

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАГРУЗКИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА МИР

А.Л. Ижутов, В.В. Калыгин, А.П. Малков

ОАО «ГНЦ НИИАР», г. Димитровград



Представлены принципы формирования загрузки активной зоны петлевого исследовательского реактора МИР, позволяющие обеспечить требуемую мощность экспериментальных твэлов и ТВС. Предложенный и реализованный способ неравномерной загрузки активной зоны обеспечивает выполнение требований ядерной безопасности, экономию топлива, минимизацию мощности реактора при одновременном облучении нескольких экспериментальных ТВС, постоянство профиля нейтронного потока в экспериментальных каналах.

Ключевые слова: исследовательский реактор МИР, формирование загрузки активной зоны, экспериментальные ТВС, испытания в нестационарных режимах, результаты исследований, постоянство условий облучения, ядерная безопасность, экономия топлива.

Key words: research reactor MIR, formation of the core configuration, experimental fuel assemblies, irradiation in transient conditions, investigation results, constancy of the irradiation conditions, nuclear safety, fuel saving.

Исследовательские реакторы являются неотъемлемой частью атомной науки и техники. Без информации, получаемой с их помощью, невозможно безопасное и эффективное развитие атомной энергетики в стране, проводящей самостоятельную политику в этой области. Среди направлений использования исследовательских реакторов одно из важнейших условий – испытания работоспособности современных и перспективных твэлов энергетических реакторов при различных эксплуатационных режимах и в аварийных ситуациях. Такие задачи решаются, в частности, в реакторе МИР [1]. В активной зоне реактора можно разместить до 12-ти экспериментальных каналов, в которые загружают испытываемые твэлы. Экспериментальные каналы подключают к автономным петлевым контурам охлаждения для обеспечения требуемых теплофизических и гидродинамических условий испытаний в среде теплоносителя заданного химического состава. Структура активной зоны реактора предусматривает окружение каждого экспериментального канала шестью каналами с рабочими ТВС (рис. 1). Канальная конструкция реактора позволяет обеспечить максимальный контроль параметров испытаний. Разветвленная система рабочих органов системы управления и защиты (СУЗ) предназначена для регулирования мощности реактора и групп каналов в различных участках активной зоны и безопасности реактора.

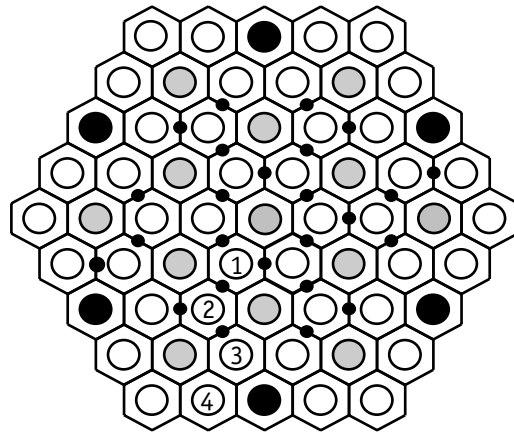


Рис. 1. Картограмма активной зоны реактора МИР: ● – стержень АЗ-КС; ○ – канал с рабочей ТВС; ◐ – экспериментальный канал; ● – КД; ⬡ – бериллиевый блок (цифрами обозначены номера рядов активной зоны)

Режимы испытаний экспериментальных твэлов и ТВС по мощности могут существенно отличаться, поэтому при выборе загрузки активной зоны для каждой кампании требуется обеспечить решение взаимосвязанных задач:

- обеспечение требуемых режимов испытаний экспериментальных твэлов при возможно меньшей мощности реактора;
- согласование режимов испытаний различных экспериментальных устройств и создание условий по их поддержанию в ходе кампании;
- обеспечение требований безопасности.

Реактор эксплуатируется в режиме частичных перегрузок, во время остановок между кампаниями перегружаются не все ТВС, а некоторая их часть. Поэтому выгорание топлива в рабочих ТВС может быть различным, что активно используется для согласования заданных режимов испытаний по мощности в экспериментальных каналах.

Основное проектное назначение реактора МИР – ресурсные испытания твэлов и ТВС новых конструкций при требуемом стационарном уровне энерговыделения и заданных параметрах теплоносителя. Такие испытания обычно продолжаются в течение длительного времени (до нескольких лет). Требуемую мощность исследуемых твэлов поддерживают в ходе кампании путем извлечения ближайших органов регулирования по мере потери запаса реактивности. Распределение топлива в активной зоне при таких экспериментах достаточно стабильное, а мощность рабочих ТВС, как правило, не превышает одного мегаватта.

