ВЛИЯНИЕ РАДИАЦИОННОГО РАЗОГРЕВА КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО УСТРОЙСТВА С КОНВЕРТЕРОМ НЕЙТРОНОВ НА ИХ ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ

^{1,2)} Сулейменов Н.А., ¹⁾ Мухамедов Н.Е., ¹⁾ Котов В.М.

¹⁾ Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан ²⁾ Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан

В работе рассмотрено экспериментальное устройство с конвертером нейтронов [1], обеспечивающее изменение спектра нейтронов реактора ИГР из теплового в быстрый. Успешное проведение испытаний требует проведения ряда теплофизических расчетов, достаточно точно моделирующих тепловое состояние экспериментального устройства и позволяющих обосновать безопасные условия проведения эксперимента. В работе приведены результаты нестационарных расчетов теплового состояния экспериментального устройства с конвертером нейтронов с энерговыделением как в топливе, так и в конструкционных материалах, имитирующих энергию деления ядер в твэлах и воздействие мгновенного и запаздывающего гамма-излучения на конструкционные материалы.

Ключевые слова: радиационный разогрев, экспериментальное устройство, энерговыделение в конструкционных материалах, теплофизические расчеты.

Введение

Одним из направлений Филиала «Институт атомной энергии» НЯЦ РК является подготовка и проведение внутриреакторных испытаний экспериментальных устройств на КИР ИГР. Каждый эксперимент требует тщательной подготовки, корректной обработки экспериментальных данных и комплекса теплофизических и нейтронно-физических расчетов.

На этапе подготовительных работ одной из важных особенностей, в значительной мере влияющей на точность реализации параметров эксперимента, является определение энерговыделения в различных элементах испытываемого экспериментального устройства. В настоящее время используется в основном часть энерговыделения в ТВС, связанная с делением ядер. Возможность задания постоянных значений удельного энерговыделения в конструкционных материалах, формирующегося за счет радиационного разогрева, обеспечивает полноту картины распределения температурного поля во всем экспериментальном устройстве и его защитном барьере.

Целью работы является сравнительная оценка теплового состояния модели экспериментального устройства с конвертером нейтронов (ЭУ с КН) по результатам теплофизических расчетов с учетом радиационного разогрева конструкционных материалов.

1 Экспериментальное устройство

С КОНВЕРТЕРОМ НЕЙТРОНОВ

Общий вид ЭУ с КН показан на рисунке 1. Основными элементами конструкции ЭУ с КН являются силовой корпус и внутренние элементы.

Силовой корпус состоит из следующих элементов (рисунок 1):

- ампула;
 - крышка.

В состав внутренних элементов входят:

- секция испытательная;
- ловушка.

Ловушка играет роль защитного барьера от теплового и механического воздействия на корпус ампулы и состоит из обечайки и стакана.

Основными объектами испытаний являются твэлы, расположенные в испытательной секции. В устройстве имеется два твэла – верхний и нижний. Центр верхнего твэла находится на уровне «+800 мм» от ЦАЗ, центр нижнего твэла совпадает с ЦАЗ реактора. Параметры твэлов приведены в таблице 1.

Параметр	Значение	
Топливо	UO ₂	
Обогащение топлива по ²³⁵ U, % – в верхнем твэле – в нижнем твэле	~ 17 ~ 0.27	
Плотность топлива, г/см ³	10,3–10,8	
Диаметр, мм — топливной таблетки наружный — центрального отверстия (для верхнего твэла)	5,9±0,02 1,5±0,1	
Высота топливного столба в твэлах, мм	300	
Количество топлива, кг – в верхнем твэле – в нижнем твэле	0,08 0,086	
Количество активационных детекторов, шт. — в верхнем твэле	3,0	

Оба твэла набираются из топливных таблеток типа БН-350, высота топливного столба в обоих твэлах одинакова и равна 300 мм. Топливные таблетки расположены в оболочке, представляющей собой трубку из стали Х16Н15М3Б с размерами 6,9×0,4 мм. С торцов твэлы закрыты заглушками. Твэлы охлаждаются азотом, подающимся с температурой ~ 293 К.

