

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2021-3-29-36>

УДК 621.039.51

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОТРАБОТКЕ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА ПРИМЕСНЫХ ГАЗОВ В ЯДЕРНОМ ТОПЛИВЕ

¹⁾ Витюк Г.А., ²⁾ Витюк В.А., ¹⁾ Вурим А.Д., ¹⁾ Келсингазина Р.Е., ¹⁾ Бекмагамбетова Б.Е.

¹⁾ Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

²⁾ РГП «Национальный ядерный центр Республики Казахстан», Курчатов, Казахстан

E-mail для контактов: shmeleova@nnc.kz

Статья посвящена оценке количества примесных газов в ядерном топливе в аспекте разрушающего вклада выброса газов на общее давление внутри ампульного устройства при моделировании тяжелой аварии с плавлением активной зоны. В работе представлена методика расчета, основанная на измерении давления и температуры газа в замкнутом объеме твэла во время плавления топлива. Корректность разработанной методики подтверждена результатами проведенных экспериментов по плавлению топлива на импульсном графитовом реакторе ИГР при реализации регулируемого нейтронного импульса.

Ключевые слова: импульсный графитовый реактор ИГР, внутриреакторный эксперимент, экспериментальная апробация, тяжелая авария, давление, примесные газы, плавление топлива.

ВВЕДЕНИЕ

С 1983 года в реакторе ИГР проводятся исследования модельных твэлов и ТВС энергетических реакторов в аварийных и переходных режимах. Условиям исследований отдельных явлений и процессов сопровождающих разрушение тепловыделяющих элементов, в наибольшей мере отвечают ампульные испытания ввиду их исходной параметричности, т.е. возможности исследования влияния на термомеханическое поведение твэлов отдельных факторов или группы факторов в широком диапазоне испытаний. Отдельные режимы ампульных испытаний достаточно реалистично моделируют аварийные условия работы ядерных энергетических установок и, следовательно, позволяют получить интегральное представление о масштабах событий и явлений в активной зоне реактора.

При формировании методического подхода к испытаниям и разработке экспериментальных устройств значительное внимание уделяется вопросам безопасности.

Ампульные испытания характеризуются критическим уровнем нагрузок на тепловыделяющие элементы, приводящие к разгерметизации оболочек твэлов или к полному разрушению вплоть до плавления и испарения топлива. В случае реализации предельных по величине нагрузок ампульное устройство призвано полностью локализовать выделившиеся продукты деления и фрагменты элементов конструкции разрушенного твэла.

Таким образом, оценка безопасности проведения ампульных испытаний заключается в оценке устойчивости ампульного устройства к воздействию разрушающих факторов. К числу разрушающих факторов, воздействие которых на ампульное устройство оценивается при подготовке ампульных испытаний, относятся:

- механические нагрузки на стенки ампульного устройства, вызванные повышением давления при

разогреве теплоносителя, заполняющего ампулы;

- механические нагрузки на стенки ампульного устройства, вызванные ударными воздействиями, формирующимися при обширном взаимодействии расплава материалов конструкции твэлов с теплоносителем;

- механические нагрузки на стенки ампульного устройства, вызванные выбросом газов, которыми заполнен модельный твэл.

Последний фактор зачастую не учитывался при проводимых испытаниях на ИГР, т.к., во-первых, анализ указанных механических нагрузок на основе ряда консервативных допущений позволяет определять максимально возможные статические давления и, как следствие, заведомо увеличивать толщину ампульного устройства в целях безопасности. Во-вторых, ампульные устройства с облученным топливом, эксперименты с которыми проводились на ИГР, размещали в себе не более двух твэлов, следовательно, вклад в общее давление, вызванный выбросом газов, заполняющих твэл, был минимален в сравнении с остальными механическими нагрузками.

Однако, в связи с тем, что на реакторе ИГР проводится все больше испытаний с большим количеством модельных твэлов, содержащих порядка 8 кг топлива (такое количество размещается в ограниченном ампульном пространстве, а размеры ампульного устройства ограничены конструкцией центрального экспериментального канала – ЦЭК), и с тем, что толщина стенок ампульного устройства влияет на количество «полезных» нейтронов для проведения эксперимента (стальная ампула способна поглощать большое количество нейтронов, а работа реактора ИГР ограничена температурным эффектом реактивности), появляется необходимость точного определения всех возможных разрушающих факторов, которые могут воздействовать на ампульное устройство, с целью точного определения необходимой толщины его стенок. Тем более, что количество газов, содер-

жащихся под оболочкой ТВЭлов у облученного топлива, достаточно велико, и может внести существенный вклад в общее давление в ампульном устройстве при проведении экспериментов с разрушением ТВЭлов.

Таким образом, необходимо было разработать и экспериментально апробировать методику точного определения количества газов, находящихся под оболочкой ТВЭлов, подготовленных для проведения экспериментов на ИГР.

