

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СНУП ТОПЛИВА

Лемехов В.В., Черепнин Ю.С., Моисеев А.В., Пулинец А.А.,
Жирнов А.П., Иванюта А.Н., Рождественский И.М., Бурков И.В.,
Межина Е.Р. (АО «НИКИЭТ», Москва, Россия)

Введение

В рамках работ по обоснованию безопасности применения смешанного нитридного уран-плутониевого (СНУП) топлива [1] на реакторных установках четвертого поколения на быстрых нейтронах типа БРЕСТ [2] возникает необходимость проведения его испытаний в условиях быстрого ввода реактивности. Для определения предельных энергетических характеристик, а, именно, предельной среднерадиальной энтальпии (ПСЭ) СНУП топлива, подготовлена и проведена серия экспериментов на реакторе ИГР совместно со специалистами Республики Казахстан.

1. Постановка задачи

В соответствии с федеральными нормами и правилами НП-082 [3] необходимо подтвердить, что при проектных авариях, связанных с быстрым вводом реактивности, усредненная по поперечному сечению топливной таблетки предельная среднерадиальная энтальпия топлива не превышает значения, установленного в проекте, которая является количественной характеристикой состояния ТВЭЛ на границе разрушения.

Для выполнения этих задач оптимально подходит импульсный графитовый реактор НЯЦ РК [4]. Это гомогенный уран-графитовый импульсный реактор теплоемкостного типа с графитовым отражателем. В кладке реактора имеется центральный экспериментальный канал диаметром 228 мм, позволяющий разместить достаточно крупное экспериментальное устройство. Вспышки и импульсы данного реактора дают возможность вводить положительную реактивность в несколько $\beta_{эфф}$, ограниченные только энерговыделением за пуск реактора в 5200 МДж и максимальной температурой графитовой кладки (~ 1100 °С).

2. Объект исследования

Для проведения экспериментов разработаны и изготовлены макеты ТВЭЛов со СНУП топливом, поперечное сечение которых идентично ТВЭЛу периферийной подзоны активной зоны РУ БРЕСТ-ОД-300, а длины макетов (длина габаритная, длина топливного столба, длины газосборников) уменьшены в 10 раз. Массовая доля плутония в СНУП топливе составляла – $(9,5 \pm 0,3)$ %. Внутренний объем ТВЭЛ заполнен гелием.

Макеты ТВЭЛов выполнены в двух исполнениях: штатный ТВЭЛ и инструментированный ТВЭЛ. Инструментированные ТВЭЛы оснащены датчиками давления (ДД) и термоэлектрическими преобразователями (ТЭП) для измерения температуры: два на оболочке ТВЭЛ и один в центре топливного столба (рис. 1).

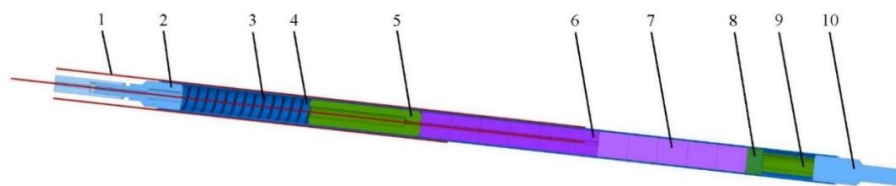


Рис. 1. Инструментированный твэл:

1 – ТЭП; 2 – верхний концевик; 3 – пружина; 4 – оболочка; 5 – втулка;
6 – таблетка топливная с отверстием; 7 – таблетка топливная; 8 – никелевая пробка;
9 – поддержка; 10 – нижний концевик

Макеты твэлов размещены в облучательных устройствах (ОУ). В каждом ОУ расположена ампула с тремя макетами твэлов: один штатный и два инструментированных (рис. 2). Ампула предназначена для создания необходимых теплофизических условий и выполняет функции первого барьера безопасности – для удержания топлива и продуктов деления в случае проведения пусков с ожидаемой разгерметизацией макетов твэлов.

