

ВОЗМОЖНОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ НА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ РЕАКТОРЕ ИР-8 ТОПЛИВНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ В ПОДДЕРЖКУ ПРОЕКТА ВВЭР-СКД

Арефинкина С.Е., Ерак Д.Ю., Ефремов П.К., Михин О.В., Мурашов В.Н.,
Яковлев В.В. (НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия)

Введение

В настоящее время, с учетом имеющегося опыта, реактор ИР-8 НИЦ «Курчатовский институт» рассматривается в качестве возможной площадки для проведения исследований перспективных топливных композиций и опытных ТВЭЛов. В докладе рассмотрены возможности проведения испытаний по исследованию опытных ТВЭЛов для проектируемых реакторов с водяным теплоносителем сверхкритических параметров (ВВЭР-СКД). Обсуждаются подходы к разработке ампульных устройств для исследований оболочек ТВЭЛов в среде теплоносителя с СКД-параметрами.

1. Возможности реактора ИР-8 по исследованию опытных ТВЭЛов

Исследовательский реактор ИР-8 является весьма удобным инструментом для изучения поведения опытных ТВЭЛов, ядерных топливных композиций и конструктивных элементов ядерных энергетических установок под облучением. Особенностью реактора является возможность проведения, в числе прочего, экспресс-экспериментов с опытными ТВЭлами, в условиях, приближенных к условиям эксплуатации реакторов типа ВВЭР [1].

ИР-8 – это исследовательский реактор бассейнового типа, максимальной тепловой мощностью 8 МВт. Максимальная плотность потока быстрых нейтронов ($E > 0,5$ МэВ) в экспериментальных каналах активной зоны составляет $\sim 1,1 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-2}$, для сменного бериллиевого отражателя $\sim 4,8 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-2}$ [2]. На реакторе ИР-8 создана исследовательская облучательная база с использованием вертикальных каналов в активной зоне и в отражателе реактора, которая позволяет проводить облучение опытных ТВЭЛов. Их испытания могут проводиться в специальных ампульных устройствах (АУ).

2. Разработка ампульного устройства для проведения испытаний

2.1. Постановка задачи

Для обоснования выбора конструкционных материалов оболочек и обоснования работоспособности ТВЭЛов для энергетического реактора ВВЭР-СКД и многоцелевого тестового легководного СКД-реактора малой мощности с быстрым спектром нейтронов была разработана двухэтапная экспериментальная программа, включающая в частности последовательные облучения опытных ТВЭЛов в реакторах АО «ГНЦ НИИАР» и НИЦ «Курчатовский институт» [3, 4].

При проведении испытаний в ампульном устройстве с исследуемыми ТВЭлами (АУ-СКД) планируется обеспечить следующие условия: давление ~ 30 МПа; температура оболочки опытного ТВЭла ~ 550 °С. Внешний диаметр оболочки образца испытываемого ТВЭла – 8,4 мм, толщина оболочки – 0,8 мм. В качестве одного из кандидатных материалов оболочки ТВЭла рассматривается сталь ЧС-68-ИД хд. [4].

2.2. Варианты конструкции АУ для исследований опытных твэлов и имитаторов твэлов в среде с СКД-параметрами

Анализ возможных вариантов конструкции ампульного устройства с исследуемыми твэлами для проведения реакторных экспериментов выполняется с целью выбора наиболее оптимальной схемы для достижения необходимых параметров, обеспечения безопасности проведения испытаний и получения наиболее представительных результатов.

В данной работе рассмотрены разработанные варианты конструкции АУ-СКД: один – для испытаний опытных твэлов, второй – для облучения имитаторов твэлов в среде СКД-теплоносителя. И в том и в другом случае АУ-СКД планируется облучать в одной из ячеек отражателя реактора ИР-8. Выбор наиболее оптимальной ячейки для каждого эксперимента осуществляется на основании нейтронно-физических расчетов. Для решения задач планируемых исследований важно обеспечить необходимые параметры естественной конвекции СКД-теплоносителя в рабочем объеме ампулы.

Для облучения опытных твэлов предлагается использовать однотрубное АУ-СКД с одним опытным (вверху) и одним подогревающим твэлом (внизу), расположенными друг над другом, охлаждаемыми теплоносителем в режиме естественной конвекции (рис. 1). Под опытным в данном случае понимается исследуемый твэл (предварительно облученный в реакторе БОР-60 НИИАР), под подогревающим – необлученный твэл, используемый для достижения необходимых параметров в ампульном устройстве [3]. Согласно проводившимся оценкам, для достижения требуемых температур на оболочках мощность подогревающего твэла должна быть меньше мощности верхнего.

