

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НИТРИДНОГО И МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ТОПЛИВА В АКТИВНОЙ ЗОНЕ РЕАКТОРА МБИР

**В.А. Елисеев, Л.В. Коробейникова, П.А. Маслов, И.В. Малышева,
В.И. Матвеев, И.В. Деменева**

АО «ГНЦ РФ-ФЭИ им. А.И. Лейпунского»

249033, Калужская обл., г. Обнинск, пл. Бондаренко, 1



МБИР – это многоцелевой быстрый исследовательский реактор с натриевым теплоносителем тепловой мощностью 150 МВт, предназначенный для широкого круга экспериментальных исследований по различным направлениям – ресурсных испытаний и отработки режимов эксплуатации перспективных видов топлива, твэлов, ПЭЛ, ТВС, радиационных испытаний перспективных конструкционных материалов, наработки изотопов различного назначения и т.д. [1, 2]. Поэтому одним из основных требований к этому реактору является высокая плотность потока нейтронов (не менее $5 \cdot 10^{15}$ н/см²с), которая зависит от вида используемого топлива.

В качестве штатного топлива РУ МБИР в настоящее время принято виброуплотненное МОКС-топливо с массовым содержанием плутония ~38%. Возможности использования в этом реакторе альтернативных видов топлива высокой плотности представляются перспективными для будущей широкомасштабной ядерной энергетики. Наиболее интересными для перспективных быстрых реакторов являются смешанное нитридное уран-плутониевое (СНУП) топливо, а также смешанное металлическое топливо (тройной сплав уран-плутоний-цирконий).

Исследования реактора МБИР на перспективных плотных видах топлива показали, что нитридное топливо не позволяет получить требуемую величину плотности нейтронного потока; металлическое топливо обеспечивает требуемую величину потока (практически как на МОКС-топливе) и высокую скорость набора повреждающей дозы, но требует изменения температурных условий облучений. Также раскрыты нейтронно-физические особенности этих видов топлива в сравнении со штатным МОКС-топливом.

Ключевые слова: МБИР, металлическое топливо, нитридное топливо, МОКС-топливо, максимальная плотность потока нейтронов.

ВВЕДЕНИЕ

В качестве штатного топлива РУ МБИР в настоящее время принято виброуплотненное МОКС-топливо с массовым содержанием плутония ~38%. В статье рассматриваются возможности использования в этом реакторе альтернативных плотных видов топлива, которые представляются перспективными для будущей широкомасштабной ядерной энергетики.

Наиболее интересными из них являются смешанное нитридное уран-плутониевое (СНУП) топливо и смешанное металлическое топливо.

© *В.А. Елисеев, Л.В. Коробейникова, П.А. Маслов, И.В. Малышева,
В.И. Матвеев, И.В. Деменева, 2016*

Нитридное топливо в настоящее время рассматривается как основа для будущих быстрых коммерческих энергетических реакторов, работающих в режиме самообеспечения топливом, в частности, БРЕСТ-300 и БН-1200 [3 – 5]. Преимущества этого топлива перед оксидным общеизвестны: оно обладает более высокой плотностью и теплопроводностью, хорошо совместимо с материалами оболочек и с жидкометаллическим теплоносителем, что особенно важно в аварийных ситуациях. Кроме того, технология его производства во многом совместима с технологией оксидного топлива.

Благодаря высокой плотности (но не приводящей к росту пустотного эффекта реактивности) нитридное топливо обеспечивает высокое внутреннее воспроизводство, что позволяет минимизировать запас реактивности на выгорание и не ухудшить показатели безопасности в авариях с потерей теплоносителя из активной зоны. Его высокая теплопроводность приводит к уменьшению аккумулированного тепла в топливе, увеличению температурного запаса до плавления и улучшению сочетания температурных обратных связей в реакторе, что повышает его безопасность, особенно в запроектных авариях.

