

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ В АВАРИЙНЫХ РЕЖИМАХ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА РЕАКТОРЕ БИГР

Д. Ю. Бардыгин, А. А. Девяткин, С. В. Кабанов, А. К. Лычагин,
А. М. Пичугин, В. В. Сажнов, Н. А. Тесаловский

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Представлена общая информация о проведении испытаний тепловыделяющих элементов на импульсном реакторе БИГР в условиях, моделирующих реактивную аварию. Описан ряд усовершенствований и модификаций в постановке облучательных экспериментов, относящихся к современному периоду работ.

Ключевые слова: реактор БИГР, импульсные облучения твэлов, моделирование реактивной аварии, облучательные устройства.

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF FUEL ELEMENTS BEHAVIOUR UNDER ACCIDENT CONDITIONS AT THE BIGR REACTOR / D. YU. BARDYGIN, A. A. DEVYATKIN, S. V. KABANOV, A. K. LYCHAGIN, A. M. PICHUGIN, V. V. SAZHNOV, N. A. TESALOVSKIY // General information on RIA type conditions modeling tests of fuel elements in pulse reactor BИGR is presented. Some issues on tests setup and methodology development related to modern period of activities are described.

Key words: BИGR reactor, pulsed irradiation of fuel elements, simulation of reactivity accident, irradiating devices.

Введение

В соответствии с требованиями нормативных документов [1] для обоснования безопасности реакторов в авариях реактивного типа (RIA) необходимо экспериментально установить допустимые режимы работы твэлов. С целью решения этой задачи начиная с середины 1990-х гг. специалистами Института ядерной и радиационной физики и Института теоретической и математической физики РФЯЦ-ВНИИЭФ проводились работы по созданию базы и разработке расчетно-экспериментальной методики для исследования поведения твэлов в авариях реактивного типа в экспериментах на реакторе БИГР [2, 3].

Результатом применения методики является получение информации по критериям разрушения твэлов, необходимой для обоснования пределов безопасной эксплуатации энергетических установок в надзорных органах. Получение конечного результата обеспечивается комплексным применением отработанного экспериментального оборудования и методик расчетного сопровождения реакторных экспериментов с твэлами, использующих современные нейтронно-физические и термомеханические коды. Методика использовалась для обоснования допустимых уровней энерговыделения в твэлах различных типов: с оксидным таблеточным топливом, топливом на основе сплавов урана, микротвэлов и др.

Наиболее обширная исследовательская программа выполнена для топлива реакторов типа ВВЭР. В 1990-х гг. были проведены 12 экспериментов с рефабрикованными твэлами (выпущен отчет NRC NUREG-0213 [4]) и большое количество экспериментов с необлученным топливом.

На современном этапе в рамках договоров с АО «ВНИИНМ» с 2012 г. проводятся эксперименты с твэлами ВВЭР, имеющими модифицированные конструкционные параметры (топливные таблетки без центрального отверстия и более тонкая оболочка). Испытываются твэлы как с необлученным, так и с облученным топливом.

В 2013 г. была проведена 5-я серия экспериментов с выгоревшими твэлами, в ходе которой испытывались твэлы, имеющие топливные таблетки без центрального отверстия (с повышенной ураноемкостью) и более тонкую оболочку. Также проводились испытания твэлов с необлученным топливом, в том числе, впервые с топливом, содержащим выгорающий поглотитель.

Кроме того, проводятся испытания твэлов прежних конструкций, но с повышенной глубиной выгорания. В 2014 г. была проведена серия экспериментов с образцами твэлов ВВЭР-1000, в ходе которой испытывались твэлы с рекордной глубиной выгорания: более 72 МВт·сут./кг U. Запланировано проведение новых экспериментов с топливом ВВЭР, ведется подготовка к ним.

В период 2012–2014 гг. в рамках контракта с Корейским исследовательским институтом атомной энергии (KAERI) проведены эксперименты с твэлами на основе интерметаллического топлива. В результате исследований определены значения удельной энтальпии, соответствующие разрушению твэлов «свежим» и «выгоревшим» уран-циркониевым топливом. Для решения задачи были проведены успешная адаптация и усовершенствование расчетно-экспериментальной методики для ее применения к стержневым твэлам, имеющим отличную от твэлов ВВЭР конструкцию. Ранее испытания необлученных твэлов с уран-циркониевым топливом проводились также

в реакторе Гидра (РНЦ «Курчатовский институт») [5].