1 ОБЗОР МЕТОДИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ И СОСТАВА ГАЗА ПОД ОБОЛОЧКОЙ ТВЭЛА

Существует методика «Исследование выхода газообразных продуктов деления под оболочку опытных ТВЭлов с компактной двуокисью урана» описанная авторами [1]. Методика основана на непрерывном измерении давления в ТВЭлах в процессе их облучения в исследовательском реакторе СМ-2. После облучения проводится обработка полученных результатов, определение параметров облучения и газовыделения. Облучение ТВЭлов проводится в петле исследовательского реактора, заполненной водой. Модельный ТВЭл напрямую соединяется с измерителями давления. До подсоединения к модельному ТВЭлу измерителей давления, в нем измеряется свободный объем и проводится измерение свободного объема и калибровка измерителей.

Количество газа определяется для системы «ТВЭл-измерители давления» по средней температуре в ТВЭле. Данная температура определяется в следствие теплогидравлического расчета с учетом изменения плотности нейтронного потока по радиусу топливной таблетки. Однако, общая погрешность определения количества газа, вышедшего из ТВЭла в процессе его облучения, является функцией многих переменных. Авторы [1] утверждают, что она не превышает 10%.

Данный способ является достаточно точным, однако предлагаемая конструкция и выдвигаемые требования к герметичности модельного ТВЭла с подсоединенными к нему измерителями давления довольно сложны. К тому же данная методика не учитывает то количество газов, которое может быть заключено в порах топливных таблеток, появившихся там в процессе его облучения.

Существует методика «Измерение объема и давления газа в ТВЭле и свободного объема на установке лазерного прокола в защитной камере К-5», разработанная и аттестованная АО «ГНЦ НИИАР» [2]. Данная методика основана на масс-спектрометрическом методе определения количественного и качественного состава газа под оболочками облученных и необлученных ТВЭлов, а также измерения давления и свободного объема под оболочкой. Масс-спектрометрический метод определения состава, выделившегося во время облучения газа, сформирован на эффекте деления ионов в поперечном магнитном поле. В свою очередь ионизация частиц рассматриваемого газа реализуется путем бомбардировки их электрона-

ми. На установке с ТВЭлом в специально защитной камере происходит прокол ТВЭла лучом лазера. Из отверстия в прожженной оболочке газ, содержащийся в ТВЭле, выходит в герметичную систему газосбора и измерения. Авторы утверждают, что «доверительные границы погрешности определения объема газа составляют $\pm (2,7-6,8) \text{ см}^3$ при его объеме в ТВЭле $29-1150 \text{ см}^3$ » [2].

Данный способ является достаточно точным в качестве определения состава газа, выходящего из ТВЭла в процессе его облучения. Но, как и в предыдущей методике, не учитывает то количество газов, которое может быть заключено в порах топливных таблеток.

Существует методика «Определение параметров ТВЭлов реактора БН-600 неразрушающими методами» предлагаемая авторами [3]. Методика основана на гамма-спектрометрических измерениях активности и дислокации газообразных продуктов деления в ТВЭле без нарушения герметичности оболочки. Исследования проводятся в защитных камерах, а для регистрации гамма-излучения используется полупроводниковый детектор. В каждом ТВЭле измеряется распределение радионуклидов как по высоте ТВЭла, так и в газосборниках. Относительная погрешность измерений при определении активности изотопов составляет 3–6 %, а абсолютная величина погрешности около 10 %.

Данный способ применялся непосредственно в защитных камерах при реакторе БН-350 и направлен, в основном, на выявление дефектов в ТВЭле и его активности. Данный способ дает информацию о наличии в газосборниках продуктов деления и определяет их качественный состав, но не дает информацию о количестве газов под оболочкой и давлении.

Большинство экспериментов с модельными ТВС, которые выполняются на реакторе ИГР, предполагают плавление ядерного топлива с целью имитации тяжелой аварии в ТВЭлах и ТВС энергетических реакторов. Соответственно, при плавлении топлива кроме тех газов, которые находятся под оболочкой ТВЭлов, высвобождаются и те, которые находятся в порах топливных таблеток. В необлученном топливе присутствие примесных газов в порах ядерного топлива обусловлено особенностями его производства с использованием технологии холодного прессования и спекания таблеток из порошка диоксида урана, а в облученных – продуктами деления при облучении ядерного топлива.

Все представленные выше методики, а также методика измерения содержания примесных газов при изготовлении топлива, условий расплавления топлива не предполагают и, как следствие, не учитывают полное количество газа под оболочкой и в топливных таблетках. В данной статье рассматриваются результаты экспериментальной отработки методики определения количества примесных газов для прогнозирования параметров испытаний с плавлением модельных ТВС, основанной на применении уравнения

Клапейрона-Менделеева, устанавливающего связь между объемом, давлением и абсолютной температурой идеального газа, находящегося в замкнутой герметичной капсуле [4].

2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

2.1 Реактор ИГР

Технические характеристики импульсного графитового реактора (ИГР) (рисунок 1) обеспечивают возможность моделирования тяжелых аварий в широком диапазоне основных определяющих величин, таких как флюенс тепловых нейтронов (до $3,7 \cdot 10^{16}$ н/см²) и максимальная плотность потока тепловых нейтронов (до $7 \cdot 10^{16}$ н/(см²·с)) [5].