В России имеется опыт изготовления и облучения нитридного (уранового – UN) топлива [6]. Начиная с 1970 г. в реакторе БР-10 облучались экспериментальные сборки с нитридным топливом, изготовленным по различным технологиям с различной пористостью и с двумя видами контактного подслоя – натриевым и гелиевым. Это послужило основой для создания ~200 ТВС для двух полных загрузок активной зоны этого реактора моонитридным урановым топливом, в которых было достигнуто максимальное выгорание до 8.7% т.а.

Нитридное топливо с гелиевым контактным подслоем совместимо с проектом реактора МБИР и может быть использовано без изменений конструкции элементов активной зоны.

Металлическое топливо рассматривается с самого начала разработок быстрых реакторов из-за его предельно высокой плотности, теплопроводности и минимального количества ядер разбавителя, что обеспечивает предельно жесткий спектр нейтронов и максимально высокое воспроизводство, что важно для быстро развивающейся ядерной энергетики. При этом американские специалисты (которые достигли наибольших успехов в освоении этого топлива) исследовали его не из-за воспроизводства, а из-за сравнительно дешевых технологий изготовления (литье) и переработки (электрохимия). Экономический анализ показал, что топливная составляющая затрат на металлическом топливе может быть примерно в семь раз меньше, чем на топливе керамическом. Широкомасштабные эксперименты по облучению этого топлива проводились в США на реакторе EBR-II [7, 8].

Серьезным недостатком металлического топлива является его взаимодействие со сталью оболочек ТВЭЛов. При температуре ~560°C плутоний образует со сталью легкоплавкие интерметаллидные соединения, которые за короткое время могут нарушить целостность оболочки ТВЭЛ. Введение циркония (~10% вес.) в состав этого топлива увеличивает температуру образования интерметаллидов на ~80°C, что позволяет поднять рабочую температуру таких ТВЭЛов до приемлемого (хотя и пониженного на 60 – 80°C) уровня [9]. Кроме уран-циркониевых широко исследовались также уран-молибденовые сплавы (7 и 10% Mo), которые облучались в реакторах БОР-60 (Россия), DFR (Англия) и Enrico Fermi (США). Поскольку металлическое топливо имеет довольно низкую температуру плавления, его целесообразно рассматривать с натриевым контактным подслоем.

Металлическое топливо может быть использовано в реакторе МБИР без изменений конструкции элементов активной зоны только в случае гелиевого контактного подслоя. В случае натриевого контактного подслоя требуется серьезная переработка проекта реактора. Естественно, металлическое топливо потребует снижения темпе-

ратурных параметров теплоносителя, что приведет к некоторому снижению выработки электроэнергии.

РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ И ПРОГРАММЫ

Альтернативные виды топлива рассматривались в рамках исходной (оксидной) конструкции реактора, заменялись лишь топливо и материал торцевых воспроизводящих экранов. Обогащение топлива подбиралось так, чтобы реактор на номинальной мощности в конце средней (третьей) микрокампании был критическим при всех извлеченных РО СУЗ кроме РО АР, которые находятся в полупогруженном состоянии.

Принципиальным условием реактора МБИР, указанным в ТЗ, является обеспечение плотности нейтронного потока не менее $0.5 \cdot 10^{16}$ н/см²с. Кампания ТВС определяется из допустимой величины повреждающей дозы оболочек твэлов (ЧС-68), которая принималась равной 75 сна. Максимальное выгорание топлива и флюенс быстрых нейтронов ($E > 0.1$ МэВ) на оболочки твэлов не являются ограничивающими параметрами. Длительность микрокампании (интервала непрерывной работы между перегрузками) принята 100 эффективных суток.

Поскольку указанные виды топлива рассматривались в штатной (оксидной) модели реактора, то и характеристики реактора с этими видами топлива показаны в сравнении со штатным топливом.

Основной объем нейтронно-физических расчетов выполнялся с помощью инженерного кода TRIGEX [9]. Для прецизионных расчетов использовался код ММКК [11], использующий метод Монте-Карло и детальное описание всех элементов активной зоны. В обоих случаях использовалась библиотека многогрупповых констант БНАБ-93 и система их подготовки CONSYST [12, 13].

