

ПОВЫШЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА НЕЙТРОНОВ В МНОГОЦЕЛЕВОМ БЫСТРОМ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ РЕАКТОРЕ

В.А. Черный, Л.А. Кочетков, И.В. Бурьевский, В.Ю. Стогов

ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск

Р

Представлена информация о расчетах поисковых технических решений, их адаптации к активной зоне проектируемого МБИР для существенного повышения в ней (~ в два раза) максимальной величины плотности потока нейтронов до $1 \cdot 10^{16}$ н/см²с. Показано, что при подъеме тепловой мощности реактора от 150 до 280 МВт с одновременным уменьшением диаметра твэла активной зоны с 6.0 до 4.1 мм максимальная плотность потока нейтронов может составить $\sim 1 \cdot 10^{16}$ н/см²с.

Ключевые слова: многоцелевой быстрый исследовательский реактор (МБИР), тепловая мощность, диаметр твэла активной зоны, плотность потока нейтронов.

Key words: multi-function fast research reactor (MBIR), thermal power, core fuel pin diameter, neutron flux density

ВВЕДЕНИЕ

22 ноября 2007 г. на заседании НТС №1 Росатома «Ядерные реакторы и атомная энергетика» было принято судьбоносное в сфере экспериментальных реакторов решение о создании многофункционального исследовательского реактора на быстрых нейтронах, необходимого для обоснования инновационных проектов атомной энергетике. Это решение представлено в федеральной целевой программе «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010–2015 гг. и до 2020 г.» (раздел 2.1. «Создание многоцелевого исследовательского реактора на быстрых нейтронах МБИР») [1].

Основными разработчиками МБИР (ОАО «НИКИЭТ», ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ», ОАО «Головной институт ВНИПИЭТ», ОАО «ГНЦ НИИАР», ОАО «ОКБМ-АФРИКАНТОВ», ОАО «ОКБ ГИДРОПРЕСС») в рамках ответственности сформулированы его основные концептуальные положения, предложены конструктивно-схемные решения реактора, проведены физические и теплогидравлические расчеты активной зоны и по результатам анализа этих работ согласованно приняты значения главных технических характеристик [2, 3]:

- мощность реактора 150 МВт;
- максимальная плотность потока нейтронов не ниже $5 \cdot 10^{15}$ н/см²с.

Планируется, что МБИР должен прийти на смену исследовательским реакторам на быстрых нейтронах БР-10 и БОР-60. Первый из них уже выводится из эксплуатации. Срок эксплуатации БОР-60 пока продлен до 2015 г. Максимальная

© **В.А. Черный, Л.А. Кочетков, И.В. Бурьевский, В.Ю. Стогов, 2013**

плотность потока нейтронов в БОР-60 составляет около $3.5 \cdot 10^{15}$ н/см²с [4].

В настоящее время БОР-60 является единственным исследовательским реактором на быстрых нейтронах, способным решать большую часть задач, требуемых для разработки энергетических реакторов. Проектный срок эксплуатации БОР-60 истек в 2009 г. В этом же году в ФЦП ЯЭНП было включено «Техническое перевооружение опытного реактора на быстрых нейтронах тепловой мощностью 60 МВт» (раздел 2.2) с выделением бюджетного финансирования необходимых работ для обоснования продления срока эксплуатации РУ БОР-60 до 2020 г.

Как видно, величина максимальной плотности потока нейтронов в МБИР будет значительно больше, чем в БОР-60. Тем не менее, ее увеличение является постоянной актуальной задачей. Это стремление мотивируется тем, что рассматриваемая характеристика является одной из основных, которые определяют эффективность экспериментальных работ, проводимых на исследовательском реакторе.

В статье представлены результаты расчетов поисковых технических решений, их адаптация к активной зоне проектируемого МБИР для существенного (~ в два раза) повышения в ней максимальной величины плотности потока нейтронов (от $\sim 5 \cdot 10^{15}$ до $\sim 1 \cdot 10^{16}$ н/см²с).

Следует отметить, что заметного (~ 10 %) повышения максимальной величины плотности потока нейтронов можно достичь без форсирования тепловой мощности реактора при сохранении объема активной зоны путем следующих технических решений или их комбинаций: выравнивание поля тепловыделения по радиусу активной зоны (две зоны обогащения топлива), использование вместо мокс-топлива других видов топлива, использование в боковом экране вместо стали материалов с более эффективными отражающими свойствами.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БЫСТРЫХ НАТРИЕВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕАКТОРОВ

В таблице 1 представлены основные характеристики быстрых натриевых экспериментальных реакторов [4].