Экспериментальные исследования и испытания, которые проводятся на реакторе ИГР, практически всегда связаны с получением экспериментальной информации о быстропротекающих физических и тепловых процессах в ядерных реакторах, о работоспособности объектов испытаний в нормальных и аварийных условиях эксплуатации, о поведении топлива и конструкционных материалов для обоснования безопасности систем и элементов ядерных энергетических установок [6].

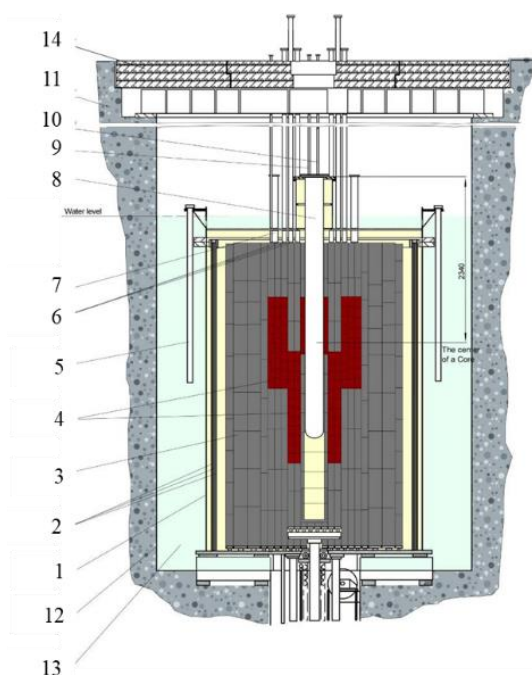
Основными режимами работы реактора являются нерегулируемый импульсный режим – режим самогасящейся нейтронной вспышки и регулируемый режим. Для осуществления режима самогасящейся

вспышки реактору сообщается реактивность, превышающая долю запаздывающих нейтронов, величина которой определяет форму, амплитуду и полуширину вспышки; гашение вспышки происходит вследствие отрицательного температурного эффекта реактивности. Регулируемый режим осуществляется перемещением стержней регулирования, компенсирующих отрицательный температурный эффект реактивности по заданному закону. При любом режиме работы нейтронный поток в ИГР может на порядки превышать потоки в энергетических реакторах, что обеспечивает возможность проведения динамических испытаний элементов их конструкций в экспериментах.

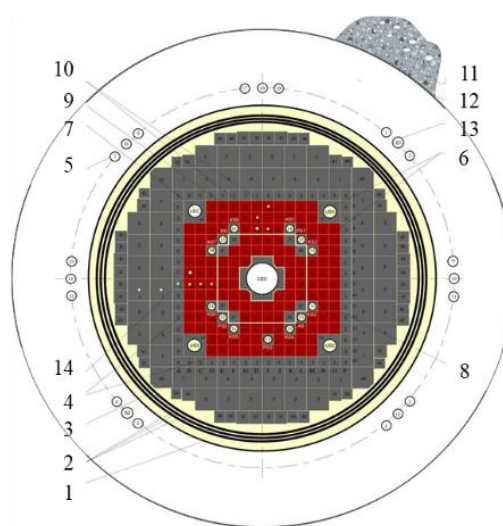
2.2 Экспериментальная ампула

Экспериментальная ампула (рисунок 2), представляет собой герметичный сосуд высотой 2930 мм, изготовленный из нержавеющей стали, в который установлена танталовая вставка. Топливные таблетки из диоксида урана обогащением 4,4% по U-235 типа ВВЭР-1000 размещались внутри танталовой вставки. Для предварительного разогрева топлива на наружной поверхности капсулы располагался нагреватель омического типа.

Ампула с топливом устанавливалась в ЦЭК реактора ИГР так, чтобы обеспечить совпадение центра топливного столба с центром активной зоны реактора ИГР.



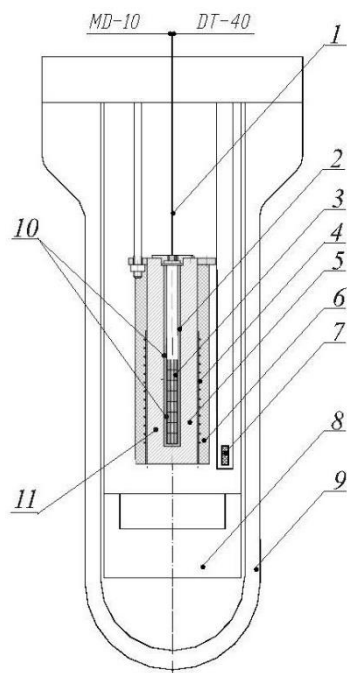
Вертикальный разрез



Горизонтальное сечение

- 1 – кожух; 2 – экран боковой; 3 – отражатель; 4 – активная зона; 5 – канал ионизационной камеры;
6 – канал стержня регулирования; 7 – боковой экспериментальный канал; 8 – центральный экспериментальный канал;
9 – канал физических изменений; 10 – канал термоэлектрического преобразования; 11 – биологическая защита;
12 – бак; 13 – полость охлаждающей воды; 14 – перекрытие верхнее

