https://doi.org/10.52676/1729-7885-2026-3-210-219
УДК 621.039.51

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ОБЪЕМНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОПЛИВА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ СОПРЯЖЕНИЯ CFD- И MCNP-РАСЧЕТОВ

Д.М. Секен[1,2*], О.М. Жанболатов[1], А.С. Сураев[1,2], Р.А. Иркимбеков[1], Н.Е. Мухамедов[1,2]

[1]Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан
[2]Шәкәрім университет, Семей, Казахстан

** E-mail для контактов: seken@nnc.kz*

В работе представлена методика моделирования динамики объемного распределения топлива на основе сопряжения теплофизических и нейтронно-физических расчетов. Разработан алгоритм автоматизированного преобразования результатов CFD-моделирования в расчетную модель MCNP. Методика позволяет учитывать изменение геометрии, фазового состава и пространственного распределения топлива и конструкционных материалов в процессе деградации и плавления топлива. Для этого разработано программное обеспечение, обеспечивающее обработку данных теплофизических расчетов, построение расчетных решеток различного типа, реализацию алгоритма углового дублирования и автоматическое формирование входных данных для нейтронно-физических расчетов. В отличие от традиционного подхода, основанного на создании набора отдельных нейтронно-физических моделей для фиксированных стадий деградации топлива, разработанная методика позволяет выполнять расчеты энерговыделения для любого состояния экспериментального устройства, полученного в результате теплофизического моделирования. Проведена валидация разработанной нейтронно-физической модели объекта испытаний с топливом в составе модели реактора ИГР путем сравнения расчетных результатов с данными спектрометрических исследований. Полученные результаты могут быть использованы при расчетном сопровождении экспериментов по исследованию процессов деградации и плавления ядерного топлива, а также при разработке сопряженных методик теплофизического и нейтронно-физического моделирования для реакторных исследований.

Ключевые слова: *нейтронно-физическое моделирование, облучательные устройства, ИГР, энерговыделение, MCNP, CFD, сопряженные расчеты, твэл.*

Введение

В настоящее время исследования поведения ядерного топлива в переходных и аварийных режимах являются одним из приоритетных направлений в работах по обоснованию безопасности атомной энергетики. Особый интерес представляют процессы деградации и плавления топлива, сопровождающиеся изменением его геометрии, перераспределением материалов и изменением нейтронно-физических характеристик системы. Для проведения подобных исследований в Национальном ядерном центре Республики Казахстан используется исследовательский импульсный графитовый реактор ИГР, позволяющий изучать быстропротекающие физические процессы, которые, согласно теоретическим предсказаниям, могут развиваться в активных зонах реакторных установок в случае нарушений баланса между теплосъемом и энерговыделением в реакторном топливе.

В ходе реакторных экспериментов происходит интенсивное изменение параметров исследуемого объекта, связанное с нагревом топлива, разрушением оболочек твэлов, плавлением конструкционных материалов и последующим перераспределением расплава. Изменение пространственного распределения материалов оказывает существенное влияние на нейтронное поле и энерговыделение в объекте испытаний. В связи с этим при подготовке экспериментов важной задачей является обеспечение заданных параметров испытаний и прогнозирование поведения топлива на различных стадиях деградации.

Традиционно решение данной задачи основывается на проведении серии вспомогательных реакторных экспериментов и разработке отдельных нейтронно-физических моделей для фиксированных состояний топлива. Такой подход требует значительных трудозатрат и не позволяет учитывать непрерывное изменение геометрии и состава материалов в процессе развития аварийных процессов.

В настоящее время для анализа поведения ядерного топлива широко применяются методы теплофизического моделирования, основанные на использовании CFD-кодов [1,2]. Данные методы позволяют получать распределения температуры, объемных долей материалов и фазового состава среды на различных этапах развития процесса. Однако применение только теплофизического моделирования не обеспечивает возможности детального анализа изменения нейтронно-физических характеристик системы, поскольку CFD-коды не предназначены для моделирования процессов переноса нейтронов и расчета энерговыделения.

Для решения данной задачи используются нейтронно-физические коды, основанные на методе Монте-Карло. Одним из наиболее распространенных инструментов является код MCNP, позволяющий выполнять высокоточные расчеты потоков нейтронов, энерговыделения и других нейтронно-физических характеристик [3]. Вместе с тем, непосредственное использование результатов CFD-моделирования в расчетах MCNP затруднено вследствие различий в способах представления геометрии, материалов и расчетных сеток. Это требует разработки специализированных алгоритмов преобразования данных, обеспечивающих корректный перенос результатов теплофизического моделирования в нейтронно-физическую модель.