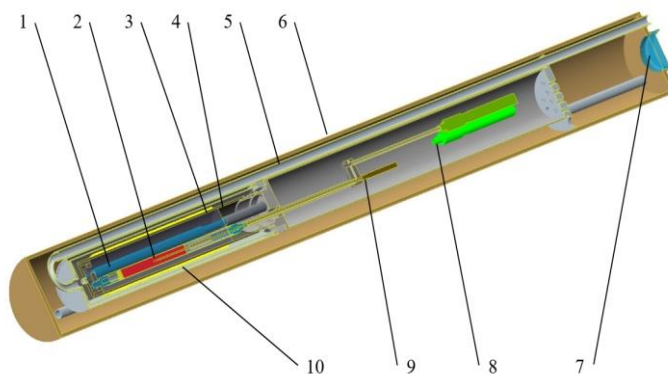


Рис. 2. Облучательное устройство:

1 – твэл штатный; 2 – твэл инструментированный; 3 – уровень свинца; 4 – ампула; 5 – трубка внутрикорпусная; 6 – корпус ОУ; 7 – электроразъем; 8 – датчик давления;
9 – термозонд; 10 – нагреватель

Внутренний объем ампулы заполнен свинцом, свободный объем ампулы – аргоном. На внешней поверхности ампулы монтирован двухсекционный нагреватель, предназначенный для предварительного разогрева ампулы и поддержания температуры твэлов и свинца в ампуле выше температуры плавления свинца. Конструкционный материал деталей ампулы, находящихся в контакте со свинцом, идентичен материалу штатной оболочки твэла – сталь ЭП823Ш; остальных деталей – сталь 12Х18Н10Т.

Для исключения возможности перегрева ампул во время длительных пусков, в ОУ предусмотрено их охлаждение с внешней стороны газообразным азотом, подаваемым в ОУ от стендовой системы реактора. Измерение температуры оболочек твэлов и свинца осуществляют хромель-алюмелевыми ТЭП, измерение температуры топлива – вольфрам-рениевыми ТЭП. Контроль давления осуществлен датчиками давления в инструментированных твэлах и в ампуле. По показаниям датчиков давлений осуществлялся оперативный контроль герметичности макетов твэлов и ампул.

3. Результаты испытаний по определению ПСЭ

Цель пусков по определению ПСЭ – определение двух максимально близких значений среднерадиальной энтальпии СНУП топлива, соответствующих разрушению твэла и сохранению целостности и работоспособности твэла.

При разработке твэла РУ БРЕСТ-ОД-300 принято, что необлученный твэл находится в ненагруженном состоянии – зазор между топливом и оболочкой сохраняется на всех режимах, давление газообразных продуктов деления отсутствует. И так как других разрушающих факторов нет, начало плавления топлива рассматривалось в качестве вероятной причины отказа твэла. Поэтому в качестве энтальпии I , соответствующей температуре плавления СНУП топлива – 2800 °С, расчетным путем обосновано значение 252 кал/г.

В рамках программы испытаний по определению ПСЭ СНУП топлива проведено три пуска в режиме работы реактора «вспышка» на разных уровнях мощности. Энерговыведение в топливе макетов твэлов в первом пуске реализовано на уровне 60–70 % от I . По результатам первого пуска признаков разгерметизации твэлов и нарушения барьеров ОУ не обнаружено. Энерговыведение в топливе макетов твэлов во втором пуске реализовано на уровне 100 % от I . В этом пуске ДД инструментированных твэлов показали резкое падение давления, что было классифицировано как разгерметизация твэлов. Энерговыведение в топливе макетов твэлов в третьем пуске реализовано на промежуточном уровне 80–90 % от I . По результатам третьего пуска один ДД из двух показал резкое падение давления (разгерметизация твэла).

Основные результаты проведенных пусков по определению ПСЭ представлены в таблице.

Результаты проведенных пусков по определению ПСЭ

Параметр	Номер пуска		
	1	2	3
Введенная реактивность ($\beta_{эфф}$)	1,9	2,62	2,33
Интегральное энерговыведение в реакторе, МДж	315	389	394
Полуширина вспышки, с	0,6	0,3	0,4
Максимальная температура по показаниям ТЭП, °С:			
топлива	1598	>2400	2281
оболочки	855	1625	1035
Разгерметизация твэлов	Нет	Есть	Есть
Расчетная среднерадиальная энтальпия в сечении с максимальным энерговыведением, кал/г	167	283	239

Как результат, значение энтальпии в первом пуске – 167 кал/г топлива, в котором все твэлы сохранили герметичность, рекомендовано для использования в проекте РУ БРЕСТ-ОД-300 в качестве ПСЭ.

В рамках послереакторных исследований (ПРИ) АО «ГНЦ НИИАР» выполнен неразрушающий и разрушающий контроль состояния ОУ и макетов твэлов, включающий рентгенографию, гамма-сканирование, профилометрию, прокол оболочки, металлографию, сканирующую электронную микроскопию, а также определение плотности топлива и механических свойств оболочки.

