

2. Терешонок В.А., Степанов В.С., Поваров В.П., Лебедев О.В. Исследование поведения реакторной установки ВВЭР-1000 в переходном режиме, вызванном малым снижением мощности. — Там же, 2002, т. 93, вып. 4, с. 319—320.
3. Филимонов П.Е., Аверьянова С.П. Поддержание равновесного офсета — эффективный способ подавления ксеноновых колебаний в ВВЭР-1000. — Там же, 2001, т. 90, вып. 3, с. 231—233.
4. Аверьянова С.П., Косоуров К.Б., Семченков Ю.М. и др. Испытание усовершенствованных алгоритмов управления энерговыделением ВВЭР-1000 в условиях

маневренных режимов на Тяньваньской АЭС (Китай). — Там же, 2007, т. 103, вып. 5, с. 277—282.

5. Петрунин Д.М., Семенов В.И. Трехмерные программы — имитаторы работы ВВЭР. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика и техника ядерных реакторов, 1985, вып. 9, с. 44—54.
6. Аверьянова С.П., Ковель А.И., Мамичев В.В., Филимонов П.Е. Развитие, внедрение и современное состояние расчетной программы «Имитатор реактора». — Атомная энергия, 2008, т. 105, вып. 4, с. 237—240.

Поступила в Редакцию 25.12.17

УДК 621.039.51

УРАН-ЭРБИЕВОЕ ТОПЛИВО РБМК

Федосов А.М. (НИЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва)

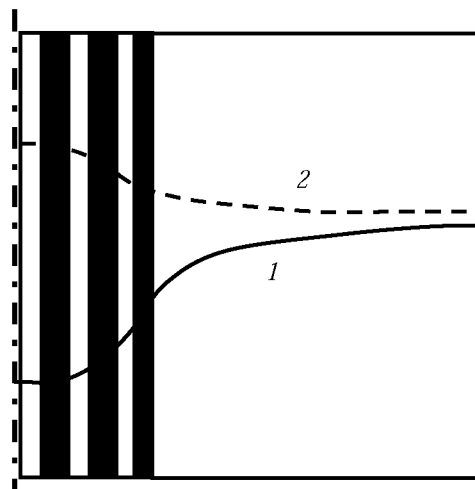
Эрбий рассматривается в качестве перспективного выгорающего поглотителя для легководных реакторов в длительных (~2 лет) кампаниях топлива. В нашей стране накоплен 20-летний опыт полномасштабного использования уран-эрбиевого топлива в РБМК.

Разработка и внедрение уран-эрбиевого топлива РБМК начались после аварии на Чернобыльской АЭС [1, 2]. Для снижения парового коэффициента реактивности α_p примерно в 80 технологических каналов вместо ТВС загрузили дополнительные поглотители из бористой стали, что привело к увеличению расхода ТВС на 30%, ухудшению экономики, быстрому заполнению бассейнов выдержки и хранилищ отработавшего ядерного топлива. Поиски альтернативного пути повышения безопасности РБМК в конце 1980-х — начале 1990-х гг. привели к созданию уран-эрбиевого топлива [3—5].

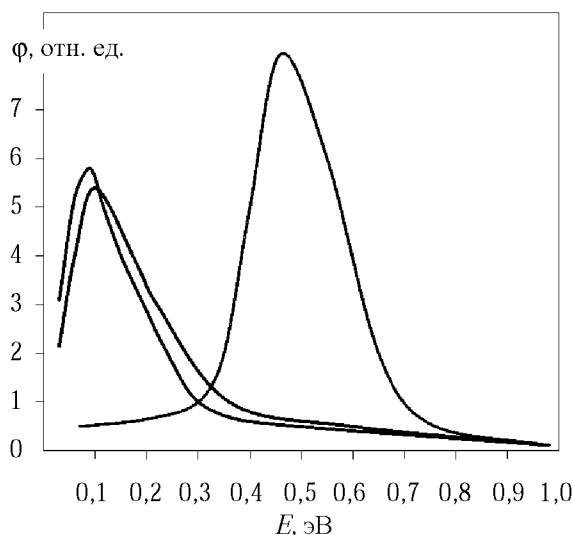
Механизм влияния эрбия на паровой коэффициент реактивности. Природный эрбий содержит шесть стабильных изотопов, из которых основное влияние на баланс нейтронов оказывают ^{166}Er (содержание 33,6%) и ^{167}Er (22,95%). Главную роль играет ^{167}Er , сечение поглощения которого примерно в 10 раз больше, чем ^{166}Er .