ВЛИЯНИЕ РАДИАЦИОННОГО РАЗОГРЕВА КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО УСТРОЙСТВА С КОНВЕРТЕРОМ НЕЙТРОНОВ НА ИХ ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ



а) общий вид





Верхний твэл содержит топливные таблетки из диоксида урана массой около 80 г с обогащением 17 % по ²³⁵U, а также конвертер тепловых нейтронов в быстрые, представляющий собой кадмиевый поглотитель, выполненный в виде трубки размером 18×1 и длиной 400 мм.

Нижний твэл не содержит конвертера и набирается из топливных таблеток из диоксида урана массой около 86 г с обогащением 0,27 % по ²³⁵U.

В верхнем твэле между топливными таблетками в нижней, средней и верхней частях устанавливаются активационные детекторы из никелевой фольги в виде диска диаметром 5,9 мм, толщиной 1 мм.

ВЛИЯНИЕ РАДИАЦИОННОГО РАЗОГРЕВА КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО УСТРОЙСТВА С КОНВЕРТЕРОМ НЕЙТРОНОВ НА ИХ ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ



1 – крышка ампулы; 2 – корпус ампулы; 3 – полость ампулы; 4 – испытательная секция; 5 – стакан ловушки; 6 – зазор; 7 – топливо; 8 – оболочка; 9 – азот; 10 – обечайка внутренняя; 11 – тепловой экран; 12 – кадмиевый поглотитель; 13 – обечайка наружная



2 УСЛОВИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ И РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ

Целью теплофизических расчетов ЭУ с КН является определение максимальных значений температуры элементов испытательной секции при различной температуре АЗ, разогревающейся во время работы реактора.

Для проведения теплофизических расчетов в программе *SolidWorks* [2] была разработана двумерная осесимметричная модель экспериментального устройства (рисунок 2-а). Затем модель импортирована в программный комплекс *ANSYS* 14.5 [3], в котором был проведен расчет.

В целях оптимизации расчета и снижения вычислительной нагрузки модель предварительно в модуле *ANSYS Design Modeler* была разбита на части, содержащие верхний и нижний твэл соответственно (рисунок 2-б и 2-в). Для каждой части был проведен отдельный расчет.

Мощность реактора, согласно условиям эксперимента, составляет 5,2 МВт, а диаграмма ее изменения имеет следующий вид (рисунок 3). В ходе пуска реализуется регулируемый импульс с суммарным энерговыделением в активной зоне реактора 5,2 ГДж.



Рисунок 3. Диаграмма изменения мощности реактора

Нейтронно-физические характеристики экспериментального устройства были получены ранее в программе MCNP [4] с использованием модели реактора [5] и применены в качестве исходных данных для проведения настоящего расчета. В элементах модели было задано объемное энерговыделение, моделирующее высвобождение энергии деления ядер и радиационный разогрев конструкционных материалов.

Общие условия теплофизических расчетов следующие:

 учтена неравномерность энерговыделения по высоте АЗ ИГР как в топливе, так и в конструкционных элементах;

учтено изменение отношения мощности устройства к мощности реактора, связанное с изменением температуры АЗ ИГР;

 начальная температура всех элементов в модели составляет 293 К;

 передача теплоты между элементами осуществляется за счет теплопроводности и конвективного теплообмена;

 расход охлаждающего азота составляет 2 г/с для каждого твэла;

- охлаждение корпуса ампулы отсутствует.

3 ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ УСТРОЙСТВА БЕЗ УЧЕТА РАДИАЦИОННОГО РАЗОГРЕВА КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Для задания неравномерного профиля энерговыделения в топливе была разработана пользовательская функция для программы ANSYS Fluent. В соответствии с функцией топливо условно делится на 10 частей, в каждой из которых задается объемное энерговыделение. Функция учитывает изменение энерговыделения во времени в отдельных частях топлива (рисунок 4) в соответствии с повышением температуры активной зоны реактора с ростом энерговыделения [6]. Нумерация частей топлива от 1 до 10 сверху вниз.

