

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕАКТОРОВ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ РЕАКТОРЕ БИГР В УСЛОВИЯХ, МОДЕЛИРУЮЩИХ РЕАКТИВНОСТНУЮ АВАРИЮ

INVESTIGATION OF POWER REACTOR FUEL ELEMENTS BEHAVIOR IN THE EXPERIMENTS ON RESEARCH REACTOR BIGR UNDER CONDITIONS SIMULATING REACTIVITY ACCIDENT

*Е. Ф. Киушкина, А. А. Девяткин, Д. Ю. Бардыгин, А. К. Лычагин, В. В. Сажнов,
Н. А. Тесаловский*

*Ye. F. Kiushkina, A. A. Devyatkin, D. Yu. Bardygin, A. K. Lychagin, V. V. Sazhnov,
N. A. Tesalovskiy*

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

Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Research Institute of Experimental Physics

Приведен обзор успешно завершенных работ на исследовательском реакторе БИГР, посвященных экспериментам со свежим и выгоревшим топливом ВВЭР-1000, усовершенствованных конструкций. Описан процесс определения достигнутой энтальпии топлива экспериментального твэлав импульсных экспериментах, моделирующих аварию RIA (ReactivityInitiatedAccident).

The review of successfully completed activities on research reactor BIGR dedicated to the experiments with fresh and degraded fuel VVEhR-1000 is presented. The process of determining the achieved enthalpy of experimental fuel element in pulsed experiments simulating RIA (Reactivity Initiated Accident) is described.

Для использования тепловыделяющих элементов (твэлов) на атомных электростанциях (АЭС) необходимо обосновать безопасность их применения. Согласно правилам ядерной безопасности реакторных установок атомных станций [1], а также требованиям безопасности, выдвигаемыми зарубежными потребителями при лицензировании топлива, должны быть экспериментально установлены предельные значения максимальной среднерадимальной энтальпии топлива твэлов в проектных авариях типа RIA (ReactivityInitiatedAccident), связанных с быстрым увеличением реактивности и, соответственно, кратковременным значительным ростом мощности удельного энерговыделения в топливе твэлов. Предельные значения максимальной среднерадимальной энтальпии определяются на основе результатов импульсных экспериментов, моделирующих аварию RIA с фрагментами полномасштабных твэлов (экспериментальными твэлами – ЭТ) с использованием расчетных методик. В расчетных методиках, калиброванных по результатам экспериментов, моделируется состояние твэлов в процессе экспери-

мента (деформации, распределение температур, процессы разрушения и др.).

Экспериментальная установка на основе реактора БИГР [2], эксплуатируемая в Институте ядерной и радиационной физики (ИЯРФ), в настоящее время является практически единственной в России подходящей для проведения опытов, моделирующих аварии RIA. Благодаря физическим свойствам уникального уран-графитового топлива установка позволяет генерировать импульсы делений в активной зоне с высокими значениями энерговыделения и получать рекордные значения интегрального потока нейтронов за импульс на облучательных позициях. В совокупности со специальным облучательным устройством установка позволяет реализовывать в топливе испытываемых твэлов импульсы энерговыделения короткой длительности и высокой мощности, приводящие к быстрому разогреву топлива и конструкционных материалов.

В течение последних нескольких лет на основании договоров между АО «ВНИИНМ» им. А. А. Бочвара и ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» и международного контракта ВНИИЭФ с Корей-

ским институтом атомной энергии (KAERI) выполнены уникальные исследования поведения твэлов современных конструкций в условиях, моделирующих проектную аварию RIA. Целью работ являлось определение порогового значения среднерадиальной энтальпии топлива, соответствующей разрушению твэлов современных конструкций с использованием экспериментальных и расчетных методов исследования, а также выяснение механизма разрушения твэлов. Под разрушением твэла, как правило, понимают нарушение целостности конструкции твэла, в результате которой твэл утрачивает геометрию, обеспечивающую его проектное охлаждение.

