,8 раза;

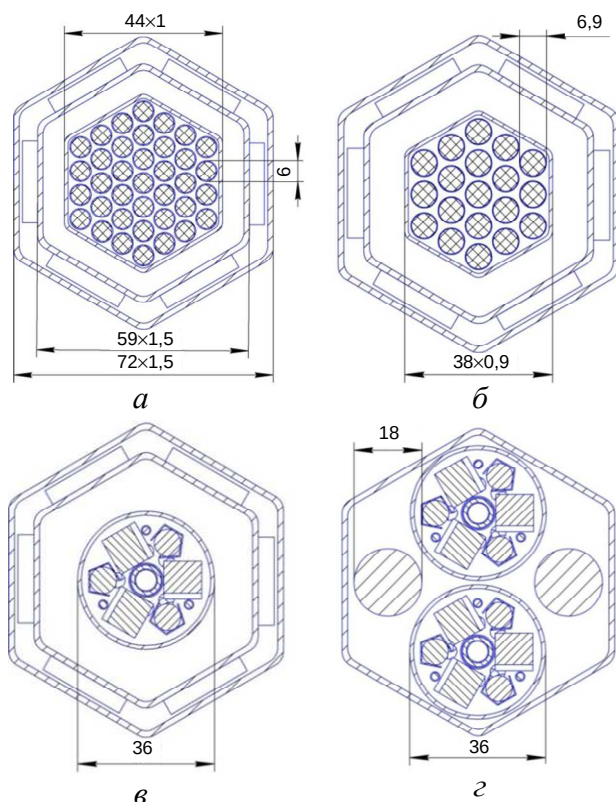
в активной зоне МБИР больше доля низкоэнергетических нейтронов, чем в БОР-60;

температура натрия на входе в БОР-60 на 35°С ниже;

в активной зоне БОР-60 одна инструментальная ячейка, в МБИР три ячейки в активной зоне и три петлевых канала каждый по семь ячеек, один петлевой канал в центре активной зоны и два в боковом экране.

Видно, что по геометрическим параметрам продолжение облучения в реакторе МБИР возможно. Радиальные размеры ТВС МБИР существенно больше, что позволит свободно разместить в них ампулы (пучки твэлов, подвески с образцами). На рис. 4, а показано сечение 37-твэльной штатной ТВС БОР-60, размещенной в двухчехловой ТВС МБИР, на рис. 4, б — 19-твэльной экспериментальной ТВС БОР-60 (внешнего второго чехла ТВС при этом нет), на рис. 4, в — облучательное устройство БОР-60 в чехле сборки МБИР, на рис. 4, г — вариант размещения сразу двух экспериментальных устройств БОР-60, которое возможно только для подвесок с внешним диаметром наружной оболочки не более 36 мм.

По удельному тепловыделению в ядерном топливе, которое при близких спектрах нейтронов определяется плотностью потока нейтронов, также возможно сохранение условий облучения. В МБИР можно подобрать ячейку примерно с теми же потоками нейтронов и соответственно тепловыделением, что и в БОР-60. Такие ячейки в МБИР будут находиться на периферии активной зоны или в боковом экране (см. рис. 3, а).



Р и с. 4. Возможное размещение образцов, облученных в БОР-60, в экспериментальном устройстве МБИР

В МБИР максимальная плотность потока нейтронов и повреждающая доза выше, чем в БОР-60, поэтому возможны ускоренные испытания при постановке экспериментального устройства в ячейки с более высокими параметрами. В этом случае условия облучения в МБИР твэлов (мощность, температура), конструкционных материалов (температура) в составе теплоизолированных ампул будут отличаться, должны быть полностью заменены ампулы (подобраны размеры теплоизолирующих зазоров), в которых размещены исследуемые образцы, условия облучения конструкционных материалов в ампулах и образцов в экспериментальном устройстве с подогревом твэлов могут быть сохранены посредством увеличения расхода натрия через экспериментальное устройство и/или изменения мощности подогревателя, а также смены твэлов (обогащение ядерного топ-

лива, диаметр твэлов) и соответствующего подбора расхода натрия.

Температура натрия на входе в МБИР выше, чем в БОР-60. Поэтому низкотемпературное облучение в штатных ячейках возможно только в случае снижения температуры натрия на входе, что, как показал опыт эксплуатации БОР-60, принципиально возможно. Следует отметить, что отдельные низкотемпературные испытания могут быть проведены в петлевых каналах МБИР.

Идентичность облучения исследуемых материалов в МБИР условиям в БОР-60 может быть обоснована:

применением аттестованных и верифицированных кодов, методик и расчетных моделей;

экспериментальным определением основных параметров с использованием инструментальных ячеек, флюенса и набора плавких мониторов.

Закключение. Исследования показали, что облучение ядерных материалов, начатое в БОР-60, может быть продолжено в МБИР. До пуска МБИР необходимо отработать перестановку исследуемых образцов из экспериментального устройства БОР-60 в МБИР и разработать конструкции новых экспериментальных устройств.

МБИР позволит продолжить начатые в БОР-60 облучательные программы и экспериментальные исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жемков И.Ю., Третьяков И.Т., Лопаткин А.В. и др. От БОР-60 к реактору МБИР: преемственность и развитие. Роль реактора БОР-60 в инновационном развитии атомной отрасли. — В сб.: Научно-технич. сем., посвященный 40-летию реактора БОР-60. Дмитровград, ОАО «ГНЦ НИИАР», 2010, с. 125—132.
2. Svyatkin M.N., Izhutov A.L., Zhemkov I.Yu. Purpose and priority tasks of a multi-function fast research reactor. — In: Intern. Conf. on Fast Reactors and Related Fuel Cycles. Japan, 7—11 Dec. 2009, p. 631—632.

Поступила в Редакцию 06.11.13