В статье приведена общая информация о постановке облучательных экспериментов с твэлами на БИГР и отдельно рассмотрены некоторые особенности подготовки и проведения экспериментов, относящиеся к современному периоду работ.

Общие сведения о постановке облучательных экспериментов

Реактор БИГР относится к классу аperiодических исследовательских импульсных реакторов (исследовательский импульсный ядерный реактор на быстрых нейтронах) [6]. Благодаря свойствам уникального уран-графитового топлива установка позволяет генерировать в активной зоне (АЗ) импульсы делений с высокими значениями энерговыделения и получать рекордные значения интегрального потока нейтронов за импульс на облучательных позициях. Минимальная полуширина колоколообразной части для импульса на мгновенных нейтронах составляет ~2 мс, при этом достигается значение интегрального потока нейтронов у боковой поверхности $\sim 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Пример формы импульса делений в АЗ представлен на рис. 1 (импульс на мгновенных нейтронах, режим с остановкой импульсного стержня в АЗ).

На установке создан комплекс оборудования, предназначенного для проведения экспе-

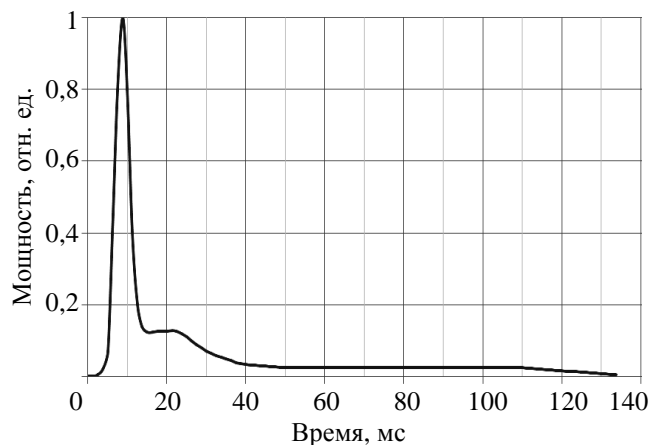


Рис. 1. Форма импульса делений в АЗ реактора БИГР

риментальных исследований поведения тепловыделяющих элементов энергетических реакторов в условиях, моделирующих реактивные аварии на ядерных энергетических установках. Комплекс позволяет проводить испытания экспериментальных твэлов, содержащих как свежее (необлученное) топливо, так и выгоревшее.

Основными составными элементами комплекса являются облучательные устройства для конвертации спектра нейтронов утечки реактора (блоки отражателя-замедлителя (БОЗ)) и облучательные ампулы.

Исходный спектр нейтронов со средней энергией $\sim 0,8$ МэВ может использоваться для облучения твэлов быстрых реакторов или трансформироваться при помощи специально подобранной комбинации замедляющих нейтроны материалов в требуемый спектр. Облучательные устройства типа БОЗ размещаются снаружи АЗ БИГР.

Получаемым в результате применения БОЗ значениям интегрального потока замедленных нейтронов в облучательных полостях соответствуют уровни удельного энерговыделения в топливе до $\sim 40 \cdot 10^3$ Дж/г ^{235}U (в расчете на максимально разрешенное энерговыделение в АЗ – 280 МДж). Эффект увеличения потока замедленных нейтронов по сравнению с облучениями на невозмущенном спектре нейтронов утечки достигается за счет следующих механизмов:

1) трансформации спектра нейтронов утечки в объеме облучательной полости БОЗ за счет применения в составе БОЗ материалов, эффективно рассеивающих и замедляющих нейтроны;

2) возмущения функции распределения плотности делений по объему АЗ (увеличение плотности делений в области АЗ, примыкающей к БОЗ), приводящего к увеличению интегрального потока нейтронов утечки в месте размещения объекта испытаний.

На рис. 2 и 3 представлены схемы размещения БОЗ у боковой поверхности реактора и ампулы в облучательной полости БОЗ.

Экспериментальные твэлы испытываются в специальных, оснащенных инструментами

контейнерах (ампулах), обеспечивающих безопасность проведения экспериментов (защиту от радиоактивных загрязнений). Разработаны экспериментальные ампулы различных типов, предназначенные для испытаний свежих и выгоревших твэлов в различных условиях. Испытания могут проводиться в водной среде при давлении от 0,1 МПа до 17 МПа или в воздухе.