ХАРАКТЕРИСТИКИ МБИР С АЛЬТЕРНАТИВНЫМИ ВИДАМИ ТОПЛИВА

Нитридное топливо

В данных расчетах была принята эффективная плотность 12.0 г/см³, что составляет ~0.83 от теоретической [14]. Длительность кампании нитридного топлива определялась величиной повреждающей дозы оболочек и составляла 500 эфф. сут.

Максимальная величина плотности потока нейтронов, которая достигается в центральной области нитридной активной зоны, представлена в табл. 1.

Таблица 1

Максимальная плотность потока нейтронов в центре нитридной активной зоны, $1/\text{см}^2\text{с} \times 10^{16}$

	Начало МК	Конец МК
Активная зона	0,47 (0.47)	0,48 (0.48)
ЦПК	0,46 (0.44)	0,47 (0.45)
Без скобок – расчет по TRIGEX, в скобках – расчет по ММКК		

Видно, что максимальная величина плотности потока нейтронов в нитридном топливе несколько не дотягивает до требуемой величины – $0.5 \cdot 10^{16}$ 1/см²с, причем инженерный и прецизионный расчеты показывают одну и ту же величину потока. В то же время в центральном петлевом канале (ЦПК), который в расчетах заполнялся сталью и натрием в равных долях, результаты разные: диффузионный код TRIGEX показывает, что поток в канале на 2% меньше, чем в активной зоне, а прецизионный код ММКК – на 5% меньше, чем в зоне.

Металлическое топливо

В качестве металлического топлива для МБИР рассмотрен тройной сплав уран-плутоний-цирконий (10%) с теоретической плотностью $15,9$ г/см³. Эффективная

плотность этого топлива с учетом необходимых зазоров принималась равной $\sim 12,0$ г/см³ [15 – 17]. Контактный подслои в данном рассмотрении принимался газовый (гелиевый), хотя для металлического топлива это не лучший выбор. Оптимальный для этого топлива натриевый контактный подслои не рассматривался, поскольку он требует существенной переработки проекта реактора из-за необходимости перевода газосборников в верхнюю часть ТВЭЛОВ.

Таблица 2

Максимальная плотность потока нейтронов в активной зоне МБИР на металлическом топливе

	Начало МК	Конец МК
Активная зона	0,51 (0.51)	0,52 (0.52)
ЦПК	0,51 (0.45)	0,52 (0.49)
Без скобок – расчет по TRIGEX, в скобках – расчет по ММКК		

Максимальная величина плотности потока нейтронов в центре активной зоны и ЦПК и представлена в табл. 2. Поток в металлической активной зоне немного превышает требуемую величину ($0.5 \cdot 10^{16}$ 1/см²с), причем результаты инженерного и прецизионного расчетов совпадают. Однако в центральном петлевом канале прецизионный код ММКК показывает поток на 5% меньший, чем в активной зоне. Инженерный код TRIGEX в этой области (не содержащей топлива) работает не вполне корректно и показывает тот же поток, что и в активной зоне.

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК РЕАКТОРА МБИР С РАЗЛИЧНЫМИ ВИДАМИ ТОПЛИВА

Одной из главных задач исследовательского реактора является не просто высокая плотность потока нейтронов, а его следствие – повреждающая доза на конструкционные материалы, которая определяется быстрыми нейтронами с энергией выше 0.1 МэВ. В спектре реактора МБИР доля быстрых нейтронов существенно больше, чем в быстрых энергетических реакторах. В результате можно говорить о «качестве» потока, которое в реакторе МБИР на 25% выше, чем в реакторах энергетических. Рассмотрим, как вид топлива реактора МБИР влияет на его качественные характеристики – долю быстрых нейтронов и повреждающую дозу (табл. 3).