Данные таблицы (2006 г.) показывают, что наибольшая величина максимальной плотности потока нейтронов ($0.7 \cdot 10^{16}$ н/см²с) достигнута в реакторе FFTF. Номинальная тепловая мощность реактора FFTF, равная 400 МВт, существенно выше, чем в других сравниваемых реакторах. Это подтверждает, что основной путь существенного подъема величины плотности потока нейтронов заключен в увеличении тепловой мощности реактора.

Заслуживает внимания информация об экспериментальном реакторе на быстрых нейтронах FBTR (Индия), представленная директором Центра атомных исследований им. Индиры Ганди доктором Балдевом Раджем в 2011 г. [5].

Из этого сообщения следует выделить два фактора:

- продление срока службы реактора еще на 20 лет (до 2030 г.);
- после 2020 г. Индия приступит к созданию исследовательского быстрого реактора мощностью, что особенно важно, 300 МВт (тепловых).

ВОЗМОЖНЫЙ ПУТЬ РЕШЕНИЯ ПОСТАВЛЕННОЙ ЗАДАЧИ

Основной возможный путь решения поставленной задачи и, вероятно, единственный при сохранении объема активной зоны и применении отработанных на других реакторах материалов и конструкции твэла – это повышение тепловой мощности реактора (удельного тепловыделения в активной зоне) примерно в два раза и увеличение количества твэлов в два раза, чтобы не превысить допустимую тепловую нагрузку на твэл, равную 50 кВт/м.

Таблица 1

Основные характеристики экспериментальных быстрых натриевых реакторов

Реактор	RAPSODIE	FBTR	РЕС	JOYO	BOR-60
Страна	Франция	Индия	Италия	Япония	Россия
Год физического пуска	1967	1985	Сооружение остановлено в 1988 г.	1982	1968
Номинальная тепловая мощность реактора, МВт	40	40	120	50–75–100	60
Топливо	(UPu)O ₂	(UPu)C	(UPu)O ₂	(UPu)O ₂	(UPu)O ₂
ТВС, шт.	64–73	76	78	48–67–83	75–110
Твэлы, шт.	61	61	91	91–127	37
Внешний диаметр / толщина оболочки твэльной трубки, мм	5.1/0.37	5.1/0.37	6.7/0.45	5.5/0.35	6.0/0.3
Обогащение топлива, %	30	55	28.5	36–48	45
Эквивалентный диаметр / высота активной зоны, мм	446/320	492/320	833/650	730/550	460/450
Максимальное / среднее тепловыделение в топливе активной зоны, кВт/л топлива	3060/2210	2344/1806	1384/930	2195/1225	1940/1615
Максимальная / средняя плотность потока нейтронов в активной зоне, $\times 10^{15}$ н/см ² с	3.2/2.3	3.4/2.5	4.0/2.6	5.1/2.6	3.5/2.5
Реактор	EBR-II	FERMI	FFTF	BR-10	CEFR
Страна	США	США	США	Россия	Китай
Год физического пуска	1961	1963	1980	1958	2011
Номинальная тепловая мощность реактора, МВт	62.5	200	400	5–8	65
Топливо	U-Zr	U met	(UPu)O ₂	PuO ₂	UO ₂
ТВС, шт.	127	105	28/45	86–90	82
Твэлы, шт.	91	140	217	7	61
Внешний диаметр / толщина оболочки твэльной трубки, мм	4.42/0.305	4.01/0.127	5.84/0.38	8.4/0.4	6.0/0.4
Обогащение топлива, %	67	25.6	20.3/24.6	90	65
Эквивалентный диаметр / высота активной зоны, мм	697/343	831/775	1202/914	206/400	606/500
Максимальное / среднее тепловыделение в топливе активной зоны, кВт/л топлива	2704/1610	2774/1642	1857/1114	2182/1588	1867/1132
Максимальная / средняя плотность потока нейтронов в активной зоне, $\times 10^{15}$ н/см ² с	2.7/1.6	4.5/2.6	7.0/4.2	0.86/0.63	2.97/1.76

Повышение удельного тепловыделения как основной фактор подъема плот-

ности потока нейтронов в исследовательских реакторах, охлаждаемых не жидким металлом, а водой, рекомендовано в работе [6].

Конкретные характеристики предлагаемого технического решения состоят в следующем.

Исходная компоновка активной зоны базируется на ТВС, в которой содержится 91 твэл (шесть рядов) с размером твэльной трубки 6.0×0.3 мм [3]. Предлагается в исходной ТВС добавить два ряда твэлов. Для их (169 твэлов) размещения, естественно, потребуется уменьшение внешнего диаметра твэльной трубки. Конструктивные проработки показали, что для реализации этого технического решения потребуется твэл с размером твэльной трубки 4.1×0.25 мм. В итоге количество твэлов в ТВС увеличивается в 1,86 раза и, соответственно, тепловая мощность реактора поднимается до 280 МВт.