Визуальная инспекция и рентгенографический контроль выявили искривление всех макетов твэлов, разгерметизацию 5 из 9 макетов с повреждением оболочек, плавлением и наличием свинца во внутренней полости (рис. 3). В пуске № 1 нет внешних признаков нарушения целостности макетов твэлов. Макеты имеют состояние идентичное исходному. В пуске № 2 произошло плавление всех макетов твэлов, дефекты оболочки расположены по образующим на верхней половине топливного столба. На твэлах, испытанных в пуске № 3, появляются первые точечные дефекты оболочки в районе верхней торцевой таблетки.

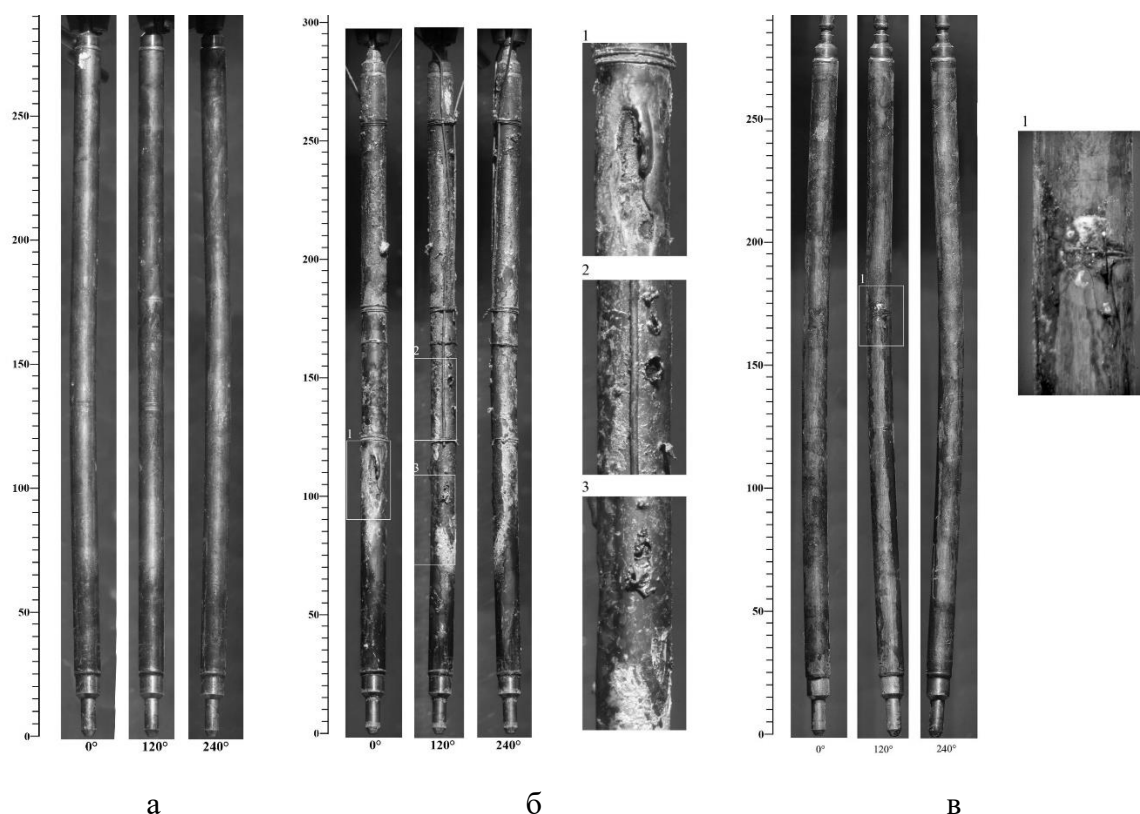


Рис. 3. Внешний вид инструментированных макетов твэлов:
а – пуск № 1; б – пуск № 2; в – пуск № 3

Результаты измерения количества и состава газа под оболочкой штатного макета твэла после пуска №1 методом лазерного прокола подтвердили его герметичность. В газовом объеме обнаружен исходный газ заполнения без примесей.

В оболочках герметичных макетов твэлов каких-либо особенностей не выявлено. В негерметичных макетах плавление оболочки сопровождается стеканием расплава по наружной поверхности и затеканием под оболочку. В материале расплавленной оболочки после остывания образуются трещины и поры преимущественно с внутренней поверхности. Прочностные характеристики оболочек макетов твэлов практически не отличаются от их исходных значений.

Исследование макроструктуры в продольных и поперечных сечениях макетов твэлов показало, что в процессе испытания произошла фрагментация топливных таблеток, преимущественно диаметрными трещинами в поперечных сечениях и поперечными и осевыми в продольных сечениях. Зазор между топливом и оболочкой сохранился.