Таблица 3

Флюенс и повреждающая доза в МБИР с различными видами топлива

Топливо	МОКС	Нитрид	Металл
Максимальная плотность потока нейтронов, $\times 10^{16}$ н/см ² с	0.53	0.48	0.52
Доля нейтронов с $E > 0.1$ МэВ	0.68	0.72	0.74
Максимальный флюенс, $\times 10^{23}$ н/см ²	2.29	2.08	2.25
Максимальный флюенс с $E > 0.1$ МэВ, $\times 10^{23}$ н/см ²	1.55	1.48	1.66
Максимальная доза на оболочки ТВЭЛОВ, сна	76.2	70.7	74.4

Даже в рамках активной зоны МБИР вид топлива заметно сказывается на «качестве» потока и скорости набора повреждающей дозы. Самые большие поток и скорость набора повреждающей дозы наблюдаются в штатном МОКС-топливе. В нем при пятикратной кампании центральных ТВС повреждающая доза даже превышает допустимый уровень. Поэтому в проекте кампания центральных ТВС сокращена до четырех интервалов.

Наивысшие доля и флюенс быстрых нейтронов (на 8% выше, чем в МОКС-топливе), естественно, в топливе металлическом, в котором нет легких замедлителей типа кислорода или азота. Однако практически при том же потоке, что и в МОКС-топливе, скорость набора повреждающей дозы в металле оказывается ниже, чем в оксидном. Дело в том, что флюенс быстрых нейтронов не учитывает энергетическое их распределение, что очень важно для повреждающей дозы. В металлическом топливе ввиду его высокой плотности происходит сильное неупругое замедление нейтронов на уране, при этом нейтроны существенно теряют энергию, но остаются быстрыми ($E > 0.1$ МэВ). Эта потеря энергии сильно сказывается на повреждающей способности нейтронов.

Хуже всех на этом фоне выглядит топливо нитридное. У него минимальный поток и минимальная повреждающая доза. Количество ядер замедлителя (азота) у этого топлива вдвое меньше, чем у МОКС-топлива (кислорода), поэтому доля быстрых нейтронов у нитридного топлива все же больше, чем у МОКС. Дело в том, что азот является сильным поглотителем быстрых нейтронов (с наибольшими энергиями), на нем происходит (n,p)-реакция с образованием радиоактивного углерода-14. Поэтому из-за поглощения нейтронов на азоте это топливо, с одной стороны, имеет большую загрузку по плутонию, чем МОКС, и, следовательно, меньший поток. С другой стороны, самые высокоэнергетичные нейтроны поглощаются азотом, что существенно ослабляет повреждающую способность потока.

Сравнение других нейтронно-физических характеристик в МБИР [18] с различными видами топлива представлено в табл. 4.

Таблица 4

Нейтронно-физические характеристики реактора МБИР с различными видами топлива в установившемся режиме работы

Топливо	МОКС	Нитрид	Металл
Содержание плутония, %	36.5*)	26.4	24.7
Загрузка делящихся ядер, кг	302	320	303
Загрузка урана-238, кг	525	892	924
$\beta_{эфф}$, % $\Delta k / k$	0.305	0.341	0.357
КВ активной зоны	0.25	0.35	0.43
Запас на выгорание, % $\Delta k / k$	2.97	2.2	1.97
Температурно-мощностной эффект, % $\Delta k / k$	- 1.02	- 0.99	- 0.79
*) По отношению к сумме тяжелых атомов			

Можно видеть, что загрузка делящихся ядер плутония для всех рассмотренных видов топлива близка, отличаются они только загрузкой урана-238. Отсюда существенное различие в величине эффективной доли запаздывающих нейтронов (на ~ 20%!), которые происходят, в основном, от делений на уране-238. Доля запаздывающих нейтронов на чистом плутонии очень мала и составляет примерно 0.2% $\Delta k / k$.

Существенно различаются рассмотренные виды топлива по величине запаса реактивности на выгорание, что связано с повышенным внутренним воспроизводством в плотных видах топлива, особенно, в металлическом.