В последнее время все большее место в работе реактора занимают испытания твэлов в условиях, моделирующих нестационарные режимы [2]. Эти испытания, как правило, кратковременны, характеризуются высоким уровнем линейной мощности исследуемых твэлов, которая к тому же может меняться в ходе эксперимента. В рамках одной кампании реактора обычно проводят только один такой динамический эксперимент. Мощность других экспериментальных каналов при этом снижают путем ввода в активную зону ближайших поглощающих стержней, чтобы допустимые нагрузки на испытываемых твэлах не были превышены.

Линейная мощность твэлов в петлевом экспериментальном канале зависит прежде всего от мощности окружающих рабочих ТВС [3], которая повышается с уменьшением выгорания топлива. Это означает, что если во все окружающие экспериментальную ТВС каналы загрузить свежие рабочие ТВС, то можно уменьшить

общую мощность реактора, при которой достигаются требуемые параметры испытаний.

В то же время известно, что количество топлива в активной зоне в несколько раз превышает минимальную невозмущенную критическую загрузку [1]. Поэтому для обеспечения безопасности испытаний важно было выяснить, может ли в процессе формирования загрузки активной зоны с компактным размещением свежих ТВС образоваться локальная критическая масса, выполняется ли требование об обеспечении минимальной подкритичности, в том числе, с учетом ошибок персонала, не превышает ли допустимая эффективность органов СУЗ.

Для получения ответов на поставленные вопросы была выполнена серия экспериментов на критической сборке – физической модели реактора. К началу проведения исследований в штатную систему управления и защиты реактора входило (см. рис. 1) 25 стержней аварийной защиты и компенсации реактивности (АЗ-КС), расположенных на стыке граней бериллиевых блоков и шесть компенсаторов реактивности с топливной догрузкой (КД), которые установлены по оси бериллиевых блоков четвертого ряда активной зоны. Стержни АЗ-КС содержат поглощающую композицию на основе диспрозия. КД представляет собой дистанционно перемещаемую рабочую ТВС, соединенную с расположенной над ней кадмиевой трубой, очехлованной нержавеющей сталью. Из анализа картограммы видно, что активную зону реактора МИР можно условно разбить на несколько «семерок» (экспериментальный канал, окруженный шестью каналами с рабочими ТВС), которые отличаются друг от друга количеством расположенных внутри и рядом с ней органов регулирования. В исследованиях на критсборке моделировали «семерки», центры которых находятся во втором и третьем рядах активной зоны. В экспериментальный канал помещали сборку (ЭТВС), состоящую из 19-ти твэлов типа ВВЭР с высотой активной части 1 м.

Было установлено, что рассмотренные системы подкритичны при всех полностью погруженных в активную зону органах регулирования. Однако если ЭТВС расположена в третьем ряду, то при ошибочном извлечении ближайшего к «семерке» КД и при случайной установке в центральную ячейку «семерки» рабочей ТВС вместо ЭТВС происходит образование локальной критической массы. Чтобы это исключить было рекомендовано в «семерки», центры которых находятся в третьем ряду, добавить еще по одному стержню АЗ-КС на стыке бериллиевых блоков третьего и четвертого рядов, а также во все угловые ячейки активной зоны установить дополнительные КД. Экспериментальная проверка показала, что данные изменения гарантируют соблюдение требований правил ядерной безопасности при любых рассмотренных ошибках персонала. Поэтому предложенная модернизация СУЗ реактора была выполнена (рис. 2).

Результаты проведенных исследований и выполненная модернизация СУЗ позволили обосновать и обеспечить безопасность реактора, а также реализовать новый подход к формированию загрузки активной зоны. Этот подход предусмат-

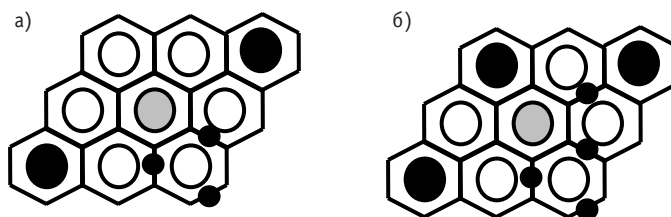


Рис. 2. Схема размещения органов регулирования: а) – до модернизации; б) – после модернизации

ривает существенно неравномерное распределение топлива в активной зоне и организацию локальных участков с высоким содержанием топлива вокруг нужного экспериментального канала с одновременным размещением ТВС с большой глубиной выгорания топлива в других областях активной зоны. При этом достигается высокая мощность экспериментальных твэлов в нестационарных режимах испытаний при выполнении требований ядерной безопасности и минимизации мощности реактора.