Рисунок 1. Реактор ИГР



1 – соединительная трубка (импульсная линия); 2 – танталовая вставка; 3 – топливные таблетки; 4 – электрический нагреватель; 5 – стальная капсула; 6 – теплоизоляция; 7 – монитор энерговыделения; 8 – ловушка аварийная; 9 – ампула экспериментального устройства; 10, 11 – точки контроля температуры

Рисунок 2. Схема экспериментального устройства

Сначала осуществлялся предварительный разогрев топлива и стенок капсулы. В процессе разогрева капсулы с топливом осуществлялась сушка топлива. Для этой цели производился нагрев топлива до температуры 673 К с одновременным вакуумированием внутренней полости капсулы. Нагрев топлива и капсулы осуществлялся при мощности нагревателя ~1 кВт. Управление процессом разогрева осуществляется по измеренным значениям температуры стен-

ки капсулы на границе с танталом. После достижения температуры 673 К мощность нагревателя снижалась до 10÷20 Вт и на этой мощности разогрев продолжался до начала реакторного пуска (при постоянном контроле температуры, которая поддерживалась на уровне 670 ± 30 К).

После достижения заданной температуры и выдержки топлива в течение пяти минут при давлении 0,01 МПа (в это время из топлива удалялась влага и газы, содержащиеся в поверхностном слое таблеток) производилось заполнение капсулы аргоном до требуемого давления.

После завершения операций разогрева и задания начального давления аргона в капсуле проводился исследовательский пуск.

Диаграмма изменения мощности реактора и энерговыделения в топливе, которое требовалось реализовать в топливных таблетках, для двух экспериментов приведена на рисунке 3.

При реализации мощности реактора происходил разогрев топлива в ампуле. В процессе разогрева и плавления топлива примесные газы высвобождались из топливной матрицы. Газовая среда в ампуле разогревалась, что приводило к росту давления в газовой полости капсулы. Давление в газовой полости капсулы являлось основным определяемым параметром в эксперименте.

Для косвенного измерения выделения энергии в топливе рядом с капсулой в трубке устанавливался монитор энерговыделения, калиброванный по содержанию ^{235}U .

Датчики давления были размещены вне активной зоны и соединены с полостью капсулы импульсной линией, объем которой, как и объем полостей датчиков давления, был принят во внимание при определении размеров герметичной капсулы.

Для измерения температуры стенки капсулы и танталовой вставки использовались термодпары.

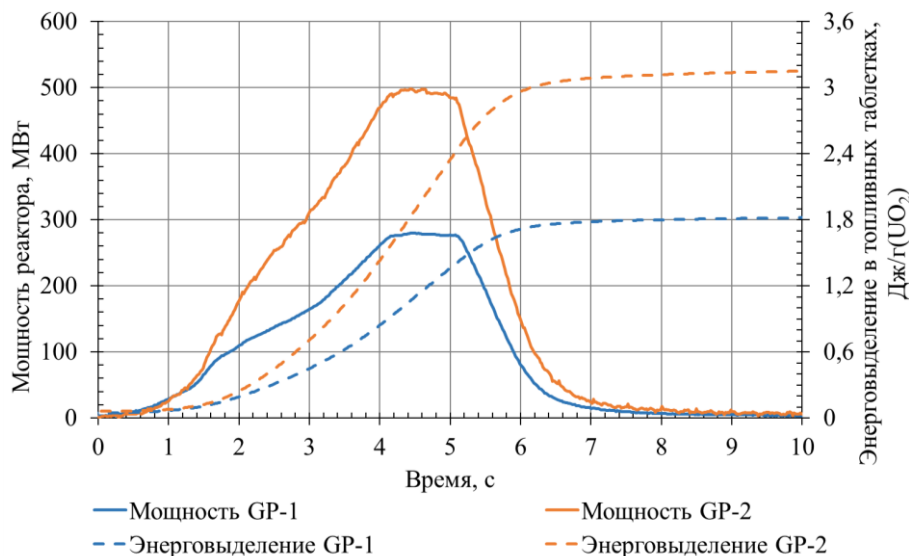


Рисунок 3. Диаграмма изменения мощности в реакторе и энерговыделения в топливе для двух экспериментов

3 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Описываемый метод оценки количества примесных газов в топливе был применен к результатам двух внутриреакторных экспериментов GP (**G**as **P**ressure), которые были проведены на реакторе ИГР [7].

Результаты эксперимента GP-1

В эксперименте GP-1 среднее энерговыделение в топливных таблетках составило 1,87 кДж/г UO_2 , при этом начальное давление аргона в капсуле составляло 0,365 МПа при начальной температуре капсулы 720 К.

Измеренные в ходе эксперимента GP-1 температура и давление в экспериментальном устройстве представлены на рисунках 4 и 5.

В эксперименте GP-1 топливо было расплавлено частично и при расчете содержания примесных газов во внимание принималась масса только расплавленной части топливных таблеток.