Наконец, следует отметить низкую величину температурно-мощностного эффекта реактивности на металлическом топливе, что связано со свойственным ему низким доплер-эффектом как из-за меньшей температуры топлива, так и из-за его спектральных особенностей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проект реактора МБИР ориентирован на использование виброМОКС-топлива, и рассмотренные нитридное и металлическое топлива не претендуют на роль основного топлива для этого реактора. Нитридное топливо рассматривается как основа будущей ядерной энергетики, ведется его опытно-промышленное производство. Металлическое топливо позволяет использовать дешевые (непылящие) технологии внешнего топливного цикла (именно поэтому его рассматривают американские специалисты) и обеспечить высокое расширенное воспроизводство вторичного плутония. Поэтому эти виды топлива обязательно будут исследоваться в реакторе МБИР, причем в больших количествах, возможно, до полной загрузки активной зоны.

Показано, что металлическое топливо обеспечивает нужную величину плотности потока нейтронов (практически наравне с МОКС-топливом), высокий уровень радиационных повреждений конструкционных материалов, но требует существенного изменения температурных условий облучения топлива в реакторе. В то же время плотное нитридное топливо из-за нейтронно-физических особенностей азота (сильное поглощение высокоэнергетических нейтронов) не позволяет получить требуемую величину плотности потока нейтронов и несколько проигрывает металлическому в скорости набора повреждающей дозы.

Показано, как рассмотренные виды топлива могут повлиять на характеристики реактора. В частности, нитридное и, особенно, металлическое топливо существенно увеличивают эффективную долю запаздывающих нейтронов, уменьшают запас реактивности на выгорание и температурно-мощностной эффект реактивности, что улучшает условия эксплуатации и безопасность реактора. Также отмечается, что «качество» потока в реакторе МБИР на 25% выше, чем в энергетических реакторах, при этом вид топлива в МБИР принципиально не сказывается на качестве потока.

Литература

1. Жемков И.Ю., Ижutow А.Л., Новоселов А.Е., Погляд Н.С., Святкин М.Н. Экспериментальные исследования в БОР-60 и анализ возможности их продолжения в МБИР. // Атомная энергия. – 2014. – Т. 116. – Вып. 5. – С. 280-283.
2. Тузов А.А., Гулевич А.В., Кочетков Л.А., Третьяков И.Т., Лукасевич И.Б., Звир А.И., Ижutow А.Л., Леонтьева-Смирнова М.В., Целищев А.В. Перспективные задачи МБИР в обоснование характеристик ЯЭУ нового поколения и его экспериментальные возможности // Атомная энергия. – 2015. – Т. 119. – Вып. 1. – С. 29-34.
3. Беззубцев В.С., Емельянов В.С., Адамов Е.О. Инновационный проект АЭС с реактором БРЕСТ и пристанционным топливным циклом / Труды II Научной конференции Минатома России «Атомная энергетика. Состояние и перспективы», Москва, 05 июля 2002. – С. 85.
4. Елисеев В.А., Забудько Л.М., Малышева И.В., Матвеев В.И. Нитридное топливо для перспективного быстрого натриевого реактора типа БН-1200. // Атомная энергия. – Т.114. – Вып. 5, май 2013. – С. 266-271.
5. Адамов Е.О., Забудько Л.М., Матвеев В.И., Рачков В.И., Троянов В.М., Хомяков Ю.С., Леонов В.Н. Сравнительный анализ преимуществ и недостатков использования металлического и нитридного смешанного уран-плутониевого топлива в быстрых реакторах. // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2015. – №2. – С. 3-15.
6. Забудько Л.М., Мамаев Л.И., Труфанов А.А. Анализ расчетных и экспериментальных данных с целью возможного определения причин разгерметизации твэлов с нитридным топливом реактора БР-10 / Сборник докладов VII Российской конференции по реакторному материаловедению. – Димитровград: НИИАР, 8-12 сентября 2003 г. – С.102.
7. Crawford D. C, Porter D.L., Hayes S.L. Fuels for sodium-cooled fast reactors: US perspective //Journal of Nuclear Materials. – 2007. – Vol. 371. – PP. 202-231.
8. Status and Trends of Nuclear Fuels Technology for Sodium Cooled Fast Reactors. IAEA Nuclear Energy Series. – 2011. – № NF-T-4.1.
9. Fast Reactor Database: 2006 Update. IAEA – TECDOC -1531.