Новый подход к выбору загрузки активной зоны реактора МИР позволил также повысить эффективность использования дорогостоящего высокообогащенного топлива в рабочих ТВС. Особенностью исследовательских реакторов является обеспечение и поддержание заданных режимов облучения экспериментальных устройств (ЭУ) в течение кампании в ущерб допустимому для твэлов выгоранию топлива. Достижение глубины выгорания топлива в 25–35% в выгружаемых ТВС исследовательских реакторов считается удовлетворительным, а в ряде случаев и оптимальным, результатом [4], в то время как конструкция твэлов позволяет обеспечить их работоспособность до выгорания в 50–60% [4, 5]. Такое соотношение в полной мере относилось к показателям использования топлива реактора МИР в начальный период его эксплуатации. Среднее выгорание топлива в рабочих ТВС, выгружаемых из реактора, составляло 35% [1] при подтвержденной работоспособности свыше 50%. Предложенный и реализованный способ неравномерной загрузки активной зоны реактора МИР позволяет дожигать топливо в ТВС до предельных величин выгорания. Снижение мощности в участках активной зоны, в которых испытания не проводятся, можно обеспечить, загружая туда рабочие ТВС с высокой глубиной выгорания топлива. Тепловыделяющие сборки, работая в щадящих условиях по мощности, позволяют достигнуть предельного выгорания топлива без риска разгерметизации твэлов.

В результате реализации предложенного метода неравномерной загрузки активной зоны в последние годы эксплуатации удалось существенно повысить выгорание топлива в выгружаемых ТВС реактора МИР (рис. 3), а также сократить потребление свежего топлива (рис. 4). *Аномалия в 2007г. в тренде на графиках связана с необходимостью замены значительной доли ТВС в активной зоне по технологическим причинам.*

Кроме минимизации мощности реактора в процессе проведения экспериментов и сопутствующей экономии топлива предложенный подход к загрузке активной зоны реактора МИР позволил решить еще одну задачу, часто возникающую при проведении экспериментов в исследовательских реакторах. Известно, что постоянное условие облучения материалов, образцов и изделий, испытываемых в ис-

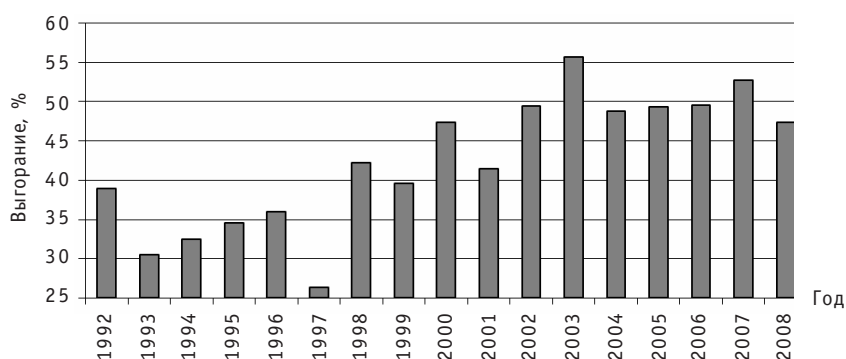


Рис. 3. Выгорание топлива в ТВС, выгруженных в бассейн выдержки

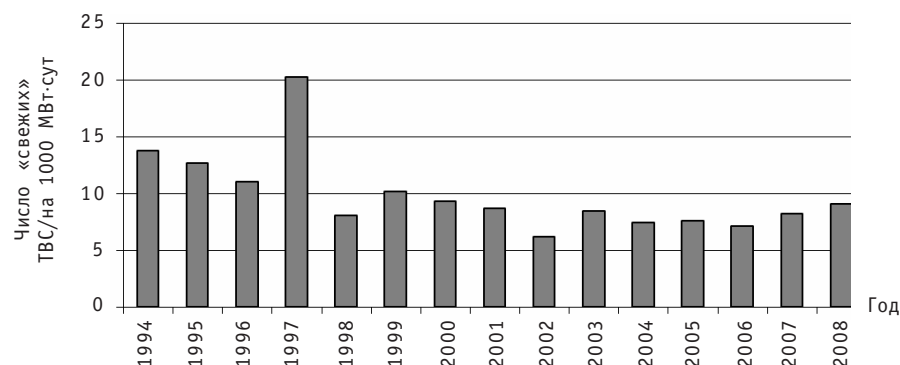


Рис. 4. Удельный расход свежих ТРС, (шт./1000 МВт·сут)