В макетах твэлов после пуска №1 плавления оболочки, и каких-либо ее дефектов ни в одном сечении не обнаружено. В пуске №2 наблюдается частичное заполнение зазора между топливом и оболочкой свинцом, а также проникновение материала расплавленной оболочки в трещины и поры в центральной части топливной таблетки (более светлый оттенок топлива) (рис. 4). В пуске №3 заполнение зазора между топливом и оболочкой свинцом и материалом расплавленной оболочки наблюдается не только в сечениях по месту расположения дефекта (плавления оболочки), но и на участках макетов твэлов, расположенных ниже дефекта.

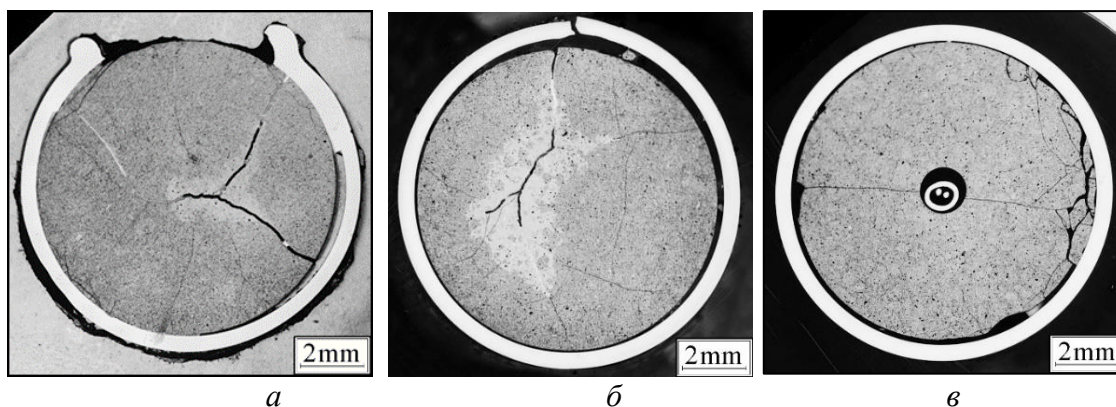


Рис. 4. Поперечные сечения твэлов после пусков по поиску ПСЭ:
а – пуск № 2, б – пуск № 3, в – пуск № 1

Результаты ПРИ показали, что причина разрушения твэлов – плавление оболочки вследствие касания топливных таблеток и оболочки.

По результатам ПРИ проведены расчеты по модели, учитывающей возможное касание таблетки и оболочки, которые подтвердили, что оболочка твэла быстрее достигает температуру плавления, чем топливо.

Заключение

Экспериментально подтверждена работоспособность твэлов со СНУП топливом при авариях РУ БРЕСТ-ОД-300, связанных с быстрым увеличением реактивности. На основе экспериментальных данных получена усредненная по поперечному сечению топливной таблетки (среднерадиальная) энтальпия топлива.

Значение ПСЭ свежего СНУП топлива, при котором твэлы сохраняют целостность и работоспособность –167 кал/г. Данное значение ПСЭ практически вдвое превышает расчетное значение энтальпии для всех проектных и запроектных аварий РУ БРЕСТ-ОД-300, связанных с БВР, включая ввод полного запаса реактивности, что свидетельствует о хорошем запасе надежности предлагаемой конструкции твэла.

Получен большой массив экспериментальных данных для валидации расчетных кодов и моделей поведения твэла и свинцового теплоносителя в условиях быстрого ввода реактивности.

Разработанная конструкция ОУ, комплексная методика подготовки, проведения и анализа результатов экспериментов показала высокую эффективность и может быть использована для проведения испытаний других типов ядерного топлива, исследования выгоревшего СНУП топлива, а также для уточнения полученного значения ПСЭ свежего СНУП топлива.

Список литературы

1. А.Ф. Грачев и др. Исследования смешанного нитридного уран-плутониевого топлива в рамках проекта "ПРОРЫВ". Атомная энергия, Т. 122, Вып. 3, 2017.
2. Е.О. Адамов и др. Быстрый реактор со свинцовым теплоносителем Брест: от концепции к реализации технологии. Атомная энергия, Т. 129, Вып. 4, 2020.
3. НП-082-07. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций.
4. Batyrbekov Erlan, Vityuk Vladimir, Vurim Alexander and Vityuk Galina, Experimental Opportunities and Main Results of the Impulse Graphite Reactor Use for Research in Safety Area. Annals of Nuclear Energy, Volume 182, March 2023, 109582.