10. *Серегин А.С., Кислицина Т.С., Цибуля А.М.* Аннотация комплекса программ TRIGEX.04: препринт ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ». - 2846. - Обнинск, 2000.
11. ММКК. Аттестационный паспорт программного средства рег. № 314 от 09.10.2012.
12. *Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Цибуля А.М.* Система групповых констант БНАБ 93 // ВАНТ, сер. Ядерные константы. - 1995. - Вып. 1.
13. *Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Цибуля А.М.* Программа подготовки констант CONSYST. Описание применения. Препринт ФЭИ-2828. – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2000.
14. *Забудько Л.М.* Опыт эксплуатации и проблемы расчетного обоснования плотных видов топлива. В сб. «Актуальные проблемы разработки и производства ядерного топлива», 08–11 ноября 2010. – М.: МИФИ, 2010. - С.138-159.
15. *Черный В.А., Деменева И.В., Стогов В.Ю.* Расчетные исследования для обоснования повышения плотности потока нейтронов реактора МБИР. / В сб. «Безопасность исследовательских ядерных установок», 26–30 мая 2014. – Димитровград: АО «ГНЦ НИИАР», 2014. – С.35-36.
16. *Черный В.А., Кочетков Л.А., Бурьевский И.В., Стогов В.Ю.* Повышение плотности потока нейтронов в многоцелевом быстром исследовательском реакторе // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2013. – №3. – С. 117-123.
17. *Клинов А.В.* О целесообразности и технической возможности повышения плотности потока нейтронов в исследовательских реакторах. /Обзор. – Димитровград: ФГУП «ГНЦ НИИАР», 2003.
18. *Зайко И.В., Левченко М.О., Лопаткин А.В.* Нейтронно-физические особенности активной зоны МБИР // Атомная энергия. – 2013. – Т. 114. – №4. – С. 188-191.

Поступила в редакцию 18.12.2015 г.

Авторы

Елисеев Владимир Алексеевич, начальник лаборатории, к.т.н.

E-mail: eliseev@ippe.ru

Коробейникова Людмила Викторовна, старший научный сотрудник

E-mail: lkorobeynikova@ippe.ru

Маслов Павел Александрович, младший научный сотрудник

E-mail: pmaslov@ippe.ru

Малышева Ирина Викторовна, старший научный сотрудник

E-mail: imalysheva@ippe.ru

Матвеев Вячеслав Иванович, ведущий научный сотрудник, к.ф.-м.н.

E-mail: matveev@ippe.ru

Деменева Ирина Владимировна, младший научный сотрудник

E-mail: idemeneva@ippe.ru

UDC 621.039.526

ON FEASIBILITY OF USING NITRIDE AND METALLIC FUEL IN THE MBIR REACTOR CORE

Eliseev V.A., Korobeinikova L.V., Maslov P.A., Malysheva I.V.,

Matveev V.I., Demeneva I.V.

SSC «RF-IPPE n.a. A.I. Leypunsky».

1 Bondarenko sq., Kaluga reg., Obninsk, 249033 Russia

ABSTRACT

MBIR is a 150 MWt multipurpose research sodium cooled fast reactor. It is designed for a broad range of experimental researches conducted in different directions: life tests and operating regime tryouts of advanced fuel types, FEs, AEs, FAs; radiation tests of

advanced structural materials; production of isotopes for various purposes, etc. That is why one of the key requirements for the reactor is high density of neutron flux (not less than $5 \cdot 10^{15}$ n/cm²sec), which, in turn, depends on the type of the fuel used.

Vibrocompacted MOX fuel with a plutonium weight content of ~38% has been adopted currently as the standard MBIR fuel. The capabilities offered by the use of alternative highly dense fuel types in this reactor appear to be promising for the future large-scale nuclear power. The most attractive fuel types for advanced fast reactors are mixed nitride uranium-plutonium fuel and mixed metallic fuel (a three-component uranium-plutonium-zirconium alloy).