Следует отметить, что такие «тонкие» твэлы использовались в реакторах EBR-II и FERMI (США), в которых размеры твэльной трубки были равны 4.42×0.305 мм и 4.01×0.127 мм соответственно (см. табл. 1).

Для сравнения рассмотрен также путь увеличения максимальной плотности потока нейтронов за счет подъема тепловой мощности реактора до 280 МВт без уменьшения внешнего диаметра твэльной трубки, т.е. с использованием исходной твэльной трубки с размером 6.0×0.3 мм. Чтобы реализовать такое техническое решение без превышения допустимого уровня тепловой нагрузки на твэл, необходимо довести в соответствии с расчетами количество исходных ТВС до 176-ти, что даст рост числа твэлов. Этот путь решения ведет, что вполне очевидно, к росту диаметра активной зоны и, соответственно, к увеличению диаметра корпуса реактора.

МЕТОДЫ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

Нейтронно-физические расчеты РУ МБИР с рассматриваемыми компоновками активной зоны проводились в трехмерной (гекс, z)-геометрии в диффузионном приближении с использованием программы TRIGEX [7].

В программе TRIGEX расчет нейтронно-физических макроконстант для решения диффузионного уравнения и заблокированных микроконстант для расчета выгорания осуществлялся с помощью системы подготовки констант CONSYST [8], использующей систему ядерно-физических констант БНАБ-93 [9].

Известно, что результаты нейтронно-физических расчетов реакторов типа МБИР в диффузионном приближении имеют существенные погрешности. Поэтому расчеты необходимо проводить с использованием программ, в которых реализованы более точные методы решения уравнений переноса нейтронов (метод Монте-Карло), или вводить соответствующие поправки.

В частности, расчетные критические состояния РУ МБИР для используемых программ и констант на основании результатов анализа погрешностей вычислений физических характеристик активной зоны реактора CEFR отождествлялись с расчетными значениями эффективного коэффициента размножения нейтронов, равными 0.98.

Решение поставленной задачи определялось на основе сравнения полученных расчетных величин, т.е. анализировалось относительное изменение расчетных величин, а не их абсолютные значения.

ИСХОДНАЯ КОМПОНОВКА АКТИВНОЙ ЗОНЫ И РЕЖИМ РАБОТЫ РЕАКТОРА

Для проведения расчетных исследований в качестве исходной компоновки активной зоны использовался вариант (рис. 1) с ТВС на базе твэлов диаметром 6.0 мм [3].

В работе расчеты выполнены для основного проектного режима работы РУ МБИР. Это стационарный режим перегрузок с постоянным числом используемых ТВС активной зоны и с постоянным интервалом между перегрузками от начала до конца цикла. Длительность интервала между перегрузками (время цикла), согласно требованиям [3], ограничена величиной 120 эффективных суток. Кампания ТВС определялась исходя из требований на максимальные значения выгорания топлива и повреждающей дозы стали для оболочки твэла, которые не должны превышать, соответственно, 14% т.а. и 90 сна.