Исследования показали, что наиболее эффективным способом снижения парового коэффициента реактивности РБМК является добавление выгорающего поглотителя с резонансным сечением захвата в эпитепловой области энергии в топливо — диоксид урана [5]. Действие

резонансного поглотителя на паровой коэффициент (или эффект) реактивности основано на изменении спектра нейтронов в топливе РБМК при уменьшении содержания воды в канале. Поскольку температура графитового замедлителя ~500 °С примерно на 200 °С выше температуры охлаждающей твэлы воды, при обезвоживании повышается температура нейтронного газа в топливе, т.е. спектр тепловых нейтронов сдвигается в сторону более высокой энергии (рис. 1). Если в топливо добавить изотоп с резонансным сечением поглощения в эпитепловой области энергии, то из-за сдвига спектра поглощение нейтронов при обезвоживании каналов увеличится, что приведет к снижению положительного эффекта обезвоживания и парового коэффициента реактивности (рис. 2).

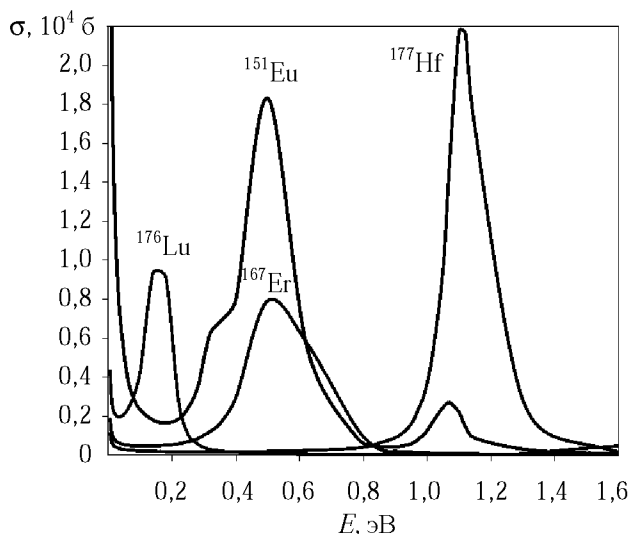


Р и с. 1. Эффективная температура нейтронов в ячейке РБМК с водой (1) и без воды (2): $\blacksquare$ — твэлы; $\square$ — вода; $\square$ — труба канала; $\square$ — графит

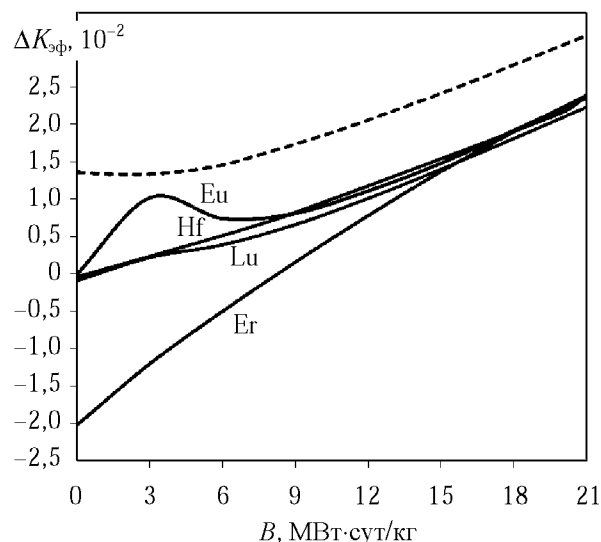


Р и с. 2. Спектр нейтронов в топливе с водой (—), без воды (—), резонанс ^{167}Er , 10^3 б (—)

Было рассмотрено несколько изотопов, имеющих резонансный характер сечения поглощения вблизи тепловой области энергии (рис. 3). Резонанс ^{177}Hf находится далеко по энергетической шкале от области изменения спектра. ^{151}Eu , кроме резонанса в нужной области, имеет большое сечение поглощения вблизи нулевой энергии. Вследствие этого при обезвреживании увеличение поглощения в эпитепловой области компенсируется уменьшением поглощения при малой энергии. Резонанс ^{176}Lu находится почти в тепловой области. Кроме того, ^{176}Lu имеет большое сечение поглощения при малой энергии. Наилучшую зависимость сечения поглощения от энергии для снижения парового эффекта реактивности имеет ^{167}Er с макси-



Р и с. 3. Резонансы в сечении поглощения некоторых изотопов



Р и с. 4. Зависимость парового эффекта реактивности от выгорания для топлива обогащением 2% без поглотителя (- -) и 2,4% с поглотителем природного состава (—)

мальным сечением поглощения 8100 б при энергии 0,47 эВ. Это подтверждается характером зависимости парового эффекта реактивности $\Delta K_{\text{эф}}$ от выгорания топлива для однородной решетки технологических каналов (рис. 4).

