

АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПО РЕАЛИЗАЦИИ ИСПЫТАНИЙ ТВЭЛОВ НА РЕАКТОРЕ БИГР С ПАРАМЕТРАМИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ, ПРИБЛИЖЕННЫМИ К УСЛОВИЯМ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Д. Ю. Бардыгин, А. А. Девяткин, Н. А. Тесаловский, С. А. Игумнов, С. В. Деманов, А. К. Лычагин, С. В. Кабанов, А. В. Степанов

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

Введение

Для исследования поведения тепловыделяющих элементов (твэлов) энергетических реакторов в условиях, моделирующих реактивностные аварии, в РФЯЦ-ВНИИЭФ на базе импульсного реактора БИГР создан комплекс оборудования и разработана расчетно-экспериментальная методика определения параметров, характеризующих стойкость твэлов [1]. Получаемые результаты необходимы для обоснования пределов безопасной эксплуатации энергетических установок.

Наиболее обширная программа выполнена для топлива реакторов типа ВВЭР (по договорам с АО «ВНИИНМ», г. Москва) [2].

Облучения твэлов проводятся в герметичных ампулах, заполненных водой, при начальной температуре, соответствующей комнатной.

С целью развития методов проведения испытаний выполнен анализ технических возможностей по реализации ампульных испытаний на БИГР с параметрами теплоносителя, соответствующими по температуре и давлению параметрам в реакторах ВВЭР.

Применяемая постановка экспериментов

Реактор БИГР относится к классу аperiodических импульсных реакторов, рис. 1. В качестве топливного материала используется однородная смесь диоксида урана с графитом. Отношение числа ядер углерода к числу ядер ^{235}U – 16. Обогащение урана по изотопу ^{235}U – 90 % [3].

Топливная часть активной зоны (АЗ) имеет вид полого цилиндра высотой 670 мм, внешним диаметром 760 мм и внутренним диаметром 180 мм. Расположение цилиндра вертикальное. Вертикальный разрез АЗ БИГР приведен на рис. 1а.

Реактор БИГР расположен в центре зала на расстоянии ~4 м от стен и на высоте ~1,6 м от пола. Облучаемые объекты могут размещаться в контейнере центрального канала и у боковой поверхности АЗ. Доставка объектов на облучательную позицию производится из смежных с реакторным залом помещений при помощи транспортных устройств.

В рамках договоров с АО «ВНИИНМ» проводятся испытания твэлов энергетических реакторов типа ВВЭР, содержащих как необлученное, так и облученное топливо.