Вес топлива, которое было расплавлено в ходе эксперимента, был определен по результатам взвешиваний до и после проведения эксперимента. Результаты взвешивания фрагментов двух верхних таблеток, оставшихся нерасплавленными, показали, что масса расплавленного топлива составляет:

$$m_1 + m_2 - m_{\text{остаток}} = m_{\text{расплава}}$$

где m_1 – масса первой таблетки до проведения эксперимента, г; m_2 – масса второй таблетки до проведе-

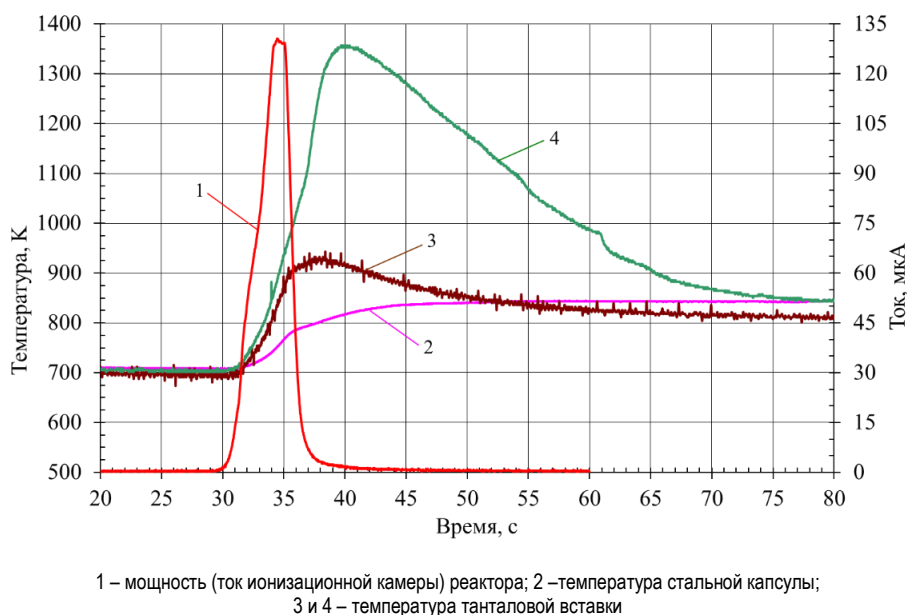


Рисунок 4. Параметры эксперимента GP-1

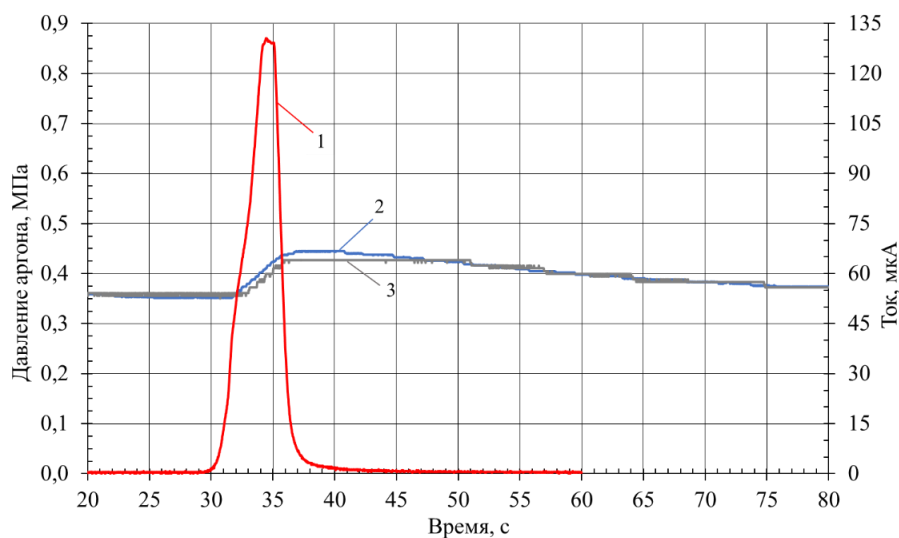


Рисунок 5. Изменение давления в эксперименте GP-1

ния эксперимента, г; $m_{\text{остаток}}$ – масса топлива, оставшегося нерасплавленным в ходе эксперимента в первой и второй таблетках, г; $m_{\text{расплава}}$ – масса топлива расплавившегося в первой и второй таблетках в ходе эксперимента, г.

Масса расплавленного топлива составила 4,79 г.

Рассчитанное количество примесных газов, вышедших из топлива в эксперименте GP-1, составляет $\sim 2,24 \cdot 10^{-5}$ моль. При этом удельное содержание примесных газов в топливе в расчете на 4,79 г расплавленного топлива (только для двух верхних таблеток) не превышает $0,47 \cdot 10^{-6}$ моль/г UO_2 .

Результаты эксперимента GP-2

В эксперименте GP-2 среднее энерговыделение в топливных таблетках составило 3,26 кДж/г UO_2 , при

этом начальное давление аргона в капсуле составляло 0,267 МПа при начальной температуре капсулы 685 К.

Измеренные в ходе эксперимента GP-2 температура и давление в экспериментальном устройстве представлены на рисунках 6 и 7.