В экспериментах испытывались твэлы ВВЭР-1000 усовершенствованных конструкций. Испытания твэлов ВВЭР-1000 с рекордной глубиной выгорания (~ 72 МВт·сут./кгU) проводились впервые. Эксперименты RIA ствэлами, содержащими облученное интерметаллическое $Zr-U$ топливо (KAERI), проводились впервые в мире. До проведения экспериментов отсутствовала какая-либо информация, позволяющая спрогнозировать их результаты.

Обоснование безопасности использования твэлов ВВЭР-1000 современных конструкций, в том числе с высокой глубиной выгорания (~ 72 МВт·сут./кгU), позволит повысить экономическую эффективность отечественных энергоблоков и, как следствие, их конкурентоспособность на мировом рынке. Уже в текущем году планируется проведение очередной серии экспериментов с облученным топливом ВВЭР-1000.

Успешно заверченный международный контракт с Корейским институтом атомной энергии (KAERI) способствует повышению авторитета Государственной корпорации «Росатом» в мире, налаживанию деловых отношений между ВНИИЭФ и KAERI. В ближайшем будущем возможно продолжение работ по проведению экспериментов RIA.

Краткая ретроспектива заверченных работ:

– в середине 90-х годов специалистами ВНИИЭФ (В.А. Устиненко, И.Г. Смирновым, В.В. Сажновым и др.) проведены первые методические импульсные эксперименты с необлученными твэлами. В период с 1998 по 2000 гг. были проведены четыре серии экспериментов с рефабрированными твэлами (РТ) ВВЭР-440 – всего 12 экспериментов. Величина выгорания топлива РТ составляла $50 \div 60$ МВт·сут./кгU;

– в 2006 ÷ 2008 годах в рамках проекта МНТЦ #3119 были проведены эксперименты RIA с микротвэлами, представляющими собой сфери-

ческие топливные частицы с нанесенными на них слоями защитных покрытий;

– в 2010 ÷ 2013 годах проведены испытания ЭТ с необлученным топливом при использовании различных сред в ампуле (вода с давлением 1 атм и 160 атм, воздух при атмосферном давлении). Всего проведено 12 импульсных экспериментов;

– в рамках работ с KAERI с 2012 по 2014 годы проведено 14 импульсных экспериментов (8 с необлученными и 6 с облученными ЭТ);

– в 2013 году проведена 5-ая серия экспериментов с рефабрированными твэлами ВВЭР-1000 усовершенствованной конструкции (3 эксперимента), глубина выгорания топлива составляла ~ 40 МВт·сут./кгU;

– в 2014 году проведена 6-я серия экспериментов, в ходе которой было испытано три облученных ЭТ ВВЭР-1000 с выгоранием топлива ~ 72 МВт·сут./кгU.

Пост экспериментальные исследования состояния твэлов по всем работам проводились в ГНЦ «НИИАР» г. Димитровград. Роль НИИАР состояла в подготовке образцов «свежего» и «выгоревшего» топлива, проведении после реакторных исследований образцов топлива, включая исследования микроструктуры образцов топлива методами гамма-сканирования, сканирующей электронной микроскопии и электронно-зондового микроанализа. Выбор параметров расчетной термомеханической модели осуществлялся с учетом этих исследований.

Первым этапом экспериментов RIA являются калибровочные эксперименты. Их цель состоит в определении аксиального профиля энерговода в топливо ЭТ и получении соотношения между энерговыделением в активной зоне реактора БИГР и числом делений в необлученном топливе ЭТ, размещаемых в облучательных ампулах. Для получения указанного соотношения применяется метод нейтронно-активационного анализа.

Результаты калибровочных экспериментов и предтестовых расчетов (нейтронно-физических и термомеханических) используются для планирования параметров импульсных экспериментов со свежим и облученным топливом.

Вторым этапом являются импульсные эксперименты со свежим топливом. Их цель состоит в получении экспериментальной информации для калибровки параметров расчетных методик, изучения поведения ЭТ с необлученным топливом при импульсном облучении.

Третьим заключительным этапом является проведение экспериментов с облученным топливом. Конечной целью этого этапа является полу-

чение экспериментальной и расчетной информации, характеризующей стойкость твэлов с облученным топливом к условиям быстрого возрастания мощности реактора.