A serious problem about power sodium cooled fast reactors refers to positive sodium void reactivity effect which increases even more with growth of fuel density. A characteristic property of nitride fuel is that it does not cause increase in sodium void reactivity effect due to fast neutron absorption by nitrogen, which improves safety in beyond the design basis accidents and lets reactivity margin for fuel burnup be minimized.

From the very beginning of fast reactor developments, metal fuel has been considered due to its highest density and thermal conductivity as well as to the minimum number of the moderator nuclei. All this provides the highest possible breeding, which is essential for fast-developing nuclear power. As applied to MBIR, this fuel provides the hardest possible neutron spectrum, minimum neutron cross sections and, therefore, high density of the flux and fast dpa rate.

Calculation research on the MBIR reactor with advanced types of dense fuel demonstrated that nitride fuel does not let one receive the required value of neutron flux, whereas metal fuel does (practically like MOX fuel). Also, metal fuel provides fast dpa rate though it requires that temperature conditions of irradiations should be changed. Neutronic features of these fuel types have been revealed in comparison with regular MOX fuel.

Key words: multipurpose research sodium cooled fast reactor (MBIR), metallic fuel, nitride fuel, MOX fuel, maximum neutron flux.

REFERENCES

1. Zhemkov I. Yu., Izhutov A. L., Novoselov A. E., Pogljad N. S., Svyatkin M. N. Eksperimental'nye issledovaniya v BOR-60 i analiz vozmozhnosti ih prodolzheniya v MBIR. *Atomnaya energiya*. 2014, v. 116, iss. 5, pp. 280-283 (in Russian).
2. Tuzov A. A., Gulevich A. V., Kochetkov L. A., Tret'yakov I. T., Lukasevich I. B., Zvir A. I., Izhutov A. L., Leont'eva-Smirnova M. V., Celischev A. V. Perspektivnye zadachi MBIR v obosnovanie harakteristik YaEU novogo pokoleniya i ego eksperimental'nye vozmozhnosti. *Atomnaya energiya*. 2015, v. 119, iss. 1, pp. 29-34 (in Russian).
3. Bezzubcev V. S., Emel'janov V. S., Adamov E. O. Innovacionnyj proekt AES s reaktorom BREST i pristancionnym toplivnym ciklom [Innovative Design of NPP with a BREST reactor and fuel cycle]. Trudy II nauchnoj konferencii Minatoma Rossii «Atomnaya energetika. Sostoyanie i perspektivy» [Proc. II science conference Minatom of Russia «Nuclear Energy. Status and Prospects»]. Moscow, 05 July 2002, p. 85 (in Russian).
4. Eliseev V. A., Zabud'ko L. M., Malysheva I. V., Matveev V. I. Nitridnoe toplivo dlya perspektivnogo bystrogo natrievogo reaktora tipa BN-1200. [Nitride fuel for future fast sodium reactor BN-1200]. *Atomnaya energiya*. 2013, v. 114, iss. 5, pp. 266-271 (in Russian).
5. Adamov E. O., Zabud'ko L. M., Matveev V. I., Rachkov V. I., Trojanov V. M., Homjakov Ju. S., Leonov V. N. Sravnitel'nyj analiz preimushhestv i nedostatkov ispol'zovaniya metallicheskogo i nitridnogo smeshannogo uran-plutoniyevo go topliva v bystryh reaktorah. *Izvestija Rossijskoj akademii nauk. Energetika*. 2015, no. 2, pp. 3-15 (in Russian).
6. Zabud'ko L. M., Mamaev L. I., Trufanov A. A. Analiz raschjotnyh i jeksperimental'nyh dannyh s cel'ju vozmozhnogo opredelenija prichin razgermetizacii tvjelov s nitridnym toplivom reaktora BR-10 [Analysis of the calculated and experimental data for purpose determine the possible causes of depressurization of the fuel rods with nitride fuel reactor BR-10]. Sbornik dokladov sed'moj Rossijskoj konferencii po reaktornomu materialovedeniju. [Proc. of the

Seventh Russian conference on reactor material]. Dimitrovgrad. NIIAR Publ., 8-12 Sept 2003, p. 102 (in Russian).