В процессе эксперимента GP-2 топливо было полностью расплавлено. Масса расплавленного топлива составила 35,89 г.

Количество примесных газов, вышедших из топлива, составило $3,99 \cdot 10^{-5}$ моль, что в расчете на массу расплавленного топлива (35,89 г) составило $1,1 \cdot 10^{-6}$ моль/г UO_2 . Это значение является более корректным, так как в эксперименте GP-2 было полностью расплавлено все топливо.

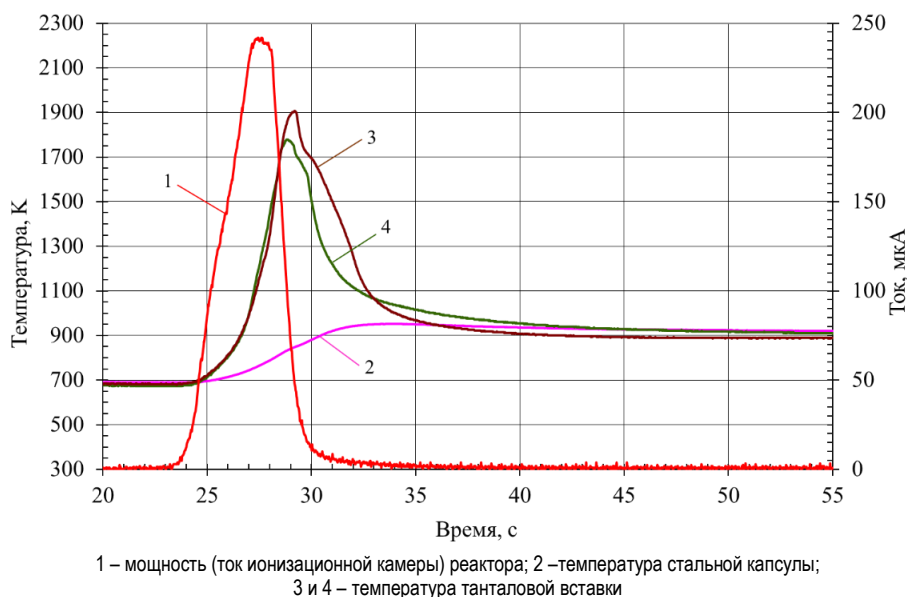


Рисунок 6. Параметры эксперимента GP-2

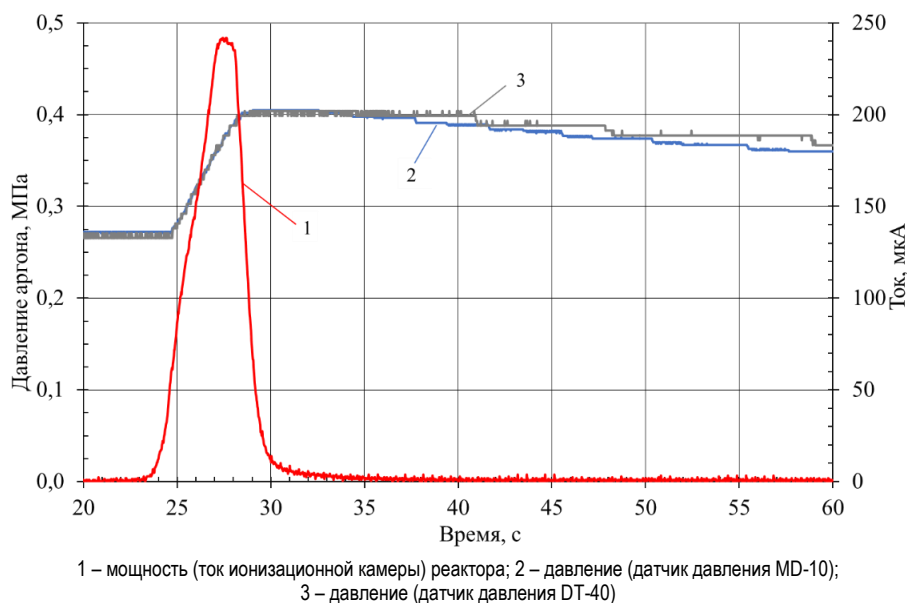


Рисунок 7. Изменение давления в эксперименте GP-2

Выводы

Результаты исследований, направленных на определение количества примесных газов в топливных таблетках и влияния примесных газов на величину давления, формирующегося в замкнутом объеме при плавлении в нем топлива, показали, что:

- в случае плавления ядерного топлива в замкнутом объеме количество примесного газа, вышедшего из топлива в этот объем, может быть оценено, если к описанию поведения газа применить уравнение состояния идеального газа;

- основным условием, которое должно быть выполнено для получения корректных результатов оценки количества примесных газов, является использование совершенной системы прямых измерений температуры и давления газа;

- содержание примесных газов в топливе по результатам проведенных облучательных экспериментов определено на уровне $0,49 \dots 1,1$ моль/г UO_2 при плавлении диоксида урана. Полученные данные хорошо согласуются с требованиями, регламентирующими максимальное содержание примесных газов для таблеток из порошка диоксида урана, которое составляет 0,9 моль/г UO_2 в технических условиях для российских производителей, 2 моль/г UO_2 – для производителей США, и $4 \cdot 10^{-6}$ моль/г UO_2 для производителей из Швеции [8]. Полученный в результате использования разработанной методики определения объема примесных газов в керамическом топливе диапазон для топлива типа ВВЭР хорошо согласуется с требованиями к топливу российского производства и подтверждает корректность разработанной методики.