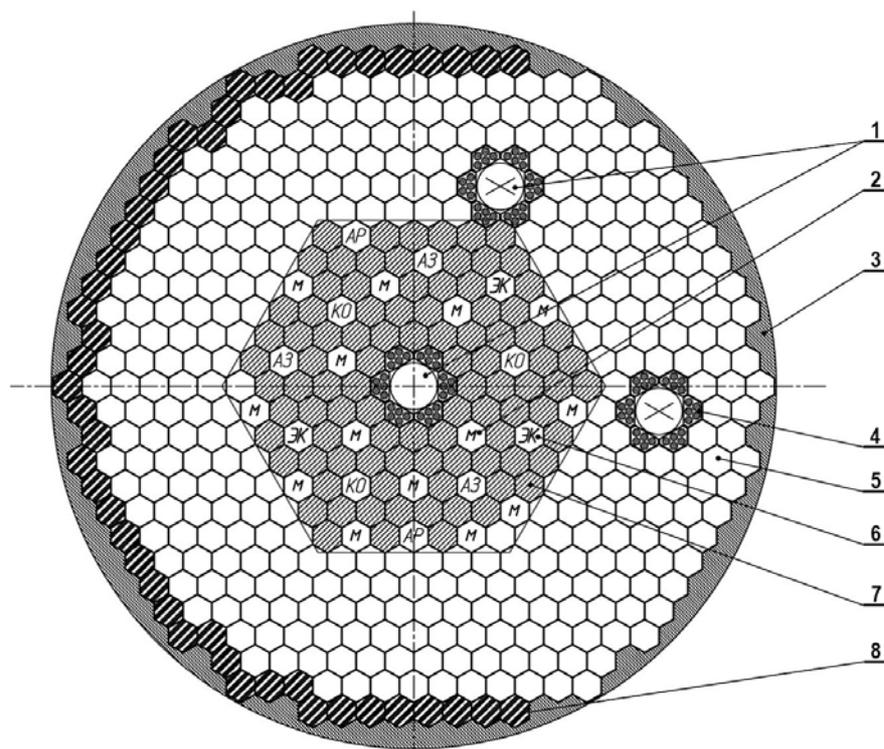


Рис. 1. Компоновка активной зоны РУ МБИР с ТВС на базе твэлов \varnothing 6,0 мм: 1 – петлевые каналы (ПК) в центре активной зоны и два в боковом экране; 2 – материаловедческие и радиоизотопные сборки (М); 3 – периферийный вытеснитель; 4 – вытеснитель вокруг петлевых каналов; 5 – сборки бокового экрана; 6 – инструментальные экспериментальные каналы (ЭК); 7 – ТВС активной зоны; 8 – внутриреакторное хранилище. В активной зоне восемь ячеек выделены для стержней СУЗ: три для компенсирующих органов (КО), три для аварийной защиты (АЗ) и две для автоматических регуляторов (АР). Шаг размещения шестиугольных ячеек 74 мм

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Представленные расчетные нейтронно-физические характеристики исследуемых компоновок активной зоны (табл. 2) демонстрируют следующие аспекты.

Реализация предложенного технического решения позволяет поднять максимальную величину плотности потока нейтронов в представленной (основной) компоновке активной зоны до $1 \cdot 10^{16}$ н/см²с. В такой компоновке максимальная тепловая нагрузка на твэл составляет 48,6 кВт/м твэла (см. табл. 2), а в исходной – 49,5 кВт/м твэла. Следовательно, есть резерв подъема удельного тепловыделения примерно на 5%, который можно использовать, проведя оптимизацию компоновки активной зоны, для подъема плотности потока нейтронов от $0,95 \cdot 10^{16}$ н/см²с до указанной величины.

Основные характеристики рассматриваемых компоновок активной зоны

Компоновка активной зоны	Исходная	Основная	Сравнительная
Тепловая мощность реактора, МВт	150	280	280
Внешний диаметр / толщина оболочки твэльной трубки, мм	6,0 x 0,3	4,1 x 0,25	6,0 x 0,3
Количество твэлов в ТВС	91	169	91
Количество ТВС в активной зоне, шт.	96	96	176
Количество стержней СУЗ	8	8	8
Количество ячеек в зоне для ПК, М и ЭК (см. рис. 1)	29	29	29
Эквивалентный диаметр / высота активной зоны, мм	874 / 550	874 / 550	1120 / 550
Материал топлива в твэле	Вибромокс	Вибромокс	Вибромокс
Максимальное тепловыделение, МВт/м ³ (кВт/м твэла)	940 (49.5)	1715(48.6)	930(49.0)
Кампания ТВС, эфф. сутки	530	270	480
Длительность цикла, эфф. сутки	106	90	96
Количество перегружаемых ТВС, шт.	19–20	32	35–36
Обогащение (U+Pu)O ₂ , %	41.2	50.4	32.9
Максимальная плотность потока нейтронов, ×10 ¹⁵ н/см ² с (начало /конец цикла)	5.0/5.2	8.9 / 9.5	6.1 / 6.5
Максимальное выгорание топлива, % т.а.	13.8	12.6	11.7
Максимальная повреждающая доза (ЧС–68), сна	79	76	82
Потеря реактивности реактора от выгорания топлива, %Δk/k	3.00	4.55	2.96
Потребление в год (КИУМ = 0.65): «свежих» ТВС, шт. (U+Pu)O ₂ , кг	42–43 354	84–85 574	87 716

Однако для реализации этого варианта технического решения необходимо преодолеть ряд проблем:

- физико-технические – существенно поднять эффективность стержней СУЗ для компенсации сильно выросшей потери реактивности реактора от выгорания топлива, значительно уменьшить нейтронные потоки на несменяемые конструкции реактора, в первую очередь, на корпус реактора, и др.;
- теплотехнические – обеспечить допустимые теплогидравлические параметры для ТВС, содержащей пучок из 169-ти тонких твэлов, что, по-видимому, по-

требует нестандартных конструкторских решений, разработать теплотехническое оборудование для съема возросшей примерно в два раза мощности и др.