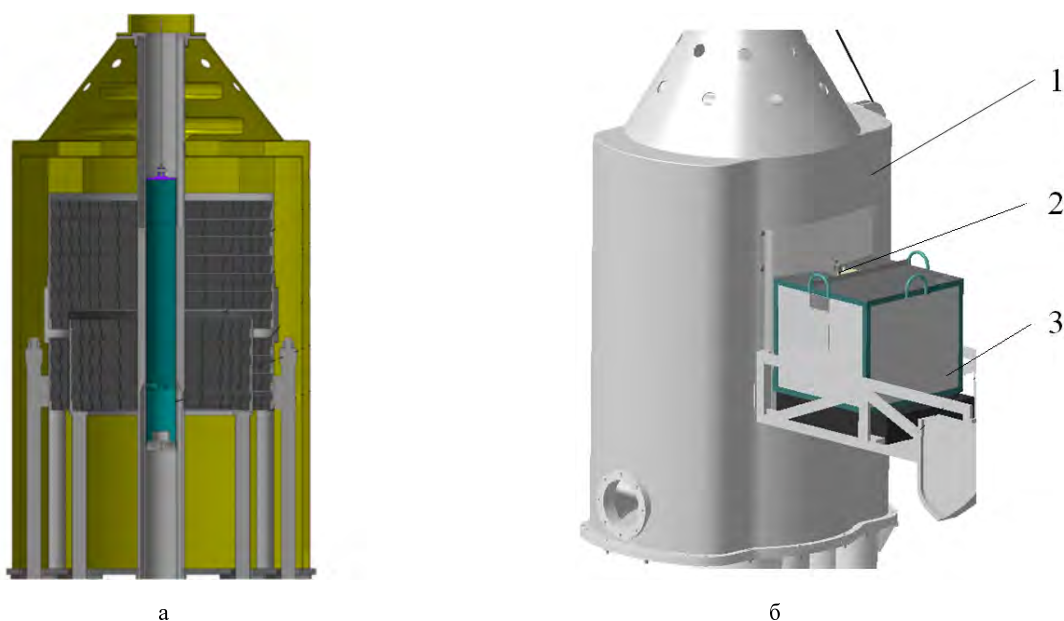


Рис. 1. Реактор БИГР: а – вертикальный разрез АЗ; б - АЗ с БОЗ: 1 – реактор БИГР, 2 – ампула, 3 – БОЗ

Испытываемые твэлы представляют собой укороченные образцы полномасштабных твэлов реакторов типа ВВЭР. Твэлы состоят из цилиндрической оболочки (Э110) длиной ≈ 290 мм и двух концевых заглушек, высота топливного столба ≈ 150 мм. При изготовлении твэлов с облученным топливом к фрагменту (длиной ≈ 150 мм), вырезанному из полномасштабного твэла (отработавшего на реакторе), приваривается переходник и компенсационный объем в виде полого цилиндра из сплава Э110 диаметром равным диаметру фрагмента.

Основными составными элементами испытательного комплекса на БИГР являются облучательные устройства для смягчения спектра нейтронов утечки реактора (блоки отражателя-замедлителя (БОЗ)) и облучательные ампулы. Общий вид АЗ реактора с БОЗ приведен на рис. 1б.

Разработаны экспериментальные ампулы различных типов, предназначенные для испытаний твэлов в различных условиях. Испытания необлученных твэлов могут проводиться в водной среде при давлении от 0.1 МПа до 17 МПа или в воздухе. Испытания твэлов, содержащих облученное топливо, проводятся в водной среде при давлении 0.1 МПа.

Ампулы представляют собой герметичные цилиндрические контейнеры (для облученного топлива с двойными стенками). Основной конструкционный материал ампулы – нержавеющая сталь 12Х18Н10Т. В ампулах часть воды замещается на полиэтилен для обеспечения более эффективного замедления нейтронов и их удержания в области вокруг твэла.

На рис. 2 представлены изображения облучательных ампул, предназначенных для работ с твэлами, содержащими необлученное топливо, рис. 2а, и облученное топливо, рис. 2б.

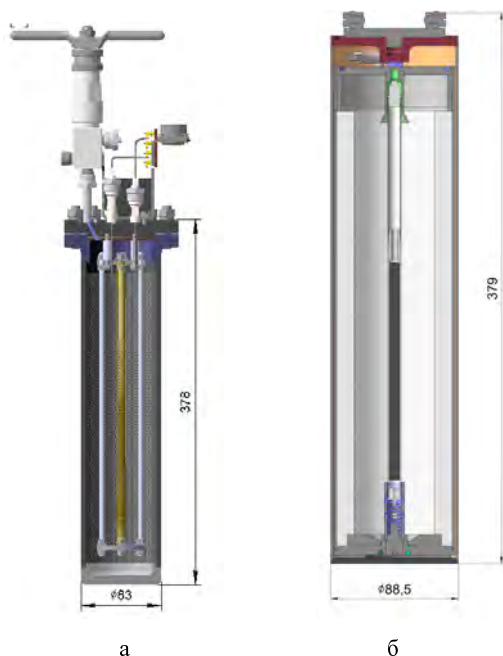


Рис. 2. Изображения облучательных ампул: а – с необлученным топливом, б – с облученным топливом

Ампулы, предназначенные для экспериментов с необлученным топливом, обеспечивают измерение температур оболочки твэлов и элементов ампулы и давления среды в ампуле.

Ампулы с испытуемыми твэлами устанавливаются в облучательную полость БОЗ. БОЗ размещается у боковой поверхности АЗ БИГР, рис. 1б.