Кроме воздействия на паровой эффект реактивности, выгорающий поглотитель в РБМК выравнивает поле энерговыделения. Это связано с уменьшением коэффициента размножения нейтронов при его добавлении в свежее топливо. По данному показателю эрбий также имеет преимущества перед другими поглотителями.

Таким образом, расчетные исследования показали, что эрбий является оптимальным выгорающим поглотителем для топлива РБМК, позволяющим не только уменьшить положительный паровой эффект реактивности, но и выровнять поле энерговыделения [5]. Расчеты также показали, что эрбий целесообразно добавлять равномерно во все твэлы.

Внедрение и сопровождение эксплуатации уран-эрбиевого топлива. Преимуществом предложенного способа снижения парового коэффициента реактивности и повышения эффективности использования топлива являлась также неизменность конструкции ТВС. Изменялся лишь состав топливных таблеток, а именно в диоксид урана добавляли оксид эрбия Er_2O_3 . Это позволило провести НИОКР в сжатые сроки. Расчетные исследования проводили по следующим направлениям: выбор начального обогащения топлива и содержания эрбия, выбор размера

опытных партий ТВС с эрбием и обоснование безопасности их загрузки, разработка стратегии перевода энергоблоков на уран-эрбиевое топливо с учетом других мер совершенствования активной зоны, прогнозные расчеты изменения характеристик РБМК при переходе на уран-эрбиевое топливо и выгрузке дополнительных поглотителей, анализ аварий и обоснование безопасности перехода на новое топливо, анализ безопасности обращения с ТВС с эрбием (свежими и выгоревшими), экономическое обоснование перевода РБМК на новое топливо.

Параллельно экспериментально изучали термомеханические и физико-химические свойства нового топлива: механическую прочность таблеток, термическое расширение, теплопроводность, термостойкость, совместимость с оболочкой, коррозионную стойкость, выход газообразных продуктов деления.

Специалистами АО «ВНИИНМ» были разработаны оптимальные режимы получения исходного сырья и технологические режимы получения топливных таблеток требуемого качества. Уникальная промышленная технология изготовления уран-эрбиевого топлива с применением вихревого смесителя была реализована в ОАО «МСЗ» (г. Электросталь). Данная технология обеспечивает необходимую концентрацию Er_2O_3 в UO_2 и однородность распределения Er_2O_3 по таблетке. Были изготовлены опытные партии, затем началось серийное производство ТВС с эрбием.

Исследование показало, что по большинству характеристик уран-эрбиевое топливо незначительно отличается от обычного диоксида урана. Коэффициент термического расширения такого топлива немного меньше, механическая прочность таблеток немного выше, меньше толщина слоя взаимодействия топлива с циркониевой оболочкой. Коррозионные свойства и выход продуктов деления почти не отличаются от обычного топлива. Добавление эрбия немного снижает теплопроводность топлива, однако это не существенно, особенно с учетом перехода на таблетки с центральным отверстием.

На критическом стенде РБМК НИЦ «Курчатовский институт» для проверки расчетных методов были проведены экспериментальные исследования нейтронно-физических характеристик ТВС с порошком Er_2O_3 в ампулах. Однако эксперименты не позволяли провести прямую

проверку влияния эрбия на паровой эффект реактивности, так как для этого требуется температура графита, близкая к рабочим условиям реактора.

Исторически сложилось так, что уран-эрбиевое топливо впервые было использовано в РБМК-1500 Игналинской АЭС (Литва), поскольку реализованное на энергоблоках с РБМК-1000 повышение обогащения топлива до 2,4% в РБМК-1500 было невозможно из-за повышения температуры графитового замедлителя выше эксплуатационного предела. Начиная с 26 июня 1995 г. в реактор 2-го энергоблока Игналинской АЭС была загружена первая опытная партия из 150 ТВС с эрбием, подтвердившая ожидаемое воздействие эрбия на паровой эффект реактивности, что позволило начать загрузку второй опытной партии из 500 ТВС и выгрузку дополнительных поглотителей [6].