В рамках организации работ по исследованию опытных твэлов в ИР-8 планируется проведение макетного реакторного эксперимента по испытанию инструментированных твэлов. Под макетным реакторным экспериментом в данном случае понимается относительно краткосрочный эксперимент, который является необходимым начальным этапом при подготовке проведения на ИР-8 дальнейших исследований. В данном эксперименте и макетный, и подогревающий твэл должны быть из свежего топлива.

При проведении реакторных исследований опытных твэлов корректное определение их температуры в режиме реального времени играет важнейшую роль. При планировании макетного эксперимента предусматривается инструментация оболочки макетного твэла термопарами (ТП) типа ХА, что позволит получить прямые данные по распределению температур оболочки твэлов. Схема инструментации подогревающих твэлов термопарами также проработана. В качестве одного из возможных для макетного и подогревающих твэлов предложен способ инструментации с заделкой ТП в паз на оболочке. Используя полученные при макетных испытаниях соотношения, текущие экспериментальные данные и необходимые расчетные схемы, в дальнейшем будет возможно производить оценки температур оболочек опытных твэлов в режиме реального времени. Для опытных твэлов инструментация оболочек

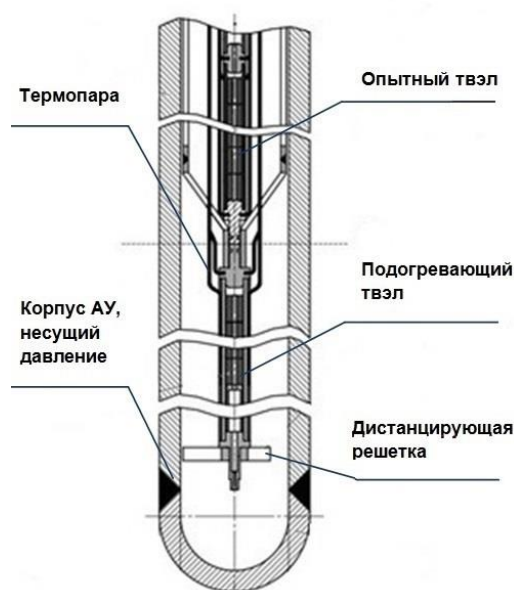


Рис. 1. Принципиальная схема АУ-СКД для облучения опытных твэлов

не предусматривается. Для них предлагается вариант с заделкой термопар в нижнюю и промежуточную концевые детали (заглушки) опытного ТВЭЛ.

Для предложенного варианта АУ-СКД с опытными ТВЭЛами проводились нейтронно-физические [5] и теплогидравлические расчеты. Согласно результатам оценок температур оболочек ТВЭЛов, для опытного образца наблюдается довольно сильная неравномерность по высоте. Достижение как можно большей высотной равномерности температуры оболочек является важным с точки зрения представительности результатов испытаний и получения материалов для последующих послереакторных исследований. Для макетного и подогревающего ТВЭЛов, инструментированных термопарами, были сделаны необходимые прочностные оценки. Комплекс выполненных расчетов позволяет обосновать возможность достижения необходимых параметров реакторного эксперимента по испытаниям рассмотренного варианта АУ-СКД с опытными ТВЭЛами.

В рамках второго направления проектирования рассмотрено ампульное устройство для возможного облучения имитаторов ТВЭЛов в среде СКД-теплоносителя, где необходимые параметры будут достигаться, в частности, за счет наличия внешнего электрического нагревателя. Одной из важных задач планируемой общей программы исследований [4] является изучение влияния радиационной составляющей на коррозионную стойкость оболочек ТВЭЛов при облучении в среде теплоносителя с параметрами СКД. Такая “внешняя” задача может быть решена при облучении образцов в АУ предложенной конструкции. В качестве испытываемого образца предполагается использовать имитатор ТВЭЛ с сердечником из вольфрама и оболочками из кандидатных материалов для ТВЭЛов реактора ВВЭР-СКД. Также могут испытываться и полые оболочки. Представляется, что испытания АУ-СКД с имитаторами ТВЭЛов могут стать подготовительным этапом для дальнейших исследований опытных ТВЭЛов. Такой эксперимент на реакторе ИР-8 может рассматриваться в качестве макетного, верификационного и использоваться для отработки различных параметров водно-химических режимов для проектируемой установки ВВЭР-СКД.