следовательских ядерных реакторах, обычно составляет одну из основных задач проводимых экспериментов [5, 6]. Для поддержания условий облучения в процессе кампании используют органы регулирования и компенсации реактивности, которые извлекают из активной зоны по мере выгорания топлива. Однако перемещение органов регулирования вблизи экспериментального канала приводит к изменению аксиальной и азимутальной составляющей профиля нейтронного потока в нем, что может не отвечать требуемым условиям испытаний. Для обеспечения постоянства нейтронно-физических условий испытания в активной зоне реактора МИР загрузкой свежего топлива формируют локальную область, размножающие свойства которой близки к критическим (запальную зону). Эта запальная зона должна быть удалена от экспериментальных каналов с требуемыми постоянными условиями облучения. Для нужного экспериментального канала близкими органами регулирования обеспечивают требуемый профиль нейтронного потока по азимутальной и аксиальной составляющим. В дальнейшем в ходе кампании эти органы регулирования не перемещают. Компенсацию потери реактивности в процессе кампании при выгорании топлива проводят извлечением из активной зоны компенсирующих органов в запальной зоне [7]. Рабочие ТРС, окружающие экспериментальный канал с постоянным профилем нейтронного потока, играют в этом случае роль конвертора нейтронов, а запальная зона служит источником нейтронов, который обеспечивает поддержание постоянных условий облучения.

Предложенный и реализованный метод неравномерной загрузки активной зоны позволяет также снизить оперативный запас реактивности без ущерба для заданной продолжительности кампании реактора МИР. Путем оптимизации распределения рабочих тепловыделяющих сборок с различным выгоранием в активной зоне

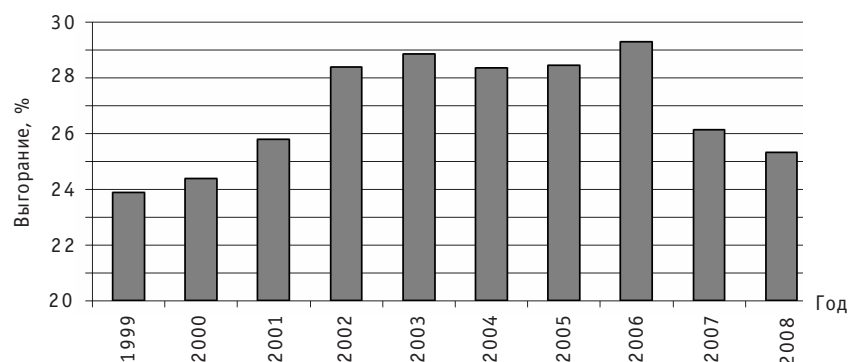


Рис. 5. Среднее выгорание топлива в активной зоне на начало кампании

можно уменьшить число органов регулирования реактора, вводимых в активную зону для формирования условий испытаний в петлевых каналах. Таким образом, можно снизить запас реактивности на начало кампании при повышении среднего выгорания топлива в реакторе. Диаграмма на рис. 5 иллюстрирует увеличение среднего выгорания топлива в активной зоне реактора МИР на начало кампании в последние годы его эксплуатации. При этом условия по требуемой мощности испытаний экспериментальных ТВС были выполнены.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Увеличение количества органов СУЗ в активной зоне реактора МИР обеспечило

- выполнение требований ядерной безопасности при перегрузках реактора с учетом нормируемого количества возможных ошибок персонала;
- возможность формирования в активной зоне реактора МИР локальных областей, параметры которых близки к критическим, для создания требуемых условий проведения новых классов экспериментов и тем самым расширения исследовательских возможностей реактора.

Предложенный и реализованный способ неравномерной загрузки активной зоны реактора МИР позволил

- обеспечить высокую мощность испытываемых в нестационарных режимах твэлов при минимизации мощности реактора;
- повысить эффективность использования топлива путем достижения предельно допустимой глубины выгорания тепловыделяющих сборок;
- поддерживать при необходимости постоянство профиля нейтронного потока в экспериментальных каналах;
- повысить уровень ядерной безопасности при эксплуатации реактора за счет снижения запаса реактивности при увеличении среднего выгорания топлива в активной зоне реактора.