Для экспериментов с твэлами, содержащими свежее топливо, установка твэла в ампулу и оснащение сборки термопарами выполняются в РФЯЦ-ВНИИЭФ.

В случае с испытаниями твэлов, содержащих отработавшее топливо, изготовление твэла и его установка в экспериментальную ампулу осуществляются в ГНЦ НИИАР. Это обусловлено невозможностью проведения указанных операций вне специально оборудованных радиационно-защитных камер из-за высокой активности содержащихся в топливе продуктов деления. Таким образом, в РФЯЦ-ВНИИЭФ поступает изделие, готовое к установке на облучательную позицию.

Высокотемпературные ампулы, применяемые в экспериментах на реакторе NSRR

Масштабный цикл испытаний твэлов в условиях, моделирующих условия реактивной аварии, был проведен за последние несколько десятилетий на реакторе NSRR (Япония) [4].

Реактор NSRR, рис.3, был специально построен для проведения внутрореакторных экспериментов по исследованию безопасности энергетических реакторов. Он является модифицированной версией аperiodического импульсного реактора ACPR – наиболее совершенного реактора семейства TRIGA.

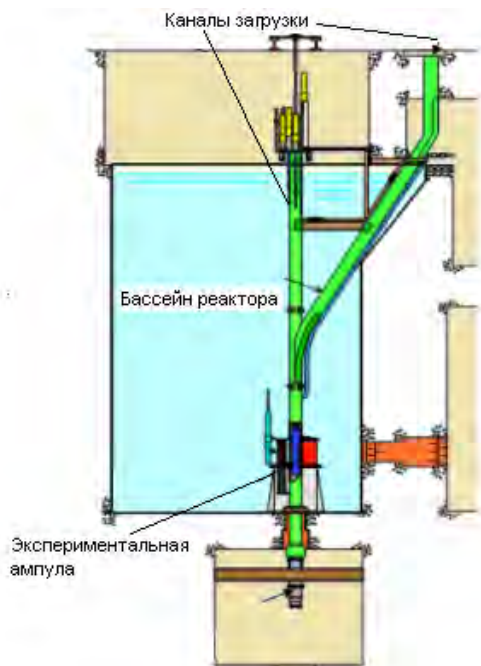


Рис. 3. Схема реактора NSRR

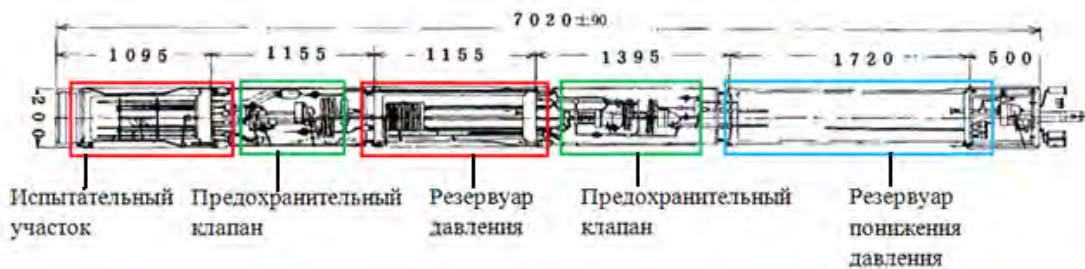


Рис. 4. Высокотемпературная ампула высокого давления для экспериментов с необлученными твэлами