После проведения импульсных экспериментов образцы ЭТ со свежим и облученным топливом транспортируются в НИИАР для проведения постэкспериментальных исследований.

На рис. 1–2 показан общий вид экспериментальной установки, размещение блока отражателя-замедлителя (БОЗ) на основе бериллия и графита у боковой поверхности реактора, схема размещения ампулы в БОЗ и один из типов облучательных ампул для импульсных экспериментов с необлученным топливом.

Пространственно-временное распределение энерговыделения в топливе ЭТ для каждого импульсного эксперимента определяется на основе экспериментальных данных и результатов нейтронно-физических расчетов СМК [3].

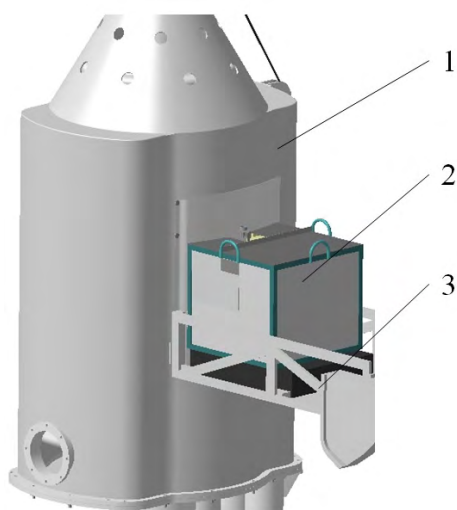


Рис. 1. Размещение БОЗ у боковой поверхности активной зоны реактора: 1 – активная зона реактора БИГР; 2 – БОЗ; 3 – транспортное устройство

Форма импульса мощности в топливе ЭТ (временная зависимость относительной скорости деления нуклидов) определяется на основе формы импульса мощности реактора БИГР с применением результатов специальных экспериментальных и расчетных исследований и является индивидуальной для каждого эксперимента. В дальнейшем форма импульса используется для определения пространственно-временного распределения энерговыделения в топливе ЭТ.

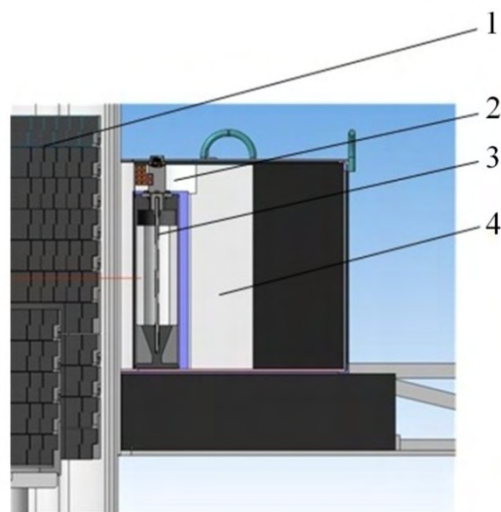


Рис. 2. Схема размещения ампулы в БОЗ: 1 – топливные кольца АЗ БИГР; 2 – ампула; 3 – ЭТ; 4 – БОЗ

Одной из основных целей экспериментов RIA является определение достигаемой в экспериментах среднерадимальной энтальпии топлива. Энтальпия топлива определяется на основании термомеханических расчетов, и не может быть получена экспериментально. Диаграмма, описывающая процесс определения максимальной энтальпии топлива ЭТ в экспериментах RIA, представлена на рис. 3. На данной диаграмме не отражен подготовительный этап исследований, связанный с выбором и разработкой экспериментальных устройств и методологией проведения экспериментов.

Термомеханические расчеты поведения ЭТ в экспериментах RIA, проведенных в рамках договоров с ВНИИНМ, выполнялись по 1D коду SAFR [4].

На выбор параметров расчетной модели решающее значение оказывали термометрические измерения температуры поверхности оболочки твэла. Применялись платино-платинородиевые и хромель-алюмелевые термометры, которые устанавливались на оболочку при помощи лазерной сварки. На рис. 4 показан пример сравнения экспериментальных и расчетных результатов температуры поверхности оболочки твэлов, и температур, полученных в расчетах по кодам ЛЭГАК-ДК и SAFR с использованием финальной расчетной термомеханической модели.