В отличие от традиционного подхода, основанного на создании набора отдельных нейтронно-физических моделей для различных стадий деградации топлива, в настоящей работе реализована методика автоматизированного формирования расчетной модели MCNP непосредственно на основе результатов теплофизического моделирования [4,5]. Разработанный подход позволяет учитывать изменение пространственного распределения топлива и конструкционных материалов, полученное в ходе CFD-расчетов, и выполнять расчеты энерговыделения для любого состояния экспериментального устройства.

Целью работы является разработка и валидация методики автоматизированного преобразования результатов теплофизического моделирования в нейтронно-физическую модель MCNP для анализа энерговыделения на различных стадиях деградации и плавления топлива.

Методы сопряжения нейтронно-физических и теплофизических расчетов часто применяются при расчетных исследованиях исследовательских реакторов, в том числе ИГР [6]. Данные расчетные методики предназначены, в первую очередь, для исследования характеристик самого реактора. Однако на данный момент методика исследования изменения удельного энерговыделения топлива в экспериментальной сборке с помощью сопряжения двух различных расчетных программ недостаточно разработана и мало представлена в публикациях.

Следовательно, научная новизна работы заключается в разработке алгоритма автоматизированного преобразования результатов CFD-моделирования в трехмерную нейтронно-физическую модель MCNP, позволяющего выполнять расчеты энерговыделения для произвольного состояния экспериментального устройства без необходимости ручного построения отдельных расчетных моделей. В представленном методе моделируется изменение формы топлива экспериментального устройства с целью исследования непосредственно именно параметров самой сборки. Основной сложностью является изменение формы и пространственного расположения топлива, изменение материального состава топливо-стальной смеси в ходе эксперимента. Для построения геометрии в нейтронно-физической модели необходимо производить учет каждого элемента с его характеристиками. Основной идеей методики является наложение на определенную область экспериментальной сборки сетчатой структуры. С помощью разработанного алгоритма в каждой ячейке определяется основная материальная фракция, и таким образом строится определенное состояние топлива в конкретный момент времени.

Нейтронно-физическая модель

Разработка нейтронно-физической модели объекта испытаний с тепловыделяющей сборкой стандартной конструкции (ТВССК) проводилась в составе нейтронно-физической модели реактора ИГР для возможности проведения расчетов в программе MCNP [7]. В качестве основы использована верифицированная модель реактора ИГР [6], подробно описывающая его активную зону.

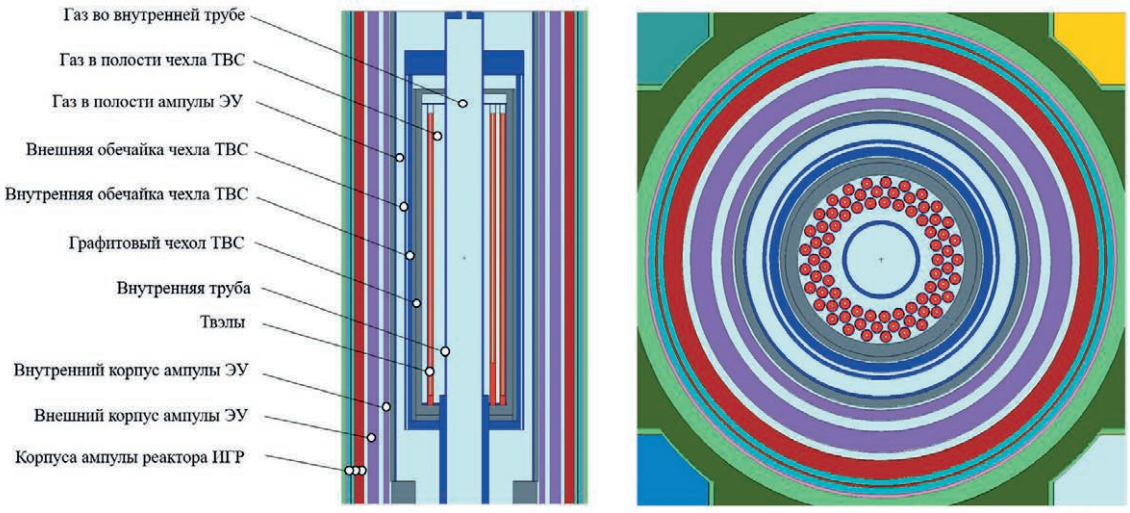


Рисунок 1. Объединенная расчетная модель «объект испытаний с ТВССК – реактор ИГР»

Нейтронно-физическая модель (рисунок 1) подробно описывает объект испытаний с ТВССК, с соблюдением всех размерно-материальных характеристик и свойств. Особенностью рассматриваемой задачи является локальный характер процессов плавления и перераспределения материалов. В ходе эксперимента деградации подвергаются только топливные элементы ТВССК, тогда как окружающие конструкционные элементы сохраняют свою геометрию и физические свойства.