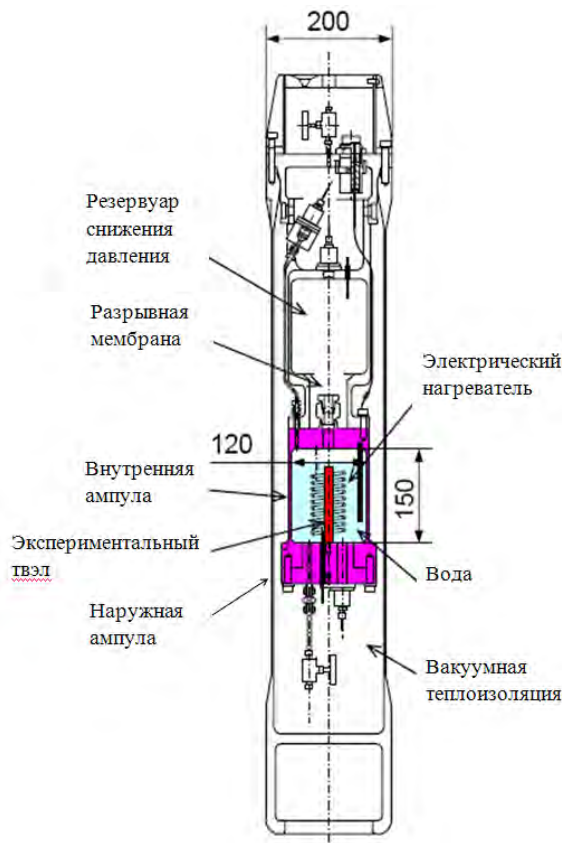


Рис. 5. Схема высокотемпературной ампулы для твэлов на облученным топливом

Кольцевая АЗ реактора NSRR размещается на дне открытого водяного бассейна глубиной 9 м. В центре АЗ находится гексагональная в плане полость диаметром 230 мм, в которую помещаются экспериментальные устройства.

Рассмотрим конструкцию и характеристики облучательных ампул, применяемых в экспериментах на NSRR. Рассматриваются два основных типа ампульных устройств:

1) ампула для экспериментов с необлученными твэлами;

2) ампула для экспериментов с облученными твэлами.

Схема ампулы для экспериментов с необлученными твэлами на NSRR показана на рис. 4 [5].

Давление теплоносителя в испытательном участке регулируется давлением пара в резервуаре давления, температура теплоносителя регулируется за счет мощности электрических нагревателей, расположенных в испытательной части. Таким образом, реализовано независимое от температуры изменение давления в ампуле.

На рис. 5 представлено изображение высокотемпературной ампулы для экспериментов с облученными твэлами [6].

В табл. 1 приведено сравнение ампул с необлученными и облученными твэлами по основным параметрам.

Из данных табл. 1 следует, что рассмотренные облучательные ампулы принципиально отличаются

Сравнение ампул для экспериментов с необлученным и облученным топливом

Параметр	Тип ампулы	
	для необлученных	для облученных
Количество корпусов	1	2 (имеется дополнительный страховочный корпус)
Тепловая изоляция	Слой теплоизолятора вокруг испытательного участка и резервуара давления	Вакуумирование межкорпусного пространства
Основные элементы	Испытательный участок Резервуар давления Камера снижения давления	Внутренняя ампула Камера снижения давления Наружный корпус
Регулирование температуры теплоносителя	Электрический нагреватель в испытательном участке /во внутренней ампуле	
Регулирование давления теплоносителя	Определяется величиной давления пара в резервуаре давления (электрический нагреватель в резервуаре давления)	Определяется температурой теплоносителя в замкнутом объеме внутренней ампулы (давление насыщения)
Достигаемые режимы по температуре и давлению	Возможны состояния с недогревом жидкости до T_s за счет независимого от температуры регулирования давления в испытательной секции	Только линия насыщения
Радиационная опасность	Только после облучения (наведенная активность)	Высокая на всех этапах обращения (долговечные продукты деления)
Инструментация твэла, сборка-разборка ампулы	Ручные операции	Дистанционно управляемые манипуляторы в защитных камерах
Инструментация ампулы	Термопары на оболочке твэла и в теплоносителе, датчики давления, датчики удлинения твэла и оболочки и др.	Термопары на оболочке твэла и в теплоносителе, датчики давления в паровой и жидкой средах

по целому ряду параметров и характеристик, обусловленных особенностями их эксплуатации и определяющих их конструктивный облик.

Имеются существенные отличия в устройстве ампул, реализации процесса формирования необходимых условий по температуре и давлению, организации теплоизоляции и др.