Вклад от примесных газов в общее давление при плавлении небольшого объема топлива будет минимален, и рост давления будет вызван процессами, не связанными с выходом примесных газов. Однако, важно отметить, что при проведении внутриреакторных экспериментов с плавлением большого объема свежего, и, тем более, облученного топлива, вклад от примесных газов в общее давление должен быть учтен при планировании и проведении анализа условий безопасного проведения испытаний.

Разработанная и экспериментально апробированная оригинальная методика оценки количества примесных газов в топливе может быть успешно реализована при условии использования развитой системы измерения температуры газа и давления, при этом наиболее важное значение имеют измерения температуры покрывающего газа, так как температура газа в области размещения топлива может быть принята равной температуре самого топлива, которая может быть довольно точно рассчитана по значениям выделившейся в нем энергии.

Данная работа выполнена в рамках научно-технической программы № BR09158470 «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан».

ЛИТЕРАТУРА

1. Сулаберидзе В.Ш. Исследование выхода газообразных продуктов деления под оболочку опытных твэлов с компактной двуокисью урана / В.Ш. Сулаберидзе, Б.В. Самсонов, А.П. Кириллович, А.В. Перпин, Ю.И. Лимонов, Н.Ф. Шипигин, В.М. Иванов, Н.И. Крошкин // НИИАР-26(541). – Препринт – Димитровград, 1982. – 28 с.
2. Марков Д. В. Основные закономерности изменения свойств и характеристик топлива ВВЭР и РБМК нового поколения в период эксплуатации по результатам комплексных послереакторных исследований: дисс. д.т.н.: 05.14.03/ Марков Д. В.; ФГБУ НИЦ «Курчатовский институт». – Москва, 2017. – 397 с.
3. Жилкин А.С. Определение параметров твэлов реактора БН-600 неразрушающими методами / А.С. Жилкин, О.С. Кпростин, А.Н. Огородов, Е.С. Лисицын, А.Н. Бабушкин, П.И. Лебедев, В.В. Чув, Е.В. Шестопалов, А.Г. Цикунов – Обнинск: Физико-энергетический институт, 1991. – 34 с.
4. Vityuk G. Methods and results of determining the impurity gas amount in ceramic fuel / G. Vityuk, A. Vurim, M. Skakov, A. Pakhnits // Annals of Nuclear Energy. – 2021. – Vol. 150. – Article 107843. Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.107843>.
5. Курчатов И.В. Импульсный графитовый реактор ИГР / И.В. Курчатов, С.М. Фейнберг, Н.А. Доллежалъ // Атомная энергия. – Москва, 1964. – Т. 17, вып. 6. – С. 463–474
6. Витюк В.А. Подготовка реакторных экспериментов по изучению тяжелой аварии быстрого реактора с натриевым теплоносителем / В.А. Витюк, А.Д. Вурим, В.М. Котов, Г.А. Витюк, Д.С. Иданова // Труды VIII Международной научно-практической конференции «Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине. – Томск, ТПУ, 2016. – С. 29–30.
7. Вурим А.Д. Внутриреакторные эксперименты по проекту EAGLE / А.Д. Вурим, В.А. Гайдайчук, А.В. Пахниц, Н.А. Демко, А.Г. Трухачев, Е.В. Козловский, М.О. Токтаганов, И.В. Прозорова, И.Н. Богомолова, Ю.В. Алейников // Вестник НЯЦ РК. Атомная энергетика и безопасность. – 2002. – № 1. – С. 25–34.
8. Милованов О.В. Разработка технологии уран-гадолиниевого оксидного топлива для реакторов ВВЭР / О.В. Милованов, В.Н. Проселков, А.В. Кулешов и др. // ИАЭ-5744/4 Российский научный центр «Курчатовский институт». – Препринт – 1994. – С. 2–3.

REFERENCES

1. Sulaberidze V.Sh. Issledovanie vykhoda gazoobraznykh produktov deleniya pod obolochku opytnykh tvelov s kompaktnoy dvoukis'yu urana/ V.Sh. Sulaberidze, B.V. Samsonov, A.P. Kirillovich, A.V. Perpin, Yu.I. Limonov, N.F. Shipigin, V.M. Ivanov, N.I. Kroshkin // NIIAR-26(541). – Preprint – Dimitrovgrad, 1982. – 28 p.
2. Markov D. V. Osnovnye zakonomernosti izmeneniya svoystv i kharakteristik topliva VVER i RBMK novogo pokoleniya v period ekspluatatsii po rezul'tatam kompleksnykh poslereaktornykh issledovaniy: diss. d.t.n.: 05.14.03/ Markov D. V.; FGBU NITs «Kurchatovskiy institut». – Moscow, 2017. – 397 p.
3. Zhilkin A.S. Opredelenie parametrov tvlov reaktora BN-600 neraerushayushimi metodami / A.S. Zhilkin, O.S.