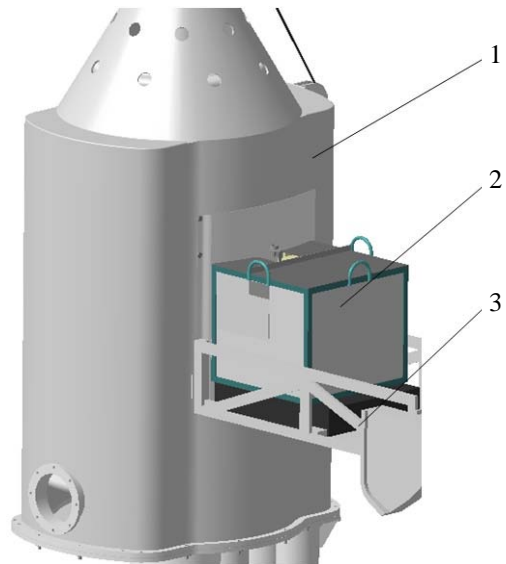


Рис. 2. Размещение БОЗ у боковой поверхности реактора: 1 – реактор БИГР; 2 – БОЗ; 3 – транспортное устройство

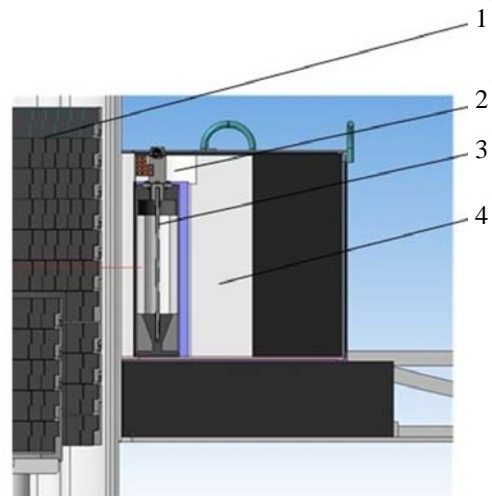


Рис. 3. Схема размещения ампулы в БОЗ: 1 – топливные кольца АЗ БИГР; 2 – ампула; 3 – твэл; 4 – БОЗ

Ампулы, предназначенные для экспериментов со свежим топливом, обеспечивают из-

мерение температур оболочки твэлов и элементов ампулы и давления среды в ампуле. Схемы некоторых типов ампул приведены на рис. 4.

Удельное энерговыделение в топливе твэлов в импульсных облучениях определяется на основании результатов статических калибровочных экспериментов и результатов нейтронно-физических расчетов.

Разработка и применение нового облучательного устройства

На современном этапе работ было создано и исследовано облучательное устройство типа

БОЗ на основе бериллия, материала, обладающего малым сечением поглощения, большим числом атомов в 1 см^3 и большим сечением рассеяния.

Состав БОЗ выбирался на основании имеющегося опыта применения аналогичных устройств. Были экспериментально исследованы два варианта БОЗ, их изображения приводятся на рис. 5. Конструктивно БОЗ представляет собой металлический тонкостенный контейнер, содержащий бериллиевые, графитовые и стальные блоки. Материал каркаса и стенок корпуса – сталь. Передняя стенка изготовлена из стального листа толщиной 0,5 мм.