Что касается рассматриваемой сравнительной компоновки активной зоны с сохранением размера внешнего диаметра твэла (6.0 мм), то при подъеме мощности до 280 МВт максимальная плотность потока нейтронов увеличивается не так существенно, а всего лишь примерно на 25%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные вычисления показали, что в рассматриваемой на стадии разработки эскизного проекта МБИР компоновке активной зоны можно поднять величину максимальной плотности потока нейтронов до $1 \cdot 10^{16}$ н/см²с, если будет возможна реализация следующих технических решений:

- увеличение тепловой мощности реактора до 280 МВт;
- размещение в проектной ТВС 169-ти твэлов с твэльными трубками $\sim 4.1 \times 0.25$ мм.

Реализация таких технических решений создает ряд очевидных физико-технических, теплотехнических, конструкторских, производственных и экономических проблем, последние из которых, вероятно, являются определяющими.

Результаты работы, возможно, могут быть частично использованы на последующих стадиях разработки РУ МБИР и в дальнейшем, несомненно, предстоящей модернизации активной зоны, как показывают отечественный и зарубежный опыты эксплуатации исследовательских и энергетических реакторов.

Литература

1. Распоряжение правительства РФ № 1026-р от 23 июля 2009 г., подписанное премьер-министром В.В. Путиным.
2. *M.N. Svyatkin, A.L. Izhutov, I.Y. Zhemkov et al.* Purpose and priority tasks of a Russian Multi-Function Fast Research Reactor. Доклад, FR09, Kyoto, 07–11 December 2009 IAEA – CN – 176/09 – 17 P. Book of extended Synopses, P. 631.
3. *Третьяков И.Т., Лопаткин А.В., Романова Н.В. и др.* От реактора БОР-60 к реактору МБИР: преемственность и развитие / Сборник докладов научно-технического семинара, посвященного 40-летию реактора БОР-60 «Роль реактора БОР-60 в инновационном развитии атомной отрасли», Димитровград Ульяновской обл., 2010. – Стр. 125–132.
4. Fast reactor database: 2006 Update, IAEA – TECDOC – 1531, Vienna, December 2006.
5. Atominfo.ru, 14 февраля 2011 г.
6. *Клинов А.В.* О целесообразности и технической возможности повышения плотности потока нейтронов в исследовательских реакторах. / Обзор, Димитровград, ФГУП «ГНЦ НИИАР», 2003.
7. *Серегин А.С., Кислицина Т.С., Цибуля А.М.* Аннотация комплекса программ TRIGEX.04. Препринт ФЭИ – 2846, Обнинск, 2000.
8. *Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Цибуля А.М.* Программа подготовки констант CONSYST. Описание применения. Препринт ФЭИ – 2828, Обнинск, 2000.
9. *Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Цибуля А.М.* Система групповых констант БНАБ-93 // ВАНТ. Серия «Ядерные константы», №1, 1996.

Поступила в редакцию 17.07.2013

phase as well as associated transients before the stable state of regular partial reloadings. Different techniques for compensating excess reactivity are being analysed. Two ways of compensating excess reactivity have been shown possible, which do not violate design constraints on FE specific power: with combined (boron carbide + steel) and uranium regular reactivity compensators.

УДК 621.039.526

Calculational-experimental research of irradiation heat rate in the BOR-60 side shield \ A.V. Varivtsev, I.Yu. Zhemkov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Scool. Nuclear Power Engineering) – Obnibsk, 2013. 7 pages, 1 table, 3 illustrations. – References, 8 titles.

The improved method was used to calculate irradiation heat rate in components of an experimental rig located in the first row of the BOR-60 side shield. It is shown that the computed values correlate satisfactorily with the experimental ones. Some causes of discrepancy are given as well as the ways of their elimination.

УДК 621.039.526

Increasing maximum neutron flux in the core of MBIR reactor \ V.A. Cherny, L.A. Kotchetkov, I.V. Burevsky, V.Yu. Stogov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Scool. Nuclear Power Engineering) – Obnibsk, 2013. 7 pages, 2 tables, 1 illustration. – References, 9 titles.

The information is presented on theoretical search for technical decisions with their application for the core of the MBIR installation under design for essential increase (approximately by a factor of two) of maximum neutron flux up to $1 \cdot 10^{16}$ n/cm²s.

It is shown that the increas of thermal capacity of the reactor from 150 MWt to 280 MWt with simultaneous reduction of fuel pin diameter in the core from 6.0 mm to 4.1 mm would resultin maximum neutron flux of about $1 \cdot 10^{16}$ n/cm²s.