- Kprostin, A.N. Ogorolov, E.S. Lisitsyn, A.N. Babuikin, P.I. Lebedev, V.V. Chuev, E.V. Shestopalov, A.G. Tsikunov – Obninsk: Fiziko-energeticheskiy institut, 1991. – 34 p.
4. Vityuk G. Methods and results of determining the impurity gas amount in ceramic fuel / G. Vityuk, A. Vurim, M. Skakov, A. Pakhnits // Annals of Nuclear Energy. – 2021. – Vol. 150. – Article 107843. Rezhim dostupa: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.107843>.
 5. Kurchatov I.V. Impul'snyy grafitovyy reaktor IGR / I.V. Kurchatov, S.M. Feynberg, N.A. Dollezhal' // Atomnaya energiya. – Moskva, 1964. – T. 17, Issue 6. – P. 463–474
 6. Vityuk V.A. Podgotovka reaktornykh eksperimentov po izucheniyu tyazhelyoy avarii bystrogo reaktora s natrievym teplonositelem / V.A. Vityuk, A.D. Vurim, V.M. Kotov, G.A. Vityuk, D.S. Idanova // Trudy VIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Fiziko-tekhnicheskie problemy v nauke, promyshlennosti i meditsine. – Tomsk, TPU, 2016. – P. 29–30.
 7. Vurim A.D. Vnutrireaktornye eksperimenty po proektu EAGLE / A.D. Vurim, V.A. Gaydaychuk, A.V. Pakhnits, N.A. Demko, A.G. Trukhachev, E.V. Kozlovskiy, M.O. Toktaganov, I.V. Prozorova, I.N. Bogomolova, Yu.V. Aleynikov // Vestnik NYaTs RK. Atomnaya energetika i bezopasnost'. – 2002. – No. 1. – P. 25–34.
 8. Milovanov O.B. Razrabotka tekhnologii uran-gadolinievogo oksidnogo topliva dlya reaktorov VVER / O.B. Milovanov, V.N. Proselkov, A.V. Kuleshov i dr. // IAE-5744/4 Rossiyskiy nauchnyy tsentr “Kurchatovskiy institut”. – Preprint – 1994. – P. 2–3.

ЯДРОЛЫҚ ОТЫНДАҒЫ ҚОСПАЛЫҚ ГАЗДАРДЫҢ МӨЛШЕРІН АНЫҚТАУ ӘДІСІН ӨНДЕУ БОЙЫНША ЭКСПЕРИМЕНТТІК ЗЕРТТЕУЛЕР

¹⁾ Витюк Г.А., ²⁾ Витюк В.А., ¹⁾ Вурим А.Д., ¹⁾ Келсингазина Р.Е., ¹⁾ Бекмагамбетова Б.Е.

¹⁾ ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатова, Қазақстан

²⁾ Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығы РМК, Курчатова, Қазақстан

Мақала ампулалық құрылғының ішінде белсенді аймақтың балқуымен, ауыр апатты модельдеу кезінде ядролық отындағы қоспалық газдардың жалпы қысымға әсер ету мөлшерінің жойғыш үлесі тұрғысынан бағалауына арналған. Жұмыста отынды балқыту кезінде твелдің жабық көлеміндегі газдың қысымы мен температурасын өлшеуге негізделген есептеу әдісі ұсынылған. Әзірленген әдістеменің дұрыстығы реттелетін нейтрондық импульсті іске асыру кезінде импульсті графитті реакторда ИГР отынды балқыту бойынша жүргізілген эксперименттердің нәтижелерімен расталады.

Түйінді сөздер: импульстік графит реакторы ИГР, реакторішілік тәжірибе, тәжірибелік сынау, ауыр апат, қысым, қоспалы газдар, отынның балқуы.

EXPERIMENTAL STUDIES ON DEVELOPMENT OF THE METHOD FOR DETERMINING THE AMOUNT OF IMPURITATED GASES IN NUCLEAR FUEL

¹⁾ G.A. Vityuk, ²⁾ V.A. Vityuk, ¹⁾ A.D. Vurim, ¹⁾ R.Ye. Kelcingazina, ¹⁾ B.Ye. Bekmagambetova

¹⁾ Branch “Institute of Atomic Energy” RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

²⁾ RSE “National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan”, Kurchatov, Kazakhstan

The article is devoted to an issue of estimating the impurity gas amount in nuclear fuel in the aspect of the distracting contribution from released gases to the total pressure inside ampoule of the device in the simulating a severe accident with core melting. The paper presents a method based on measuring the pressure and temperature of gas in a closed values of the fuel elements during the fuel melting. The correctness of the developed methodology is confirmed by the results of experiments on the melting of fuel in a pulsed graphite reactor IGR with the implementation of a controlled neutron pulse.

Keywords: pulsed graphite reactor IGR, in-reactor experiment, experimental testing, severe accident, pressure, impurity gases, fuel melting.