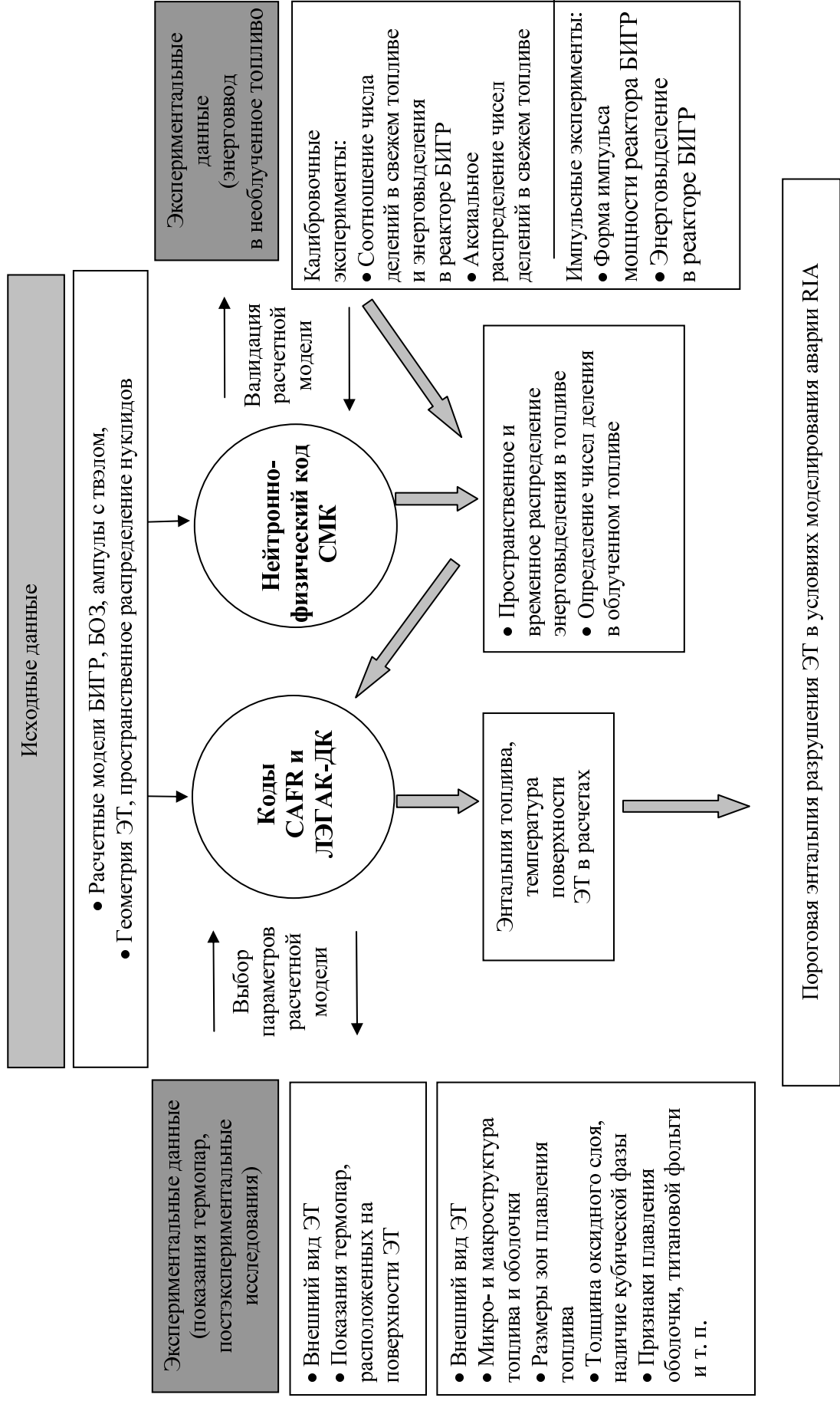


Рис. 3. Диаграмма, описывающая процесс определения достигнутой энталпии топлива ЭТ (экспериментального твэла) в экспериментах RIA