Высокотемпературная ампула для экспериментов на БИГР с твэлами, содержащими необлученное топливо

Рассмотрим вопросы, связанные с разработкой высокотемпературных облучательных ампул для экспериментов с твэлами на реакторе БИГР. При проведении анализа в качестве прототипа (по устройству и принципу работы) рассматриваются высокотемпературные ампулы, используемые в экспериментах на NSRR.

Компоновка элементов ампулы

В экспериментах на БИГР ампулы с твэлами при облучениях размещаются у боковой поверхности реактора в специальном облучательном устройстве – БОЗ (см. рис. 1б), установленном на транспортной тележке. Исходя из этого, узлы ампулы (испытательная секция, резервуар давления, резервуар снижения давления, соединительные трубопроводы и арматура) должны быть скомпонованы на тележке для образцов (в отличие от вертикальной компоновки NSRR): испытательная секция – в полости блока отражателя-замедлителя, остальные элементы – в пространстве

за БОЗ (или с использованием пространства под платформой телеги). На рис. 6 приведена схема, изображающая возможную компоновку элементов стенда на тележке для образцов.

Конструктивно ампула для экспериментов на БИГР будет содержать те же структурные элементы, но ввиду существенных отличий между экспериментальными установками (NSRR и БИГР) будет применяться иная компоновка элементов ампулы.

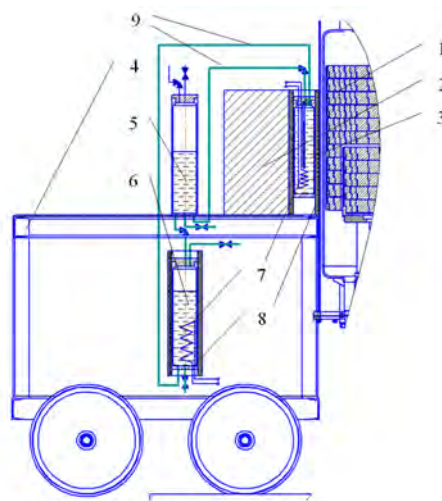


Рис. 6. Схема размещения элементов стенда для экспериментов с твэлами, содержащими необлученное топливо, на тележке для образцов: 1 – АЗ БИГР; 2 – БОЗ; 3 – облучательная ампула (испытательный участок); 4 – тележка для образцов; 5 – резервуар снижения давления; 6 – резервуар давления (нагнетатель); 7 – электрические нагреватели; 8 – теплоизоляция; 9 – трубопроводы

Параметры теплоносителя

В ампуле для испытаний на БИГР должны реализовываться следующие параметры: температура (280–300) °С, давление 16 МПа (параметры теплоносителя в АЗ реакторов ВВЭР).

Заданные условия могут быть реализованы только при использовании независимого от температуры регулирования величины давления в ампуле. Давление насыщения, равное 16,2 МПа, соответствует температуре воды ~348 °С. Температуре воды 300 °С соответствует давление насыщенного пара ~8,5 МПа.

В качестве одного из вариантов может быть рассмотрен отказ от применения независимого регулирования величины давления воды в облучательной ампуле. В этом случае необходимо проведение расчетного анализа для оценки представительности результатов испытаний при таких параметрах (влияние отклонения по величине давления на характеристики теплоотдачи).

В качестве одного из вариантов может быть рассмотрено регулирование давления в испытательной секции за счет управляемой подачи газа в свободный объем ампулы из источника подачи газа (баллона). В этом случае из конструкции ампулы исключается резервуар давления.

Замедлитель

Высокая температура в ампуле исключает возможность использования полиэтилена. При нагревании до температуры 300 °С плотность воды будет уменьшаться, таким образом, необходимо провести нейтронно-физические расчеты для определения оптимальной толщины замедлителя для достижения максимально возможных уровней энерговыделения в топливе.

Толщина стенок ампулы

В ампуле NSRR толщина стенки испытательной секции выбрана с существенным запасом (~13 мм). В случае NSRR при увеличении толщины стенок величина энерговода сохраняется на требуемом уровне, т. к. для экспериментов используются специальные твэлы с топливом, имеющим обогащение по урану-235 10 %. В максимальном импульсе NSRR для такого топлива достигается величина удельного энерговода ~1,9 кДж/г.