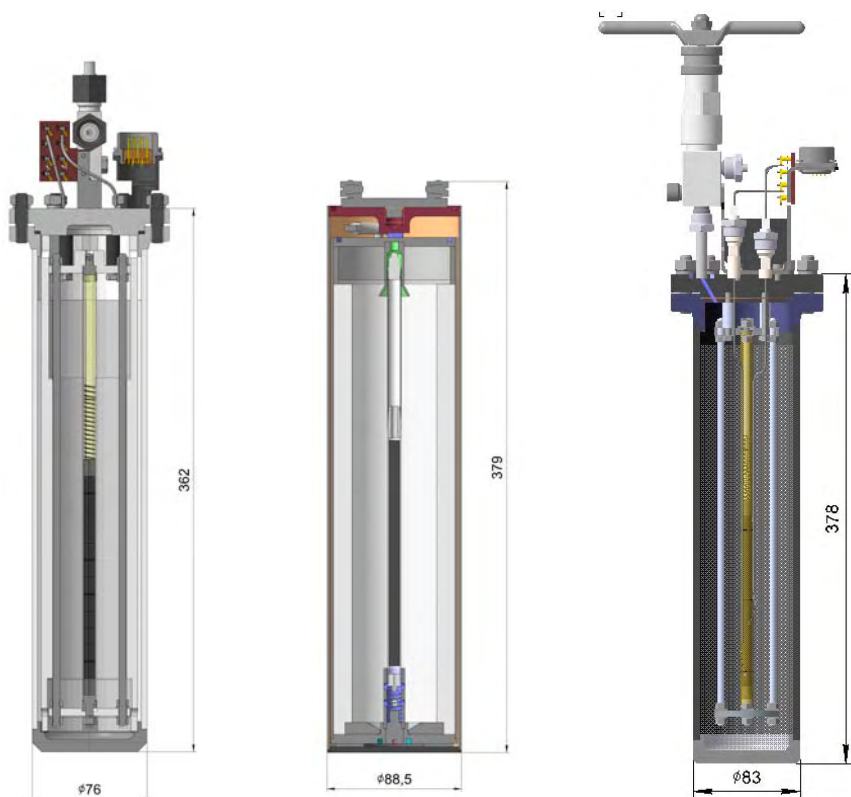


Рис. 4. Схемы облучательных ампул

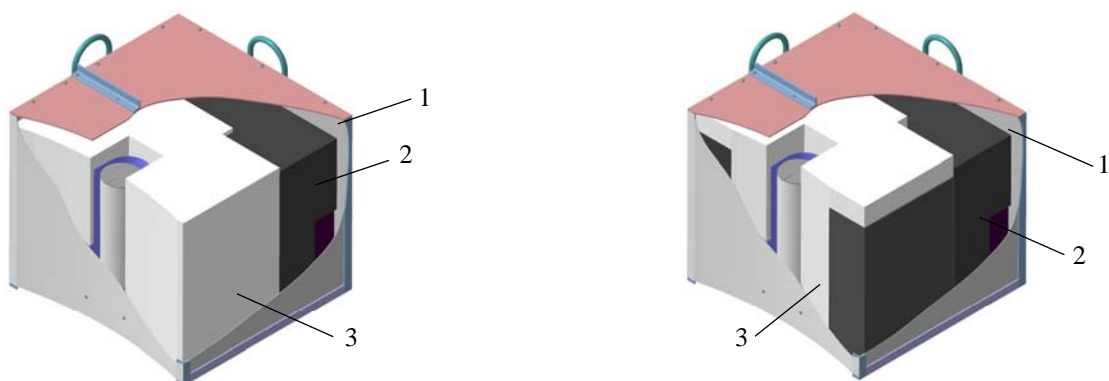


Рис. 5. Варианты БОЗ: 1 – сталь; 2 – графит; 3 – бериллий

Бериллиевая и графитовая области БОЗ набраны из отдельных элементов. В области БОЗ, примыкающей к передней стенке, находится вертикальная полость, предназначенная для размещения облучаемых объектов.

В дальнейшем проведенные расчетные исследования подтвердили, что выбранная структура БОЗ близка к оптимальной в аспекте достижения максимального удельного энерговыделения в топливе испытываемых твэлов.

Созданное облучательное устройство применяется во всех экспериментах современного этапа и обеспечивает достижение необходимых уровней удельного энерговыделения в соответствии с задачами испытаний.

Использование новой облучательной позиции

Эксперименты по облучению твэлов, содержащих выгоревшее топливо, характеризуются своими особенностями из-за специфики объектов испытаний. В связи с тем, что ампулы с твэлами являются мощными источниками гамма-излучения (из-за наличия в выгоревшем топливе значительного количества радиоактивных долгоживущих осколков деления и продуктов их превращений), операции по загрузке ампул в облучательное устройство выполняются с применением дистанционно управляемых электрических грузоподъемных механизмов, стационарно размещенных в помещениях комплекса. Для выполнения операций по загрузке и выгрузке ампул разработана специальная процедура, обеспечивающая радиационную безопасность проведения работ. Отработке технологии проведения работ с ними было уделено повышенное внимание, так как изначально комплекс БИГР не оснащался специализированным оборудованием для выполнения операций с ампулами.

Во всех проводившихся ранее экспериментах объекты испытаний (твэлы в герметичных ампулах) размещались в различных модификациях облучательного устройства БОЗ, установленного на загрузочном столе специального стенда.

В рамках 6-й серии экспериментов с топливом ВВЭР испытывались твэлы, содержащие топливо с рекордной глубиной выгорания 72–74 МВт·сут./кг U. Возрастание мощности дозы гамма-излучения от ампул, обусловленное ростом величины выгорания, делало принципиально невозможным проведение работ по существовавшей технологии. В связи с этим уже на подготовительной стадии работы было принято решение об использовании для проведения 6-й серии экспериментов с выгоревшим топливом другой облучательной позиции, находящейся с противоположной стороны реактора.