По результатам расчета получены максимальные значения элементов в модели экспериментального устройства. Для верхнего твэла данные приведены на рисунке 5, для нижнего – на рисунке 6.

В данном расчете температуры корпуса ампулы и обечайки ловушки не превышают 300 К. Максимальная температура топлива достигает 462÷463 К.



б) нижний твэл

Рисунок 4. Изменение энерговыделения во времени в отдельных частях топлива

4 ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ УСТРОЙСТВА С УЧЕТОМ РАДИАЦИОННОГО РАЗОГРЕВА КОН-СТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ЗАЩИТНЫХ БАРЬЕРОВ

Для проведения данного расчета, аналогично, как и для предыдущего, была разработана пользовательская функция, в соответствии с которой объемы элементов модели, где учитывается радиационный разогрев, разделены по высоте на части: для конструкционных элементов – 10 частей, для обечайки ловушки и корпуса ампулы – 27 и 28 частей соответственно. В этих частях функция задает и учитывает изменение энерговыделения во времени.



Рисунок 5. Максимальные значения температуры в модели с верхним твэлом



Рисунок 6. Максимальные значения температуры в модели с нижним твэлом



Рисунок 7. Максимальные значения температуры в модели с верхним твэлом



Рисунок 8. Максимальные значения температуры в модели с нижним твэлом

По результатам расчетов получены максимальные значения элементов в модели экспериментального устройства. Для верхнего твэла данные приведены на рисунке 7, для нижнего на рисунке 8.

В проведенном расчете температура корпуса ампулы и обечайки ловушки достигают 763 К на уровне ЦАЗ, что превышает максимальное расчетное значение температуры корпуса ампулы – 623 К. Этот параметр достигается на 705 с от начала реализации диаграммы изменения мощности. Максимальные значения температуры топлива в верхнем и нижнем твэлах составят 620 К и 478 К соответственно.

5 Сравнительный анализ теплового состояния

Рассмотрим высотное распределение температуры элементов твэла (топливо, оболочка, внутренняя и наружная обечайки, конвертер, тепловой экран) и защитных барьеров (обечайка ловушки, корпус ампулы). На рисунке 9-а показано распределение температуры в устройстве без учета радиационного разогрева, на рисунке 9-б – с учетом радиационного разогрева на 990 с диаграммы изменения мощности.



а) без учета радиационного разогрева



б) с учетом радиационного разогрева

Рисунок 9. Высотное распределение температуры в устройстве

Как видно из рисунка 9-а, если не учитывать радиационный разогрев конструкционных материалов, эффективности системы охлаждения (при расходе азота 2 г/с на каждый твэл) достаточно для поддержания температуры элементов испытательной секции в довольно низких диапазонах. При учете воздействия гамма-излучения на конструкционные материалы, т.е. при их радиационном разогреве, температурный режим устройства меняется. Температура материалов с большим сечением поглощения нейтронов, в данном случае конвертера нейтронов из кадмия, возрастает.

На рисунке 10 показано высотное распределение удельной мощности элементов экспериментального устройства в логарифмической шкале. Из рисунка видно, что в устройстве мгновенное и запаздывающее гамма-излучение вносит наибольший вклад в по-глотитель – в нем выделяется до 3×10^4 кВт/м³. Удельная мощность в топливе находится на уровне $\sim 1,23 \times 10^4$ кВт/м³, а для наружной и внутренней обечаек, теплового экрана, обечайки ловушки и корпуса ампулы сравнима и находится в пределах от $5,9 \times 10$ кВт/м³ до $1,4 \times 10^3$ кВт/м³. Для оболочек твэлов эта величина мала (от $2,3 \times 10$ кВт/м³ до $1,35 \times 10^2$ кВт/м³).

Максимальные значения температуры элементов на уровнях «+800 мм» и «0 мм» от ЦАЗ, а также среднее значение температуры азота на выходе из тракта охлаждения приведены в таблице 2.

В проведенных расчетах при расходе азота 2 г/с в верхнем твэле максимальная температура поглотителя без учета его радиационного разогрева составляет 298 К, а с учетом радиационного разогрева равна 554 К с запасом до температуры плавления 40 К. Следовательно, данное значение расхода является минимальным для недопущения расплавления конвертера.