Литература

1. Исследовательские реакторы НИИАР и их экспериментальные возможности/*Под научн. ред. проф. В.А. Цыканова*. Димитровград: НИИАР, 1991. – 103 с.
2. Бурукин А.В., Ижутов А.Л., Калыгин В.В. и др. Методы испытаний в реакторе МИР топлива ВВЭР при переходных и аварийных режимах//*Известия вузов. Ядерная энергетика*. – 2007. – № 3. – Вып. 1. – С. 83-91.
3. Калыгин В.В., Киселева И.В., Малков А.П., Шулимов В.Н. Формирование нейтронно-физических условий для проведения в реакторе МИР испытаний твэлов ВВЭР в режимах аварий с потерей теплоносителя//*Известия вузов. Ядерная энергетика*. – 2008. – № 2. – С. 58-65.
4. Цыканов В.А. Тепловыделяющие элементы для исследовательских реакторов. – Димитровград: ГНЦ РФ НИИАР, 2001. – 249 с.
5. Бать Г.А., Коченов А.С., Кабанов Л.П. Исследовательские ядерные реакторы: Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
6. Цыканов В.А., Самсонов Б.В. Техника облучения материалов в реакторах с высоким нейтронным потоком. – М.: Атомиздат, 1973.
7. Ижутов А.Л., Калыгин В.В., Малков А.П. Способ эксплуатации исследовательского ядерного реактора. Пат. № 2292093 РФ G21C 17/00//*Бюллетень изобретений*. – 2007. – № 2.

Поступила в редакцию 21.05.2010

ABSTRACTS OF THE PAPERS

УДК 621.039.534

Some Benefits from Use of Radiogenic Lead as a Coolant of Fast Reactors \V.A. Apse, A.N. Shmelev, A.M. Sirotkin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 11 pages, 7 tables. – References, 12 titles.

The paper evaluates a possibility to improve some thermal-physical parameters of lead-cooled fast reactors (BREST-type reactors) by using radiogenic lead with large content of isotope ^{208}Pb as a coolant. The paper demonstrates that unique neutron-physical properties of ^{208}Pb allow to use more sparing conditions for routine operation of lead-cooled fast reactors on coolant velocity and pressure drop for coolant flow through the reactor core while coolant heating up and total thermal power is kept constant.

УДК 621.039.51

Singular Approach in Physical Calculations of the Fast Reactor Plant \A.A. Bezborodov, E.V. Dolgov, D.A. Klinov, V.V. Kolesov, V.Yu. Stogov, I.R. Suslov, V.I. Folomeev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 7 pages, 1 table. – References, 20 titles.

The aim of the paper is considering of the application of the singular functions technique employment in practical tasks for description of neutron cross-sections interactions with media nuclides nuclei in resonance part of energy for physical simulation of the fast reactor plants, in which non-resolution field is important.

УДК 621.039.548

Peculiar Features of the MIR Reactor Core Configuration \A.L. Izhutov, V.V. Kalygin, A.P. Malkov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 6 pages, 5 illustrations. – References, 7 titles.

Presented are principles of core configuration of the MIR lope-type research reactor, which allow the required irradiation conditions of experimental fuel elements and assemblies to be provided. Preliminary testing results substantiated an increase in the number of control rods. This ensured the observance of nuclear safety requirements during reloading of the reactor taking account of personnel errors and also possibility to provide conditions in the MIR core suitable for the performance of new types of experiments. The proposed and implemented method of non-uniform loading of the core ensures saving of fuel, minimization of the reactor power during simultaneous irradiation of several experimental fuel assemblies and constancy of neutron flux profile in the experimental channels.

УДК 621.039.56

Conditions for Minimum Deviation from Zero Level of Reactivity in Point Model for Unlocked Burnable Poison \Yu.A. Kazansky, D.M. Titov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 7 pages, 4 illustrations. – References, 10 titles.

For the low power reactors in the implementation of the idea of self-control, it is important to obtain the time dependence of reactivity, possibly a little different from zero level. At the same time, we know that by using of burnable poison positive overshoot of reactivity is observed. In this paper we present conditions under which it is possible to realize the minimum deviation from zero reactivity during burnup

УДК 621.039.548

Arrangement of Additional High-Flux Irradiation Volumes in the SM Reactor Core \Yu.A. Krasnov, A.P. Malkov, A.L. Petelin, V.V. Pimenov, V.A. Uzikov, S.I. Chekalkin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 9 pages, 2 tables, 6 illustrations. – References, 5 titles.

To increase the effectiveness of the SM operation by arranging additional irradiation volume in the high-flux channels, it was proposed to locate two FAs with experimental channels 24.5mm in diameter in the core cells adjacent to the neutron trap. The channels should be adjacent both to the neutron trap and to each other. In this case, additional irradiation volume, so-called «small trap», can be arranged. The calculations and experiments performed to investigate the SM characteristics in the