В АУ-СКД для облучения имитаторов ТВЭЛов необходимые значения температуры теплоносителя на уровне верхнего испытываемого образца возможно достигать и поддерживать при помощи использования внешних электрических нагревателей, а также за счет наличия разделительной трубы с изоляционным зазором. Для проведения экспериментов с имитаторами ТВЭЛов предлагается, аналогично ранее рассмотренному варианту ампульного устройства для облучения опытных ТВЭЛов, использовать АУ-СКД с одним имитатором ТВЭЛа сверху и одним подогревающим ТВЭЛОМ внизу. В данном случае, предполагается, что мощность подогревающего ТВЭЛа должна быть значительно больше мощности верхнего образца. Благодаря наличию разделительной трубы в АУ образуется циркуляционный контур с подъемным и опускным участком движения теплоносителя (рис. 2). Для снижения перетечек тепла из подъемной в опускную ветвь и достижения более равномерных значений температуры и скорости по сечению воды разделительная труба должна иметь закрытый сверху изоляционный зазор (например, в виде газового или зазора, заполненного СКД-теплоносителем). Данная схема допускает снижение температуры верха опускного потока за счет передачи тепла в компенсатор объема и дальнейшего сброса в бассейн реактора. В АУ-СКД предусмотрено наличие компенсатора объема, конструкция которого должна быть более подробно проработана при дальнейшем проектировании и обоснована комплексом необходимых расчетов и стендовых испытаний.



Рис. 2. Один из вариантов схемы сечения АУ-СКД с имитаторами твэлов для ячейки отражателя реактора б-4 (указанные размеры справочные)

В АУ-СКД для облучения имитаторов твэлов предлагается использовать кабельные электронагреватели. Предполагается, что нагреватель будет состоять из нескольких секций, управляемых при помощи ПИД-регулятора (пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор), использование которого также было неоднократно проверено при облучении ампульных устройств с конструкционными материалами [6].

Для предложенного варианта АУ-СКД с нагревателем с ПИД-регулятором были проведены качественные предварительные оценки теплогидравлических параметров СКД-теплоносителя. Сделанные оценки показывают, что применение нагревателя с ПИД-регулятором, при моделировании работы которого использовались специально подобранные коэффициенты, обеспечивает более оптимальный выход АУ-СКД на рабочий режим, чем для АУ с нагревателем без регулятора [7]. Полученные результаты являются приемлемыми с точки зрения соответствия параметрам, требуемых в экспериментах по испытаниям оболочек твэлов в АУ-СКД. Предполагается, что конструктивные особенности такого варианта ампульного устройства позволят достичь большей высотной равномерности и постоянства температуры оболочек исследуемых образцов во время проведения эксперимента.

Имитаторы твэлов, а также подогревающие твэлы в варианте конструкции АУ-СКД с электрическими нагревателями могут быть инструментированы термопарами. Для заделки термопар на оболочке испытываемого имитатора твэла возможно использовать уже рассмотренный способ заделки в паз. Также для получения дополнительной информации термопара может быть размещена и в вольфрамовом сердечнике имитатора твэла, что будет более подробно рассмотрено в разделе 3.

Само ампульное устройство (АУ-СКД с опытными твэлами и АУ-СКД с имитаторами твэлов) может быть инструментировано датчиками. Предполагается использовать типы датчиков, представленных ниже.

Экспериментальные параметры и основные типы датчиков при исследованиях образцов твэлов в АУ-СКД

Контролируемый параметр	Датчик
Температура воды по высоте АУ-СКД	Термопары (ХА)
Давление теплоносителя и давление газа в компенсаторе объема в АУ-СКД, сигнализация о разгерметизации объема АУ-СКД	По два датчика давления для каждого объема внутри АУ
Плотность потока тепловых нейтронов	Два датчика ДПЗ
Активность теплоносителя, сигнализация о разгерметизации твэла в АУ-СКД	Два гамма-датчика

3. Возможность определения величины тепловыделения в образцах имитаторов твэлов нестационарным методом регулярного теплового режима

Для АУ-СКД с имитаторами твэлов с сердечником из вольфрама предлагается использовать подход к определению величины тепловыделения в образцах нестационарным методом регулярного теплового режима [8].

При расположении термопары в критическом радиусе цилиндрического образца имитатора твэла для оперативного нахождения средней величины тепловыделения возможно использовать специальное рабочее уравнение. Корректность применения данного уравнения была продемонстрирована при определении величины энергосыделения в образцах из нержавеющей стали и титана, облучавшихся в третьем ряду отражателя реактора ИР-8. Использувавшееся для получения экспериментальных данных облучательное устройство и цилиндрические образцы были инструментированы термопарами. Установка термопары в «критической» точке позволила получить практически экспоненциальную зависимость температуры образца от времени. Было показано хорошее согласование полученных результатов с данными, рассчитанными при использовании других подходов к определению энергосыделения в образцах [9].

