

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ В АВАРИЙНЫХ РЕЖИМАХ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА РЕАКТОРЕ БИГР

## EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF FUEL ELEMENTS BEHAVIOUR UNDER ACCIDENT CONDITIONS AT THE BIGR REACTOR

*Д. Ю. Бардыгин, А. А. Девяткин, А. М. Пичугин, В. В. Сажнов, Н. А. Тесаловский*  
*D. U. Bardygin, A. A. Devyatkin, A. M. Pichugin, V. V. Sazhnov, N. A. Tesalovskiy*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»,  
пр. Мира, 37, Саров, Нижегородская область, 607188, Россия  
Federal State Unitary Enterprise «Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics»

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.

General information on RIA type conditions modeling tests of fuel elements in pulse reactor BIGR is presented. Some issues on tests setup and methodology development related to modern period of activities are described.

### 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 90-х годов во ВНИИЭФ специалистами ИЯРФ и ИТМФ 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 регулирующих 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 были проведены 12 экспериментов с рефабрированными твэлами (выпущен отчет NRC NUREG-0213 [4]) и большое количество экспериментов с необлученным топливом.

На современном этапе в рамках договоров с АО «ВНИИИМ» с 2012 г. проводятся эксперименты с твэлами ВВЭР, имеющими модифицированные конструкционные параметры (топливные таблетки без центрального отверстия и утоненная 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 утоненную 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 со «свежим» и «выгоревшим» уранциркониевым 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 уранциркониевым топливом проводились также в реакторе Гидра (РНЦ «Курчатовский институт») [5].

В докладе 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 аperiodических исследовательских импульсных реакторов (исследовательский импульсный ядерный реактор на быстрых нейтронах) [6].

Благодаря свойствам уникального уранграфитового 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  $\sim 2$  мс, при этом достигается значение интегрального потока нейтронов у боковой поверхности  $\sim 1 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup>. 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 экспериментальных исследований поведения тепловыделяющих элементов энергетических реакторов в условиях, моделирующих реактивностные аварии на ядерных энергетических установках. Комплекс позволяет проводить испытания экспериментальных твэлов, содержащих как свежее (необлученное) топливо, так и выгоревшее топливо.

Основными составными элементами комплекса являются облучательные устройства для кон-

вертации спектра нейтронов утечки реактора (блоки отражателя-замедлителя (БОЗ)) и облучательные ампулы.

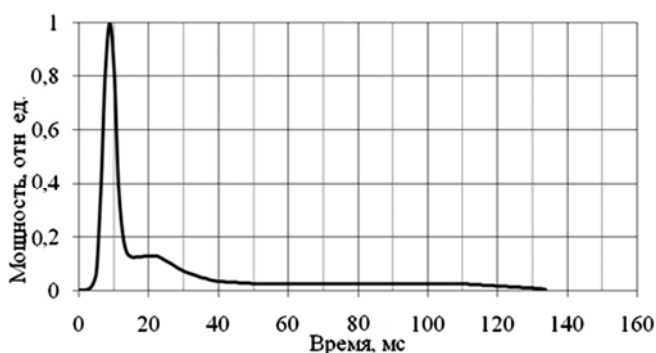


Рис. 1. Форма импульса делений в АЗ реактора БИГР

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<sup>235</sup>U (в расчете на максимальное энерговыделение в АЗ). Эффект увеличения потока замедленных нейтронов по сравнению с облучениями на невозмущенном спектре нейтронов утечки достигается за счет следующих механизмов:

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

2) возмущение 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 инструментированных 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.

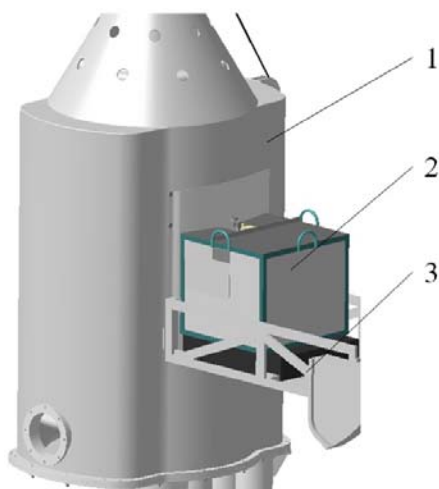


Рис. 2. Размещение БОЗ у боковой поверхности реактора: 1 – реактор БИГР; 2 – БОЗ; 3 – транспортное устройство