7. Crawford D.C., Porter D.L., Hayes S.L. Fuels for sodium-cooled fast reactors: US perspective. *Journal of Nuclear Materials*. 2007, v. 371, pp. 202-231.

8. Status and Trends of Nuclear Fuels Technology for Sodium Cooled Fast Reactors. *IAEA Nuclear Energy Series*. 2011, no. NF-T-4.1.

9. Fast Reactor Database: 2006 Update. IAEA – TECDOC-1531.

10. Seregin A.S., Kislicina T.S., Tsiboulya A.M. Annotacija kompleksa programm TRIGEX.04 [Abstract complex programs TRIGEX.04]: IPPE Preprint -2828]. Obninsk, FEI Publ., 2000 (in Russian).

11. MMKK. Attestacionnyj pasport programmnoho sredstva [A certification passport software tool] Reg. № 314. Oct 09 2012 (in Russian).

12. Manturov G.N., Nikolaev M.N., Tsiboulya A.M. Sistema gruppovyh konstant BNAB 93 [The system of group constant ABBN 93]. *VANT, ser. Yadernye konstanty*. 1995, iss. 1 (in Russian).

13. Manturov G.N., Nikolaev M.N., Tsiboulya A.M. Programma podgotovki konstant CONSYST. Opisanie primeneniya: Preprint GNC RF-FEI-2828. [CONSYST code for neutron constants preparation. Scope statement: IPPE Preprint -2828]. Obninsk. FEI Publ., 2000 (in Russian).

14. Zabad'ko L.M. Opyt jekspluatacii i problemy raschetnogo obosnovaniya plotnyh vidov topliva. [Operating experience and problems of calculation justification beach fuels]. In «Aktual'nye problemy razrabotki i proizvodstva jadernogo topliva» [Proc. Actual problems of development and production of nuclear fuel], 08–11 Nov 2010. Moscow. MIFI Publ., 2010, pp. 138-159 (in Russian).

15. Chernyj V.A., Demeneva I.V., Stogov V.Ju. Raschetnye issledovaniya dlya obosnovaniya povy-sheniya plotnosti potoka nejtronov reaktora MBIR. In «Bezopasnost' issledovatel'skih yadernyh ustanovok», May 26–30 2014. Dimitrovgrad. AO «GNC NIIAR» Publ., 2014, pp. 35-36 (in Russian).

16. Chernyj V.A., Kochetkov L.A., Bur'evskij I.V., Stogov V.Ju. Povyshenie plotnosti potoka nejtronov v mnogocel'evom bystrom issledovatel'skom reaktore. *Izvestia Visshikh Uchebnikh Zavedeniy. Yadernaya Energetika*. 2013, no. 3, pp. 117-123 (in Russian).

17. Klinov A.V. O celesoobraznosti i tehnicheckoj vozmozhnosti povysheniya plotnosti potoka nejtronov v issledovatel'skih reaktorah. Dimitrovgrad. FGUP «GNC NIIAR» Publ., 2003 (in Russian).

18. Zajko I.V., Levchenko M.O., Lopatkin A.V. Nejtronno-fizicheskie osobennosti aktivnoj zony MBIR. *Atomnaya energiya*. 2013, v. 114, no. 4, pp. 188-191 (in Russian).

Authors

Eliseev Vladimir Alekseevich. , Head of Laboratory, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: eliseev@ippe.ru

Korobeinikova Ludmila Viktorovna , Senior Researcher

E-mail: lkorobeinikova@ippe.ru

Maslov Pavel Aleksandrovich. , Junior Researcher

E-mail: pmaslov@ippe.ru

Malysheva Irina Viktorovna , Senior Researcher

E-mail: imalysheva@ippe.ru

Matveev Vyacheslav Ivanovich , Leading Researcher, Cand. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: matveev@ippe.ru

Demeneva Irina Vladimirovna , Junior Researcher

E-mail: idemeneva@ippe.ru