Принятое поэтапное повышение обогащения ^{235}U и содержания эрбия позволяло постепенно увеличивать выгорание топлива с учетом опыта его эксплуатации на предыдущем этапе (см. таблицу). Загрузка опытных партий обеспечивала гибкость внедрения нового топлива. Решение о загрузке очередной партии принималось после успешной эксплуатации предыдущей, т.е. при соответствии основных характеристик прогнозным расчетам.

Поэтапное повышение обогащения и содержания эрбия

Параметр	РБМК-1000			РБМК-1500		
Обогащение, %	2,6	2,8	3	2,4	2,6	2,8
Содержание эрбия, %	0,41	0,6	0,7	0,41	0,5	0,6
Начало загрузки, год	1996	2001	—	1995	2001	2005

Прогнозные расчеты изменения нейтронно-физических характеристик на первом этапе внедрения уран-эрбиевого топлива выполняли по программе STEPAN [7]. В дальнейшем безопасность при загрузке опытных партий и полном переводе реакторов на новое топливо обосновывали с помощью программ STEPAN и SADCO [8]. Обе программы аттестованы для таких расчетов регулирующим органом.

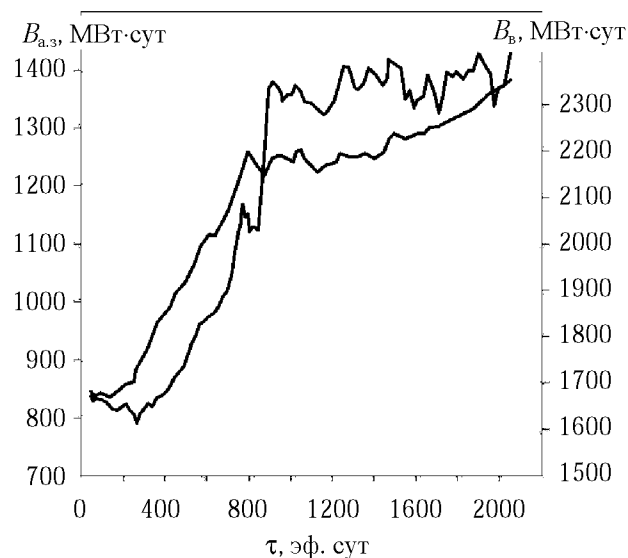
Перевод реакторов на новое топливо занимает несколько лет, особенно учитывая смену поколений ТВС с эрбием разного обогащения.

За это время были проведены мероприятия, повышающие безопасность РБМК. Некоторые из них также влияют на паровой коэффициент реактивности. В частности, для снижения эффекта реактивности при обезвоживании контура системы управления и защиты (СУЗ), который для первоначальной конструкции стержней регулирования составлял $\sim 4\beta_{эф}$, была проведена замена сначала на стержни с ленточным звеном, впоследствии на кластерные регулирующие органы (КРО). Эти меры привели к поэтапному уменьшению воды в каналах СУЗ, что позволило снизить эффект их обезвоживания до менее $1\beta_{эф}$. Однако уменьшение количества воды в каналах СУЗ привело к увеличению парового коэффициента реактивности. По оценкам переход на стержни с ленточным звеном привел к росту парового коэффициента на $0,5—0,6\beta_{эф}$, переход на КРО — еще на $0,2—0,3\beta_{эф}$. Для компенсации этого роста при использовании обычного топлива пришлось бы загрузить еще около 50 дополнительных поглотителей, что окончательно сделало бы топливный цикл РБМК неприемлемым.