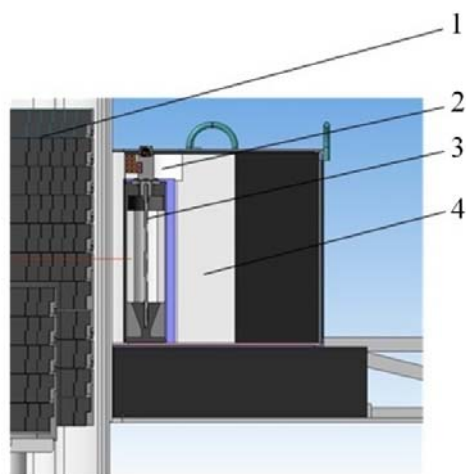


Рис. 3. Схема размещения ампулы в БОЗ: 1 – топливные кольца АЗ БИГР; 2 – ампула; 3 – твэл; 4 – БОЗ

Ампулы, предназначенные для экспериментов со свежим топливом, обеспечивают измерение температур оболочки твэлов и элементов ампулы и давления среды в ампуле. Изображения 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 как материала, обладающего лучшими по отношению к графиту и полиэтилену ядерно-физическими свойствами, определяющими эффективность замедления нейтронов.

Состав БОЗ выбирался на основании имеющегося опыта применения аналогичных устройств. Были экспериментально исследованы два варианта БОЗ, их изображения представлены 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. 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.

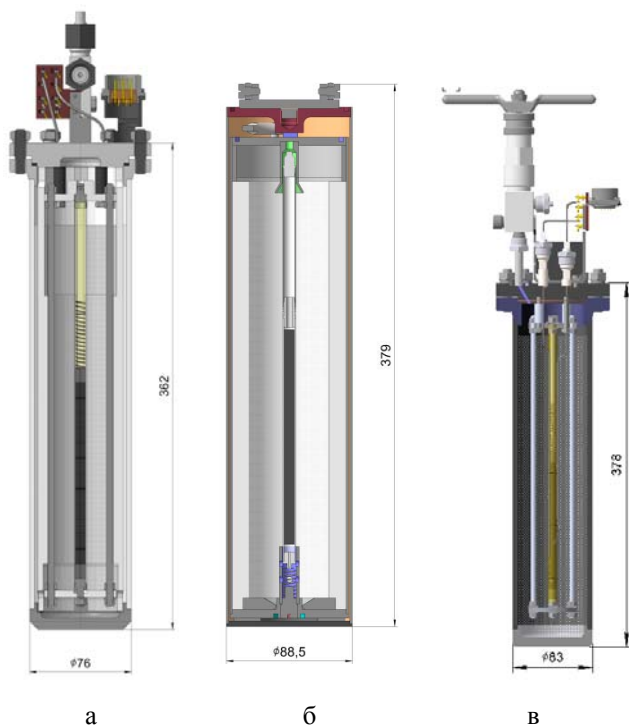


Рис. 4. Изображения облучательных ампул

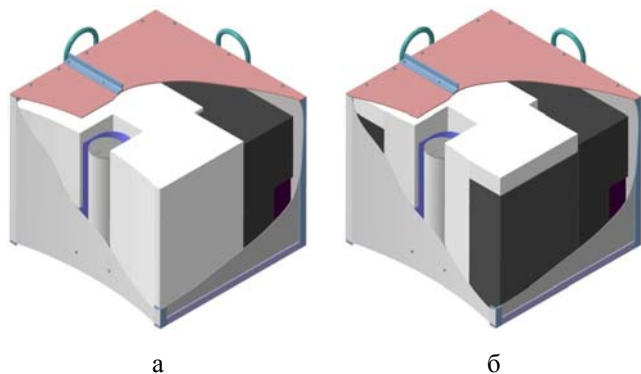


Рис. 5. Изображения вариантов БОЗ

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. Оработке технологии проведения работ с ними было уделено повышенное внимание, т.к. изначально комплекс БИГР не оснащен 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, содержащее топливо с рекордной глубиной выгорания – (72–

74) МВт·сут./кг U. Возрастание значений 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.