В экспериментах на БИГР используются твэлы, обогащение топлива в которых соответствует обогащению топлива в твэлах промышленных энергетических реакторов (< 5 %). В связи с этим выбор величины толщины стенки с существенным запасом не будет возможен.

Теплоизоляция

При выборе материала для теплоизоляции и ее размеров (толщина слоя) следует учитывать возмож-

ное влияние этого материала на процессы переноса нейтронов (дополнительное поглощение нейтронов).

Необходимо также рассмотреть вариант использования вакуумной изоляции. Преимуществом вакуумной теплоизоляции является ее большая эффективность (меньшая тепловая проводимость), но с технической точки зрения ее реализовать сложнее (применение дополнительного оборудования, требования к поддержанию уровня вакуума).

Нагреватель

В общем случае можно рассмотреть различные варианты размещения нагревателя:

1) нагреватель в структуре ампулы (нагрев ампулы изнутри);

2) нагреватель в структуре БОЗ вокруг облучательной полости (нагрев ампулы снаружи).

Экспериментальные твэлы, оснащение экспериментальных твэлов термомпарами

Для проведения экспериментов в высокотемпературной ампуле могут использоваться твэлы такой же конструкции, как и для экспериментов при комнатной температуре.

Твэлы могут оснащаться хромель-алюмелевыми и платина-платинородиевыми термомпарами. В качестве предпочтительного конструктивного исполнения и способа монтажа рассматриваются термомпары с термоэлектродами из тонких проволок с отдельной приваркой термоэлектродов на поверхность оболочки (сварка лазерная).

Операции по оснащению выполняются на имеющемся на комплексе БИГР оборудовании.

Вопросы обеспечения безопасности при проведении работ

Основным фактором опасности при проведении экспериментов с необлученными твэлами в высокотемпературной ампуле будут являться высокая температура и высокое давление среды (водяной пар, вода) в резервуаре давления и в испытательной секции (облучательной ампуле).

Конструкция элементов ампулы, работающих под давлением, должна исключать возможность нарушения их герметичности на всех этапах эксплуатации. Должна быть исключена (минимизирована) возможность воздействия любого типа со стороны объекта испытаний на реактор.

Это обеспечивается за счет следующих технических мероприятий:

- выбор параметров конструкции, обеспечивающих достаточную прочность элементов с учетом всех возможных процессов, которые могут протекать в ампуле вследствие импульсного энерговыделения в топливе твэла (в том числе, сопровождающихся плавлением топлива и разгерметизацией оболочки);
- применение предохранительных клапанов;

- применение защитных кожухов вокруг сосудов, работающих под давлением;
- взаимодействие испытательного стенда с системой управления и защиты реактора.

Стенд должен функционировать под управлением автоматизированной системы, обеспечивающей:

- оперативное представление и регистрацию показаний датчиков в экспериментах;
- управление подачей электропитания на нагреватели для достижения и поддержания заданной температуры;
- управление работой регулирующей арматуры;
- формирование аварийных сигналов для системы управления и защиты реактора.

Предварительные нейтронно-физические расчеты

Для выполнения заданных требований по параметрам теплоносителя потребуются внести изменения в конструкцию ампулы и другого экспериментального оборудования. Это повлияет на процессы переноса нейтронов, и, соответственно, на величину достижимого энерговыделения в топливе испытываемых твэлов.

На величину энерговывода в топливо твэлов в импульсных экспериментах на реакторе БИГР влияет расстояние от облучаемого объекта до АЗ БИГР, количество материалов, замедляющих и поглощающих нейтроны в ампуле, а также их температура.

Проведены предварительные нейтронно-физические расчеты для оценки изменения удельного количества делений в топливе при вариациях основных конструктивных параметров. Нейтронно-физические расчеты проводились по разработанной в РФЯЦ-ВНИИЭФ программе СМК, базирующейся на методике С-007 [7].