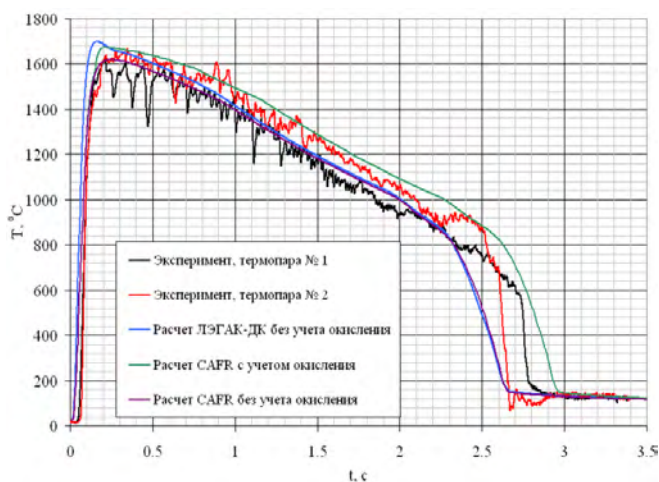


Рис. 4. Сравнение экспериментальных и расчетных зависимостей температуры оболочки ТВЭЛ от времени

На рис. 5 (а, б и в) представлены фотографии внешнего вида образцов ТВЭЛ ВВЭР-1000 после экспериментов на БИГР.



а) ТВЭЛ, сохранивший целостность



б) ТВЭЛ с разрывом оболочки



в) ТВЭЛ с разрывом оболочки

Рис. 5. Фотографии образцов ВВЭР-1000 ТВЭЛ после облучения на БИГР

В результате работ, проведенных по договору с ВНИИНМ, определено значение порога разрушения экспериментальных ТВЭЛ с выгоранием топлива ~ 72 МВт·сут./кг U.

В плане развития методики проведен анализ возможности проведения экспериментов RIA на реакторе БИГР в «горячей» ампуле, т. е. с параметрами теплоносителя, соответствующими рабочим условиям реактора ВВЭР: $P = 16,2$ МПа, $T = 280\text{--}300$ °C.

В результате проведенного анализа не выявлено принципиальных ограничений для разработ-

ки экспериментального стенда для RIA-испытаний необлученных ТВЭЛ, обеспечивающего независимое регулирование давления и температуры теплоносителя. Сформулированы предложения по этапам работы. При анализе учитывался мировой опыт проведения подобных экспериментов (на японском исследовательском реакторе NSRR).

Успешно завершить весь объем работ и получить отличные результаты стало возможно благодаря слаженной работе сотрудников экспериментальных, теоретических и математических подразделений ВНИИЭФ, а также плодотворному сотрудничеству со специалистами других институтов (ГНЦ НИИАР, АО ВНИИНМ и KAERI).

Список литературы

1. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций. НП-082-07. Введены в действие с 01.07.2008.
2. Колесов В. Ф. Аperiodические импульсные реакторы. Т. 1, 2. Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2006.
3. 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 // ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2011. Вып. 1. С. 17–24.
4. Иванова Г. Г., Софронов В. Н., Устиненко В. А. Методика расчета поведения топливных элементов ядерных реакторов // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 1997. Вып. 2, С. 34–39.
5. Спирионов В. Ф., Рябов А. А., Циберев К. В. и др. Основные принципы реализации пакета программ ЛЭГАК-ДК для расчета задач прочности и газодинамики на неструктурированных сетках // Сб. докл. 8-й научно-технической конференции «Молодежь в науке» / Секц. «Теоретическая и математическая физика», Саров, 2009, С. 153–160.
6. Циберев К. В., Артамонов М. В., Авдеев П. А. и др. Параллельный пакет программ ЛЭГАК-ДК для расчета задач гидрогазодинамики и прочности на неструктурированных сетках в лагранжево-эйлеровых переменных // Труды XI международного семинара «Супервычисления и математическое моделирование» - Саров, 2009.
7. Дьянов Д. Ю., Борляев В. В., Корсакова Е. И. и др. Пакет программ ЛЭГАК-ДК. Методы расчета газодинамических и упругопластических течений в лагранжевых переменных на неструктурированной сетке // Труды X Забабахинских научных чтений – Снежинск, 2010.