Загрузка на выбранную облучательную позицию проводится из другого лабораторного помещения комплекса с применением другого транспортно-загрузочного устройства. Размеры лабораторного помещения и особенности размещения оборудования в нем позволяют производить операции с ампулами (загрузка в полость БОЗ и выгрузка из полости БОЗ) при меньшем радиационном воздействии на персонал.

Материальный состав и геометрические характеристики облучательного устройства БОЗ при этом не изменялись, было изменено только его расположение относительно АЗ БИГР. Изменение облучательной геометрии представлено на рис. 6: приведена условная схема, позволяющая сравнить варианты размещения БОЗ у боковой поверхности реактора в различных редакциях эксперимента.

Для технической реализации принятого решения по схеме проведения экспериментов выполнены следующие работы:

1) разработаны и изготовлены дополнительное оборудование и оснастка, предназначенные для размещения облучательного устройства БОЗ на другой относительно АЗ БИГР облучательной позиции;

2) проведены экспериментальные исследования для оценки изменения параметров облучательного устройства БОЗ при его размещении на другой относительно АЗ БИГР позиции. Проведен анализ результатов, сделано заключение об отсутствии необходимости дополнительного изменения экспериментального оборудования;

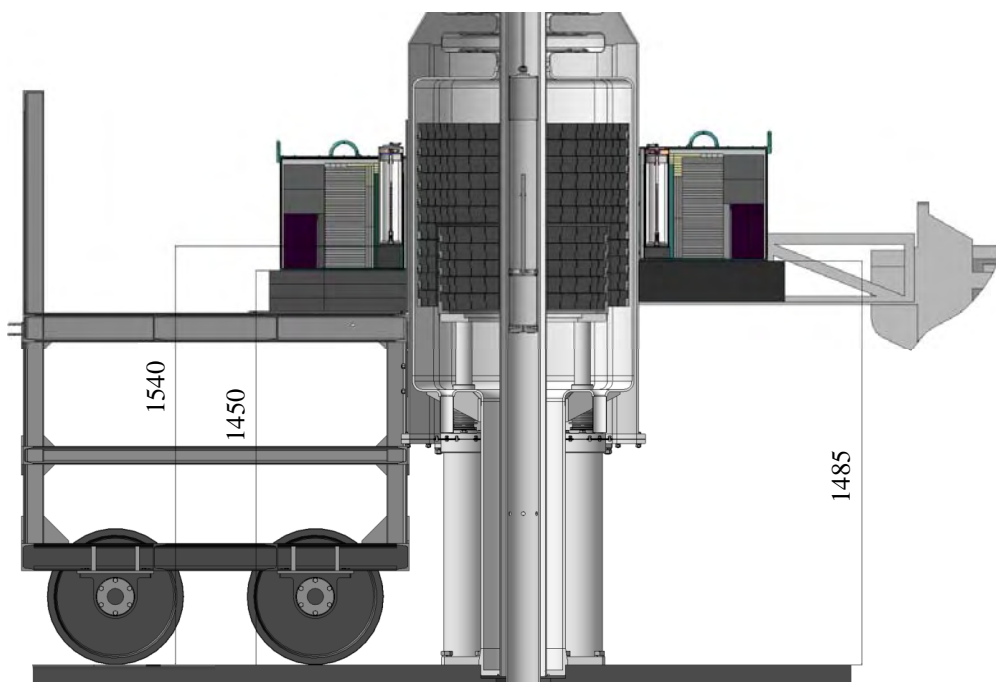


Рис. 6. Сравнительная схема размещения БОЗ на телеге (новая позиция, слева) и загрузочном столе стенда (прежняя позиция)

3) отработана модифицированная процедура обращения с ампулами, содержащими твэл, обеспечивающая безопасность персонала при проведении работ по загрузке и выгрузке в новой редакции экспериментов с учетом увеличения глубины выгорания топлива и, соответственно, радиационных характеристик объектов испытаний.

Унификация структуры облучательных ампул

При проведении экспериментов с твэлами на основе интерметаллического топлива был применен усовершенствованный подход при выборе конструктивного облика облучательных ампул. Эксперименты состояли из ряда последовательных взаимосвязанных этапов: калибровочные эксперименты, импульсные эксперименты с необлученными твэлами, импульсные эксперименты с облученными твэлами.