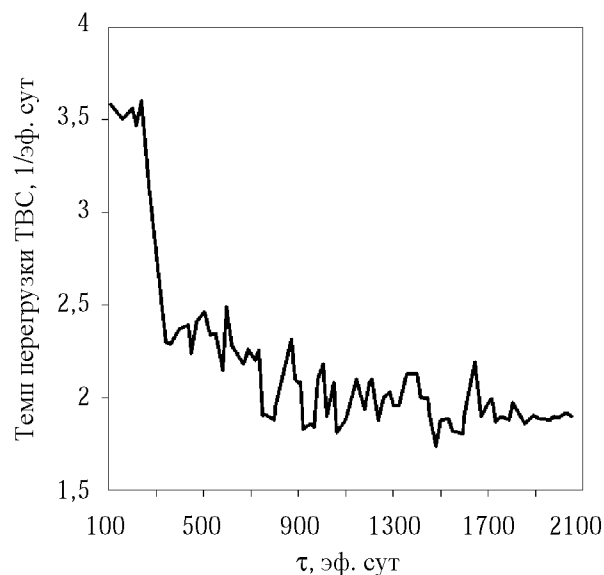
Переход на уран-эрбиевое топливо улучшил характеристики топливного цикла при изменении конструкции стержней регулирования, несмотря на то что для компенсации роста парового коэффициента в активной зоне было оставлено некоторое число дополнительных поглотителей.

Расчетный анализ показал, что перевод РБМК на уран-эрбиевое топливо смягчает последствия аварий. В частности, для проектной аварии с разрывом напорного коллектора, в которой обезвоживается половина активной зоны, на первом этапе резко снижается мощность реактора. Для обычного топлива характерен всплеск мощности. Снижение вызвано тем, что сначала обезвоживаются ТВС с малым выгоранием, содержащие много $^{167}\text{Ег}$, что вносит отрицательный вклад в реактивность. В других авариях положительным фактором топлива с эрбием является увеличение запаса до лимитирующих параметров из-за выравнивания энерговыделения.

Опыт эксплуатации уран-эрбиевого топлива. Некоторые результаты эксплуатации уран-эрбиевого топлива на 2-м энергоблоке Игналинской АЭС приведены на рис. 5, 6 [9].



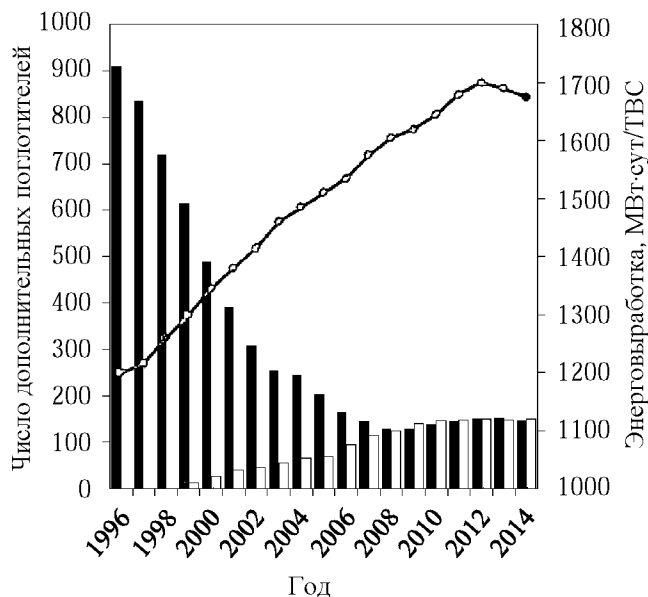
Р и с. 5. Среднее выгорание топлива в активной зоне $B_{a,з}$ (—) и выгружаемого $B_{в}$ (—)



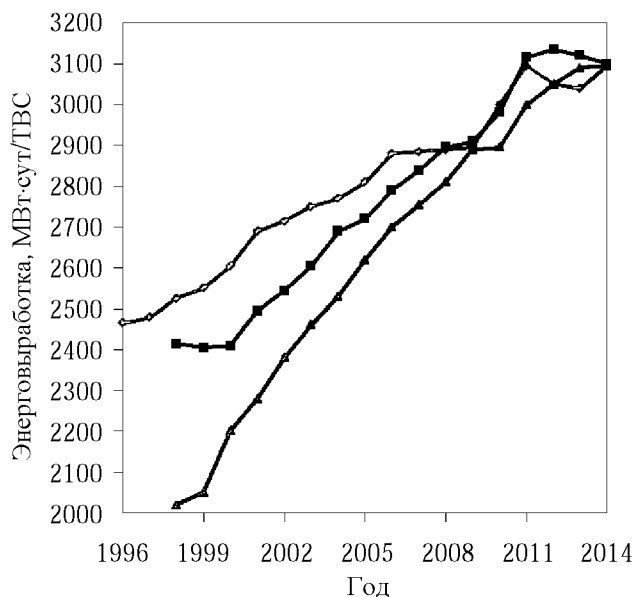
Р и с. 6. Темп перегрузки ТВС на Игналинской АЭС

Переход на новое топливо и выгрузка дополнительных поглотителей при поддержании парового коэффициента реактивности в заданном диапазоне позволили увеличить выгорание топлива более чем на 60%. Темп перегрузок и топливная составляющая себестоимости электроэнергии снизились на 45%.