За основу, в качестве облучательной ампулы, в расчетах взята ампула для проведения импульсных экспериментов с необлученным топливом в воде под давлением, номинальная толщина стенки была принята равной 8.5 мм. В расчетах варьировались радиус воды в ампуле, толщина её стенок, материал замедлителя в ампуле. Расчеты проводились с заданием в материалах ампулы и твэла температуры $T = 573$ К и плотности воды $\rho = 0,72$ г/см³, соответствующие целевым условиям проведения экспериментов. Определялось максимальное удельное количество делений в топливе (в расчете на 1 деление в АЗ БИГР).

Оптимальная толщина воды по радиусу составляет ~60 мм (соответствует внешнему диаметру ампулы ~140 мм при диаметре существующей ампулы ~90 мм).

Также получены результаты, позволяющие сделать следующие выводы:

- использование гидрида циркония в качестве замены полиэтилена в высокотемпературной ампуле высокого давления не является эффективным (при-

водит к снижению удельного числа делений приблизительно на 30 %);

- сохранение внешнего радиуса высокотемпературной ампулы при увеличении толщины стенки и уменьшении плотности воды приводит к уменьшению удельного числа делений в топливе по сравнению с оптимальным вариантом на ~25 %;

- дальнейшее увеличение толщины стенки ампулы и введение слоя теплоизоляционного материала приводит к снижению удельного числа делений.

Для полученной геометрии, характеризующейся максимальным удельным числом делений в топливе твэла, выполнены оценки абсолютных значений удельного энерговыделения в топливе различного состава в расчете на импульс реактора БИГР с максимальным допустимым энерговыделением в АЗ. Оценка получена для необлученного топлива, топлива с выгоранием 40 и 72 МВт·сут./кг U, результаты приведены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, полученные значения максимального удельного энерговывода в топливо для высокотемпературной ампулы увеличенного диаметра ниже, чем в применяемой постановке.

Таким образом, в зависимости от выполнения требований по величине удельного энерговыделения может потребоваться дальнейшая разработка подходов по его увеличению (например, путем разработки модифицированного БОЗ).

Таблица 2

Расчетные значения максимального удельного энерговывода в топливо

Тип топлива (твэлов)	Удельное энерговыделение в топливе кДж/г (кал/г)	
	Ампулы в применяемой постановке	Высокотемпературная ампула увеличенного диаметра
Необлученное топливо	1,46 (350)	1,07 (255)
Топливо с выгоранием 40 МВт·сут./кг U	0,96 (230)	0,73 (175)
Топливо с выгоранием 72 МВт·сут./кг U	0,73 (175)	0,49 (116)

Подходы к разработке высокотемпературной ампулы для испытаний в реакторе БИГР экспериментальных твэлов, содержащих облученное топливо

Рассмотрение вопросов, связанных с разработкой высокотемпературной облучательной ампулы для экспериментов с облученными твэлами на реакторе БИГР, в объеме настоящего доклада ограничивается выделением ряда следующих существенных факторов, которые необходимо учитывать при формировании конструктивного облика ампулы и анализе безопасности.

Возможности АО «ГНЦ НИИАР» по выполнению операций в защитных камерах

Все операции, связанные с изготовлением твэлов с облученным топливом, установкой твэла в ампулу, оснащением ампулы датчиками и ее герметизацией, и обратные операции осуществляются в защитных камерах АО «ГНЦ НИИАР».

Отсюда следует вывод, что конструкция высокотемпературной ампулы с облученными твэлами будет в значительной степени зависеть от технологических возможностей АО «ГНЦ НИИАР» по выполнению операций в защитных камерах.

Усложнение технологии обращения с ампулой

Как уже упоминалось выше, ампула с твэлом, содержащим отработавшее топливо, является очень мощным источником ионизирующего излучения. В связи с этим даже в существующей технологии проведения испытаний обращение с ампулами производится по специально разработанной многоэтапной процедуре, необходимой для обеспечения радиационной безопасности.

Появление дополнительных конструктивных элементов ампулы и дополнительных технологических этапов (например, коммутации силовых и сигнальных кабельных линий) потребует модифицировать имеющуюся технологию обращения с изделиями.