Метод оперативного экспериментального определения тепловыделения может применяться при проведении различных реакторных экспериментов. В случае использования метода регулярного теплового режима при заделке термопары в сердечник из вольфрама выбор места установки термопары нужно проводить, учитывая положение «критической» точки цилиндра, нестационарный тепловой процесс в которой проходит только в регулярной форме. Данные таких исследований могут использоваться как для дополнительного экспресс-контроля за параметрами облучения в процессе эксперимента, так и для верификации расчетных моделей, описывающих поведение образцов при их испытаниях в ампульных устройствах.

Заключение

Получение данных реакторных экспериментов по испытаниям твэлов, эксплуатируемых при СКД-параметрах в условиях облучения, является чрезвычайно важным этапом разработки инновационных реакторов ВВЭР-СКД.

В докладе показаны схемы конструкции АУ-СКД для облучения опытных твэлов и имитаторов твэлов, которые представляются на данном этапе наиболее приемлемыми для испытаний на реакторе ИР-8. Рассмотрены вопросы инструментации датчиками опытных твэлов (или имитаторов твэлов) и объема АУ для получения данных об изменении параметров эксперимента в режиме реального времени.

Для АУ с имитаторами твэлов с сердечником из вольфрама рассмотрен подход к определению величины тепловыделения в образцах нестационарным методом регулярного теплового режима. Использование данного метода представляется перспективным в такого рода экспериментах.

Список литературы

1. В.В. Яковлев, Д.Ю. Ерак, Л.А. Гончаров, Алексей С. Киселев, А.Е. Кругликов, О.В. Михин, В.А. Насонов, Ю.Е. Песня, А.А. Седов, Н.В. Хмызов, А.Ф. Чабак, А.Ф. Яшин, Техника и методика исследований в реакторе ИР-8 опытных твэлов с разными топливными композициями. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2017, вып. 3, с. 49—57.
2. Насонов В.А., Песня Ю.Е., Спектры нейтронов в экспериментальных каналах реактора ИР-8. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов, 2017, вып. 3, с. 65—70.
3. В.Ю. Бландинский, В.В. Колесов, В.А. Невиница, П.А. Фомиченко, А.А. Седов, А.А. Фролов, С.Б. Пустовалов, М.В. Щуровская, С.С. Симонов, Ю.Е. Песня, В.В. Трофимчук, В.А. Насонов, И.Ю. Жемков, Особенности изменения изотопного состава опытных твэлов реактора типа ВВЭР-СКД при последовательном облучении в быстром и тепловом спектре нейтронов // ВАНТ. Сер.: Физика ядерных реакторов. 2022. Вып. 2. С. 90–96.
4. С.С. Симонов, А.Л. Баланин, Планирование дореакторных, реакторных и послереакторных исследований конструкционных материалов и опытных твэлов реактора ВВЭР-СКД с быстрым спектром нейтронов, XI Всероссийская молодежная конференция «Научные исследования и технологические разработки в обеспечение развития ядерных технологий нового поколения», г. Димитровград, 17–21 апреля 2023 г.: тезисы докладов [Электронный ресурс]. — Электронные текстовые данные (~ 3,5 Мб). — Димитровград: АО «ГНЦ НИИАР», 2023. — 129 с.
5. Трофимчук В.В., Насонов В.А., Песня Ю.Е., Глыва К.И., Расчетная оценка требуемого тепловыделения в опытных твэлах для достижения сверхкритических параметров теплоносителя при их облучении в исследовательском ядерном реакторе, ВАНТ, Серия: ядерно-реакторные константы, выпуск 4, 2021
6. В.В. Яковлев, Д.Ю. Ерак, А.Н. Абрамов, В.С. Буслаев, В.Н. Кочкин, О.В. Михин, А.А. Можяев, В.Н. Мурашов, В.А. Насонов, Ю.Б. Ничипоренко, Ю.Е. Песня, Н.В. Хмызов, А.Ф. Яшин, Техника и методы испытаний конструкционных материалов на исследовательском реакторе ИР-8, ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов, 2017, вып. 3, стр. 58–64
7. А.Н. Абрамов, С.Е. Арефинкина, А.Д. Герстле, П.К. Ефремов, О.В. Михин, В.Н. Мурашов, Моделирование параметров ПИД-регулятора нагревателя в ампульном реакторном эксперименте, Сборник аннотаций XVII Курчатовской молодежной научной школы, Москва, 2023
8. Н.А. Ярышев. Теоретические основы измерения нестационарной температуры. Ленинград, Энергоатомиздат, 1990
9. В.В. Трофимчук и др. Определение энерговыделения от гамма-излучения в экспериментальных каналах реактора ИР-8. ВАНТ, Физика ядерных реакторов, 2022, вып. 5