Загрузка первых ТВС с эрбием в РБМК-1000 началась в 1996 г. со 2-го энергоблока Ленинградской АЭС [10]. На рис. 7, 8 приведены основные результаты загрузки ТВС с эрбием в 11 РБМК-1000 за 18 лет. Кобальтовые дополнительные поглотители — полезные поглотители для наработки $^{60}\text{Со}$. Начиная с 2011 г., средняя энерговыработка (выгорание) ТВС в активной



Р и с. 7. Изменение числа дополнительных поглотителей обычных (■), кобальтовых (□), средней энерговыработки топлива РБМК-1000 (—)



Р и с. 8. Изменение средней энерговыработки топлива РБМК-1000 Ленинградской (—○—), Смоленской (—■—), Курской АЭС (—▲—)

зоне стабилизировалась, поскольку почти все реакторы перешли на новое топливо.

С 1996 по 2014 г. число дополнительных поглотителей уменьшилось с 912 до 143, т.е. почти в 6,5 раза, средняя энерговыработка возросла с 1200 до 1700 МВт·сут/ТВС (на 40%). Выгорание топлива также увеличилось примерно на 40% и составляет в настоящее время в среднем около 28 МВт·сут/кг. Обогащение топлива было увеличено за этот период с 2,4 до 2,8%.

Экономические оценки показывают, что переход от обычного топлива обогащением 2,4% на уран-эрибное обогащением 2,8% с содержанием эрбия 0,6% позволяет за счет снижения расхода ТВС экономить примерно 240 млн руб. в год на энергоблок РБМК-1000. Переход от топлива обогащением 2% на топливо обогащением 2,8% в РБМК-1500 позволил на одном энергоблоке экономить примерно 600 млн руб. в год. Общая экономия от внедрения уран-эрибного топлива за первые 10 лет оценивается суммой более 30 млрд руб. При этом не учитываются затраты на хранение отработавшего топлива, объем которого при использовании эрбия значительно сокращен.

Перспективы использования эрбия в водо-водяных реакторах. В ВВЭР эрбий рассматривается в качестве альтернативы применяемому в настоящее время в качестве выгорающего поглотителя гадолинию. Использование эрбия, который в отличие от гадолиния добавляется во все топливные таблетки, снимает проблему обеспечения ядерной безопасности при производстве и обращении со свежим топливом при повышении его обогащения выше 5%.

Расчетные исследования для современных проектов ВВЭР показывают, что повышение обогащения выше 5% при добавлении эрбия (не более 1%) позволяет для 18-месячных циклов увеличить среднее выгорание топлива на 20%, снизить число ТВС подпитки также примерно на 20%, уменьшить топливную составляющую себестоимости электроэнергии примерно на 5% [11]. По сравнению с гадолиниевым поглотителем энерговыделение выравнивается как по радиусу, так и по высоте реактора. Кроме того, появляется возможность организации 24-месячных топливных циклов с достижением выгорания ~60 МВт·сут/кг.

Выводы. Использование уран-эрибного топлива в РБМК позволило повысить безопасность реактора, обеспечить условия для модернизации стержней регулирования, снизить остроту проблемы хранения отработавшего топлива, улучшить экономические показатели топливного цикла.

Опыт разработки и эксплуатации уран-эрибного топлива РБМК может быть полезен для ВВЭР и некоторых других реакторов.