Необходимость модификации ТУК

Перевозка ампул, содержащих твэлы с отработавшим топливом, между РФЯЦ-ВНИИЭФ и АО «ГНЦ НИИАР» осуществляется с применением специально разработанного транспортного упаковочного комплекса (ТУК).

Выполнение предъявляемых требований по параметрам теплоносителя и диагностическому оснащению облучательной ампулы, а также с точки зрения обеспечения безопасности приведет к появлению в конструкции дополнительных элементов и, соответственно, к изменению массогабаритных характеристик ампулы.

Изменение габаритных размеров ампулы повлечет за собой необходимость внесения изменений в конструкцию ТУК.

Невозможность использования технических решений, полученных на этапе разработки ампулы для экспериментов с необлученными твэлами

Решения, планируемые к реализации в ампуле для экспериментов с необлученным топливом, могут оказаться нереализуемыми в ампуле для экспериментов с облученным топливом в связи с существенными ограничениями, связанными с излучением выгоревшего топлива и по нейтронно-физическим соотношениям (обеспечение необходимых значений удельного энерговыделения в топливе).

Этим определяется выбор подхода к разработке ампул: разработка оборудования для проведения испытаний твэлов, содержащих облученное топливо, будет являться самостоятельной задачей. Возможным этапом решения этой задачи будет отработка отдельных технических решений с использованием экспериментальных твэлов с необлученным топливом, но следует отметить, что такие работы не будут являться полноценными испытаниями с обеспечением всех функциональных и диагностических возможностей экспериментального стенда.

Заключение

В результате проведенного анализа не выявлено принципиальных препятствий для разработки экспериментального стенда испытаний необлученных твэлов на реакторе БИГР, обеспечивающего независимое регулирование давления и температуры теплоносителя.

Тем не менее, следует отметить, что создание такого стенда является сложной и дорогостоящей задачей, и поэтому будет являться оправданным только в случае проведения в дальнейшем значительного объема экспериментальных исследований с его использованием.

Принципиальная возможность реализации испытаний твэлов, содержащих облученное топливо, в реакторе БИГР с использованием высокотемпературной ампулы в первую очередь будут зависеть от технологических возможностей АО «ГНЦ НИИАР» по выполнению операций в защитных камерах.

Литература

1. Бардыгин Д. Ю., Девяткин А. А., Тесаловский Н. А. и др. Исследование поведения теплоделяющих элементов в аварийных режимах на реакторе БИГР // Вопросы атомной науки и техники, сер. Физика ядерных реакторов, 2016. Вып. 4. С. 85–91.
2. Nechaeva O. et. al. «Pulse tests of refabricated VVER fuel rods in the BGR to justify safety under design basis RIA conditions», Proc. of 11th International conference «WWER Fuel Performance, Modeling and Experimental Support», 26.09 – 03.10.2015, Varna, Bulgaria, vol II, pp. 399–408.
3. Колесов В. Ф. Аperiodические импульсные реакторы: Монография в 2 т. Т. 1. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2007. С. 68–75.
4. Udagawa Yu., Sugiyama T. and Amaya M. Heat Transfer from Fuel Rod Surface Under Reactivity-initiated Accident Conditions. NSRR Experiments Under Varied Cooling Conditions. JAEA Report. JAEA-Data / Code 2013-021.
5. Kobayshi S., et. al.: NSRR High-Temperature High-Pressure Capsule. JAERI Report. JAERI-M 8767, 1980.
6. Suzuki T., Umeda M. Development of high temperature capsule for RIA-simulating experiment with

high burnup fuel. Transactions of 11-th International Topical Meeting RRFM and IGORR, Lyon, France, 11-15 March 2007, pp. 26–31.

7. Житник А. К., Донской Е. Н., Огнев С. П. и др. Методика С-007 решения методом Монте-Карло связанных линейных уравнений переноса нейтронов,

гамма-квантов, электронов и позитронов. Моделирование совместного переноса нейтронов и γ -квантов методом Монте-Карло // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2011. Вып. 1. С. 17–24.