Рассмотрим радиальное распределение в модели устройства в расчетах с учетом радиационного разогрева и без его учета (рисунок 11) на высоте «+800 мм» от ЦАЗ и «0 мм», т.е. в середине верхнего и нижнего твэлов.

На высоте «0 мм» от ЦАЗ в обоих расчетах температура топлива меняется незначительно. При учете радиационного разогрева температура корпуса ампулы становится выше температуры топлива из-за отсутствия его охлаждения. В этом случае обечайка ловушки разогревается до 762К, а корпус ампулы до 763 К.

Учет радиационного разогрева	Уровень ЦАЗ, мм	Т _{макс} , К							T _{cp} , K	
		топливо	оболочка	внутренняя обечайка	экран	поглотитель	наружная обечайка	корпус ампулы	обечайка ловушки	азот
без учета	+800	462	377	325	299	298	297	293	293	332
	0	463	393	335			329	293	293	339
с учетом	+800	620	554	485	554	554	485	492	498	504
	0	478	411	546			546	763	762	360

Таблица 2.3начения температуры



Рисунок 10. Высотное распределение удельной мощности в устройстве



Рисунок 11. Высотное распределение температуры в устройстве с учетом радиационного разогрева

На высоте «+800 мм» от ЦАЗ рост температуры защитных барьеров составляет ~ (100÷150) К – температура корпуса ампулы возрастает до 492 К, а обечайки ловушки до 498 К. Существенный вклад на изменение температурного режима верхнего твэла вносит конвертер из кадмия, т.к. наибольшее тепло выделяется именно в нем. Конструкция системы охлаждения верхнего твэла устроена таким образом, что азот на входе в первую очередь охлаждает конвертер, а затем твэл, что объясняет повышение температуры топлива в расчете с учетом радиационного разогрева.

Таким образом, для получения более точного распределения температуры в устройстве, и как следствие, повышения представительности теплофизических расчетов, необходимо учитывать радиационный разогрев конструкционных материалов и, кроме этого, прорабатывать диаграмму изменения мощности экспериментального устройства в зависимости от температуры АЗ реактора. Разработка и применение пользовательских функций в программном модуле *ANSYS Fluent* позволяет учитывать неравномерность энерговыделения как по высоте элементов устройства, так и во времени.

Заключение

Рассмотрены характеристики работы основных элементов экспериментального устройства с конвертером нейтронов. Разработаны расчетные модели устройства, пользовательские функции, учитывающие временное и высотное распределение энерговыделения в топливе, конструкционных материалах и защитных барьерах устройства.

Проведены теплофизические расчеты экспериментального устройства с учетом и без учета радиационного разогрева конструкционных материалов за счет мгновенного и запаздывающего гамма-излучения. Выяснено, что значение расхода азота 2 г/с на каждый твэл достаточно для охлаждения твэлов при рассмотренной диаграмме испытания устройства, но с учетом радиационного разогрева конструкционных материалов расход следует незначительно увеличить.

По результатам расчетов выполнена сравнительная оценка распределения температуры элементов устройства. С учетом радиационного разогрева конструкционных материалов тепловая нагрузка на элементы устройства возрастает. При реализации диаграммы эксперимента с интегральным энерговыделением 5,2 ГДж на 705 с температура корпуса ампулы на уровне «0 мм» от ЦАЗ возможно превысит максимальное расчетное значение 623 К. Полученное значение температуры корпуса ампулы 763 К является максимально возможным, расчитанное с жесткими консервативными допущениями.

Учет радиационного разогрева конструкционных материалов является важной задачей в подготовке проведения испытаний и обоснования безопасности конструкции экспериментального устройства. Вышеуказанные замечания будут учтены при разработке программы испытаний ЭУ с КН.

Работа выполнена в рамках Республиканской бюджетной программы «Развитие атомных энергетических проектов» по теме «Исследование поведения твэлов быстрых реакторов в тяжелых авариях».