Статья посвящается памяти Анатолия Игоревича Купалова-Ярополка — инициатора внедрения уран-эрбиевого топлива РБМК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адамов Е.О., Асмолов В.Г., Василевский В.И. и др. Повышение безопасности АЭС с РБМК. — Атомная энергия, 1987, т. 62, вып. 4, с. 219—226.
2. Боршев В.П., Бурлаков Е.В., Жирнов А.Д. и др. Нейтронно-физические характеристики реакторов РБМК до аварии и после выполнения мероприятий по повышению безопасности. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 1992, вып. 1, с. 20—26.
3. Давыдова Г.Б., Кватор В.М., Краюшкин А.В., Федосов А.М. Совершенствование топливной загрузки РБМК. — Атомная энергия, 1991, т. 71, вып. 1, с. 3—8.
4. Давыдова Г.Б., Кватор В.М., Федосов А.М. Использование выгорающих поглотителей в РБМК. — Там же, 1991, т. 71, вып. 4, с. 344—345.
5. Федосов А.М. Влияние выгорающих поглотителей на эффект обезвреживания РБМК. — Там же, 1993, т. 75, вып. 1, с. 67—69.
6. Шевалдин В.Н., Негривода Г.П., Воронцов Б.А. и др. Опыт использования уран-эрбиевого топлива на Игналинской АЭС. — Там же, 1998, т. 85, вып. 2, с. 91—97.
7. Babaytsev M.N., Fedosov A.M., Krayushkin A.V. e.a. The STEPAN Code for RBMK Reactor Calculation: Preprint IAE-5660/5, 1993.
8. Алимов Ю.В., Баринов С.В., Кузнецов П.Б. и др. Общее описание кода SADCO для нейтронных и гидравлических расчетов канальных реакторов типа РБМК. Тезисы докладов IX семинара по проблемам физики реакторов «Проблемы безопасности ядерно-энергетических установок». Москва, 4—8 сентября 1995 г., М., МИФИ, 1995, т. 1, с. 220—222.
9. Воронцов Б., Кривошеин Г., Юрковичус А. и др. Усовершенствование активных зон реакторов РБМК-1500 Игналинской АЭС. Внедрение уран-эрбиевого топлива. — Energetika (журнал Литовской академии наук), 2007, № 1, с. 45—49.
10. Быстриков А.А., Егоров А.К., Иванов В.И. и др. Опыт использования уран-эрбиевого топлива на энергоблоках с РБМК-1000. — Атомная энергия, 2006, т. 100, вып. 3, с. 165—170.
11. Pavlovichev A., Kosourov E., Shcherenko A. e.a. Use of erbium as burnable poison for VVER reactors. — Kerntechnik, 2013, v. 78, № 4, p. 272—279.

Поступила в Редакцию 26.01.18

УДК 621.039.56

ДИНАМИКА ИМПУЛЬСОВ МОЩНОСТИ В ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ РЕАКТОРЕ С НЕПТУНИЕВЫМ ЯДЕРНЫМ ТОПЛИВОМ

Шабалин Е.П., Рязанин М.В. (ОИЯИ, г. Дубна, Московская обл.)

В 2032 г. заканчивается технический ресурс импульсного быстрого реактора ИБР-2М. В связи с этим разрабатываются концепции нового источника нейтронов для ЛНФ ОИЯИ, который должен обладать более высокими характеристиками. Пиковая плотность потока нейтронов должна достигать уровня нескольких единиц на $10^{16} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$. В качестве одного из вариантов такой установки рассматривается импульсный реактор с активной зоной из ^{237}Np [1].

Для обоснования надежной и безопасной работы реактора на нептунии необходимо, в частности, исследовать кинетику и динамику импульса мощности, которая имеет особенности как в сравнении с обычными реакторами постоянного действия, так и с импульсным реактором ИБР-2. Текущая энергия импульса мощности импульсного реактора периодического действия при малых отклонениях реактивности от критической $\epsilon \leq \beta_p$ определяется по выражению

$$Q_p/Q_0 \cong \exp(\epsilon/\beta_p), \quad (1)$$

где Q_0 — средняя установившаяся энергия импульса (соответствует критическому состоянию реактора); величина β_p играет такую же роль, как $\beta_{\text{эф}}$ в реакторе непрерывного действия [2, 3]. Ее называют импульсной долей запаздывающих нейтронов, хотя она слабо связана с эффективной долей запаздывающих нейтронов, зависит только от специфических параметров импульсного реактора — среднего времени жизни поколения быстрых нейтронов, скорости модуляции реактивности и частоты импульсов. Величина β_p в действующем импульсном ИБР-2 в 14 раз меньше $\beta_{\text{эф}}$, соответственно чувствительность реактора к колебаниям реактивности во столько же раз больше по сравнению с реактором, работающим в режиме непрерывной мощности.

Для нептуниевого реактора ситуация осложняется. Вследствие малого времени жизни поколения нейтронов (10 нс, что в 6 раз меньше,