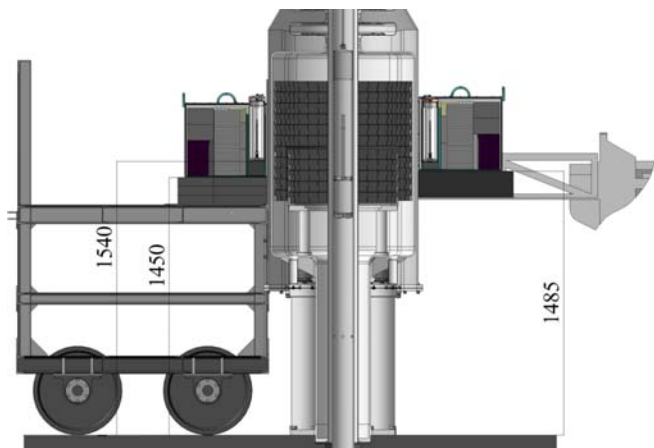


Рис. 6. Сравнительная схема размещения БОЗ на телеге (новая позиция) и загрузочном столе стенда (прежняя позиция)

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 с целью 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.

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: ампула для калибровочных экспериментов (а), ампула для импульсных экспериментов с необлученными твэлами (б), ампула для импульсных экспериментов с облученными твэлами (в).

Следует обратить внимание, что в части основных конструктивных параметров (диаметр корпуса, эффективная толщина стенки, размеры металлических и полиэтиленовой вставок) представленные ампулы совпадают. Влияние имеющихся отличий в конструкциях облучательных ампул на величину количества делений в центральной части твэла оценивалось по результатам расчетных исследований.

Следует обратить внимание, что в части основных конструктивных параметров (диаметр корпуса, эффективная толщина стенки, размеры металлических и полиэтиленовой вставок) представленные ампулы совпадают. Влияние имею-

щихся отличий в конструкциях облучательных ампул на величину количества делений в центральной части твэла оценивалось по результатам расчетных исследований.

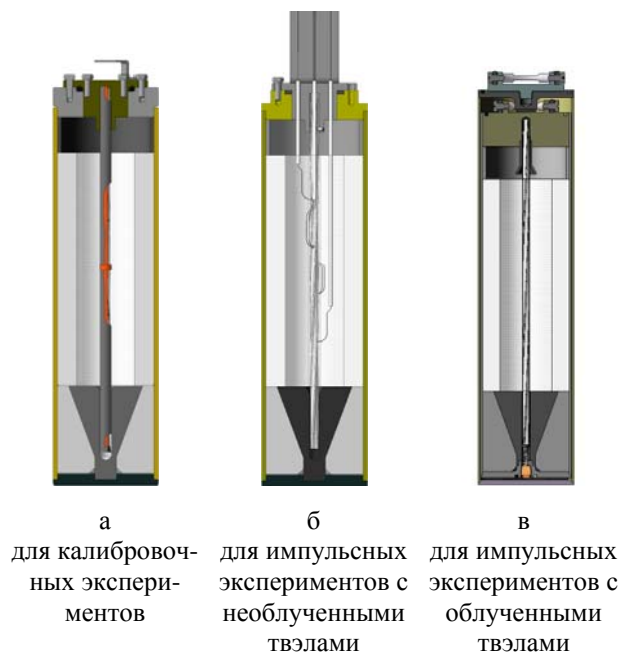


Рис. 7. Облучательные ампулы

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 годов 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 регулирующих 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.
2. В. Н. Богданов, В. И. Ильин, В. Ф. Колесов и др. Поведение твэлов в авариях типа RIA // Атом. 2003. № 22 . С. 29–31.
3. Исследования поведения тепловыделяющих элементов в аварийных режимах в экспери-

ментах на реакторе БИГР // Сб. тр. межд. конф. «Исследовательские реакторы в разработке ядерных технологий нового поколения и фундаментальных исследованиях» (г. Димитровград, 5–9 декабря 2011 г.). ГНЦ 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 UO<sub>2</sub> fuel (VVER type) under reactivity-initiated accident conditions: Program approach and analysis results // US Nuclear Regulatory Commission. NUREG/IA-0213. 2006.

5. Y. H. Koo 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. Аperiodические импульсные реакторы: Монография в 2 т. Т. 1. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2007. С. 68–75.