Литература

- 1. Устройство экспериментальное с конвертером нейтронов: техническое задание на разработку технического проекта и рабочей документации / Филиал ИАЭ РГП НЯЦ РК.– Курчатов, 28.02.2019.– Инв. № 11-220-02/938вн.
- SolidWorks Premium 2014 x64 Edition. SP 5.0 [Электронный ресурс]: 1995–2014 Dassault Systèmes. Электрон. дан. и прогр. – [Б. м.], 2014.
- ANSYS release 14.5 Documentation for ANSYS WORKBENCH [Электронный ресурс]: ANSYS Inc.– Электрон. дан. и прогр. – [Б. м.], 2014.
- 4. MCNP-5.1.40 Monte-Carlo N-Particle Transport Code; Los Alamos National Laboratory; Los Alamos, New Mexico. April 24, 2003.
- 5. А. с. ИС 006968 от 27.12.16 Республика Казахстан. Компьютерная модель реактора ИГР для стационарных нейтроннофизических расчетов / А.Д. Вурим, В.М. Котов, Р.А. Иркимбеков, Л.К. Жагипарова, А.А. Байгожина.– № 2738; 27.12.2016.– 1 с.
- 6. Особенности расчета мощности элементов экспериментального устройства для реакторных испытаний на ИГР / Жанболатов О.М., Иркимбеков Р.А. // Вестник НЯЦ РК. 2020. № 2 (82). С. 55–60.

НЕЙТРОН КОНВЕРТЕРІ БАР ЭКСПЕРИМЕНТТІҚ ҚҰРЫЛҒЫДАҒЫ ҚҰРАСТЫРЫМДЫҚ МАТЕРИАЛДАР РАДИАЦИЯЛЫҚ ЖЫЛЫТУЫНЫҢ ТЕМПЕРАТУРАЛЫҚ РЕЖИМІНЕ ӘСЕРІ

^{1,2)} Н.А. Сулейменов, ¹⁾ Н.Е. Мухамедов, ¹⁾ В.М. Котов

¹⁾ КР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан ²⁾ Дәулет Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан

Мақалада ИГР реакторының нейтрондық спектрінің жылулықтан шапшаңға өзгіртуді қамтамасыз ететін нейтрон конвертері бар эксперименттік құрылғы қарастырылған [1]. Сәтті сынау өткізуі эксперименттік құрылғының жылулық күйін дәл еліктейтін және эксперименттің қауіпсіз жағдайларын негіздеуге мүмкіндік беретін бірқатар жылуфизикалық есептеулерді талап етеді. Мақалада нейтрон конвертері бар эксперименттік құрылғының жылулық күйі бойынша, отын элементтерінде ядролық бөліну энергиясын және құрастырымдық материалдарға лездік және кешікпелі гамма-сәулеленудің әсерін еліктейтін энергия шығарылуы есепке алынған, стационар емес есептер нәтижелері келтірілген.

Түйінді сөздер: радиациялық қыздыру, экспериметтік құрылғы, құрастырымдық материалдардағы энергияның шығарылуы, жылуфизикалық есептеулер.

EFFECT OF RADIATION HEATING OF CONSTRUCTION MATERIALS OF AN EXPERIMENTAL DEVICE WITH A NEUTRON CONVERTER ON THEIR TEMPERATURE REGIME

1,2) N.A. Suleimenov, ¹⁾ N.E. Mukhamedov, ¹⁾ V.M. Kotov

¹⁾ Branch "Institute of Atomic Energy" RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan ²⁾ D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

The paper considers an experimental device with a neutron converter [1], which provides a change in the neutron spectrum of the IGR reactor from thermal to fast. Successful testing requires a number of thermophysical calculations that sufficiently accurately simulate the thermal state of the experimental device and make it possible to justify the safe conditions of the experiment. The paper presents the results of non-stationary calculations of the thermal state of an experimental device with a neutron converter with energy release both in fuel and in structural materials that simulate nuclear fission energy in fuel elements and the effect of instantaneous and delayed gamma radiation on structural materials.

Keywords: radiation heating, experimental device, energy release in structural materials, thermophysical calculations.