Для выбора схемы экспериментальных устройств проводились нейтронно-физические расчеты. В результате расчетных исследований были получены оптимальные значения конструктивных параметров облучательных

ампул с точки зрения выполнения требований к режимам нагружения твэлов в экспериментах. На рис. 7 представлены изображения (вертикальный разрез) трех типов облучательных ампул. Следует обратить внимание, что в части основных конструктивных параметров (диаметр корпуса, эффективная толщина стенки,

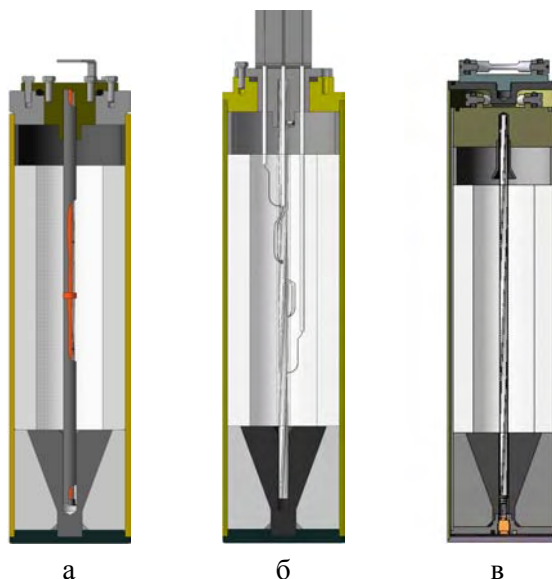


Рис. 7. Облучательные ампулы: а – для калибровочных экспериментов; б – для импульсных экспериментов с необлученными твэлами; в – для импульсных экспериментов с облученными твэлами

размеры металлических и полиэтиленовой вставок) представленные ампулы совпадают. Влияние имеющихся отличий в конструкциях облучательных ампул на количество делений в центральной части твэла оценивалось по результатам расчетных исследований.

Особенность примененного подхода заключается в максимальной унификации структуры ампул разного типа с точки зрения основных параметров, влияющих на формирование профиля энерговыделения. Это позволило, в первую очередь, повысить точность определения ключевых параметров, характеризующих воздействие на испытываемые твэлы, и, во-вторых, облегчить комплексную трактовку экспериментальных результатов, получаемых на каждом из этапов.

Заключение

Начиная с 1990-х гг. в РФЯЦ-ВНИИЭФ развивается направление проведения испытаний твэлов на стойкость к условиям, моделирующим реактивную аварию с использованием установки на основе реактора БИГР.

Результатом применения методики является получение информации по критериям разрушения твэлов, необходимой для обоснования пределов безопасной эксплуатации энергетических установок в надзорных органах. Получение конечного результата обеспечивается комплексным применением отработанного экспериментального оборудования и методик расчетного сопровождения реакторных экспериментов с твэлами, использующих современные нейтронно-физические и термомеханические коды.

Совершенствование экспериментального оборудования и расчетных методов обеспечивает гибкую адаптацию комплекса к проведению экспериментов с твэлами принципиально отличных типов как по конструкции, так и по составу топлива.

Список литературы

1. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций. НП-082-07. Утверждены Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору. 10.12.2007 г. № 4.

2. Богданов В. Н., Ильин В. И., Колесов В. Ф. и др. Поведение твэлов в авариях типа RIA // Атом. 2003. № 22. С. 29–31.

3. Исследования поведения тепловыделяющих элементов в аварийных режимах в экспериментах на реакторе БИГР // Сб. тр. междунар. конф. «Исследовательские реакторы в разработке ядерных технологий нового поколения и фундаментальных исследованиях». – Демитровград: ГИЦ НИИАР, 2012.

4. Yegorova L. et al. Experimental Study of narrow pulse effects on the behavior of high burnup fuel rods with Zr-1%Nb cladding and UO₂ fuel (VVER type) under reactivity-initiated accident conditions: Program approach and analysis results // US Nuclear Regulatory Commission. NUREG/IA-0213. 2006.

5. Koo Y. H. et al. Behavior of unirradiated Zr based uranium metal fuel under reactivity initiated accident conditions // Nucl. Eng. and Design. 2008. 238. P. 1592–1600.

6. Колесов В. Ф. Апериодические импульсные реакторы: Монография в 2 т. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2007. Т. 1. С. 68–75.

Контактная информация –

Тесаловский Николай Андреевич,
начальник научно-исследовательского
сектора ИЯРФ,
РФЯЦ-ВНИИЭФ,
e-mail: tesalovskiy@expd.vniief.ru

Статья поступила в редакцию 10.06.2016.

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2016, вып. 4, с. 85–91.