Графитовый стакан, окружающий тепловыделяющую сборку, обладает высокой термостойкостью и в рассматриваемых режимах не достигает температур плавления. Вследствие этого его геометрические размеры и материальный состав остаются неизменными на протяжении всего эксперимента.

Расплав топлива и конструкционных материалов локализуется внутри ограниченной области, соответствующей расположению ТВССК, и не распространяется за пределы графитового стакана. По этой причине моделирование динамики перераспределения материалов выполнялось только для области размещения 75 твэлов тепловыделяющей сборки.

При построении модели выполнено упрощение геометрии: топливо, оболочка твэлов и внутренние полости представлены в виде концентрических колец с сохранением их геометрических объемов и высот. Это упрощение позволило сократить время расчета и повысить устойчивость сходимости.

Теплофизический расчет

Для получения информации о пространственном распределении топлива и конструкционных материалов в процессе деградации твэлов были выполнены теплогидравлические расчеты в среде ANSYS Fluent. Расчеты проводились для экспериментального устройства с ТВССК с использованием модели многофазного течения, позволяющей учитывать процессы плавления, перемещения и перераспределения материалов внутри исследуемой области [8].

В ходе расчета определялись объемные доли топлива (UO_2), стали и газовой фазы, а также распределение температуры в различные моменты времени. Полученные данные использовались в качестве исходной информации для последующего формирования нейтронно-физической модели.

На рисунке 2 представлены результаты теплофизического моделирования на временных шагах 25,2 с и 27,3 с. На начальном этапе наблюдается локальный нагрев топливной композиции с образованием областей повышенной температуры в центральной части твэлов. По мере развития процесса температура топлива достигает значений, соответствующих началу плавления, что сопровождается изменением распределения материалов внутри расчетной области.

Анализ распределения объемных долей показывает, что в процессе нагрева происходит перераспределение топливной композиции и конструкционных материалов. При этом максимальные температуры локализуются в области расположения топлива, тогда как окружающие конструкционные элементы и графитовый стакан сохраняют свою геометрию и не участвуют в процессе плавления.

Полученные поля температуры и объемных долей материалов экспортируются из CFD-модели и далее используются разработанным программным обеспечением для автоматического формирования расчетной решетки MCNP. Для каждой расчетной ячейки определяется доминирующий материал на основе объемных долей фаз, после чего формируется нейтронно-физическая модель, соответствующая текущему состоянию экспериментального устройства.

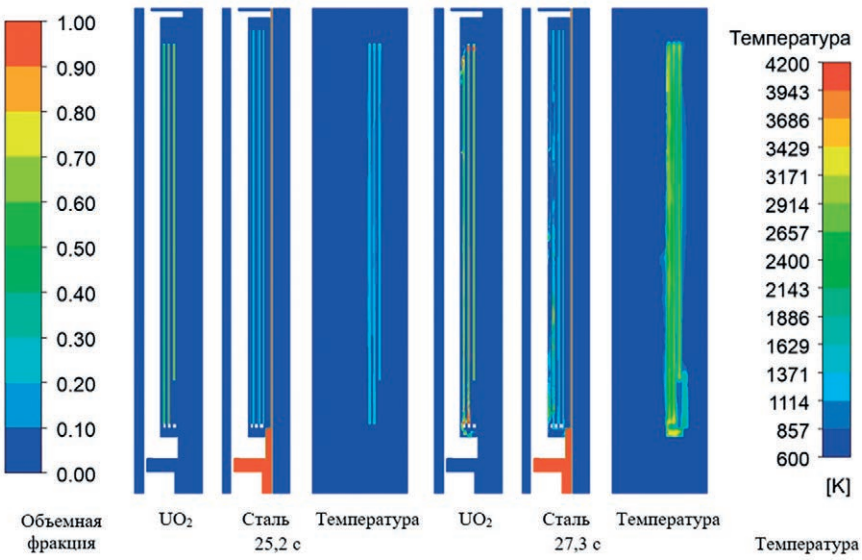


Рисунок 2. Распределение объемной фракции диоксида урана, стали и температуры

Методика моделирования деформации топлива

При проведении реакторных экспериментов, связанных с исследованием процессов плавления и деградации ядерного топлива, существенное значение имеет изменение пространственного распределения топлива и конструкционных материалов в процессе нагрева. По мере развития моделируемого аварийного процесса происходит разрушение оболочек твэлов, плавление топливной композиции и перераспределение расплава внутри экспериментального устройства, что приводит к изменению нейтронно-физических характеристик системы и, как следствие, распределения энерговыделения.

Традиционный подход к расчетному сопровождению подобных экспериментов основывается на разработке серии отдельных нейтронно-физических моделей MCNP, каждая из которых соответствует определенной стадии деградации топлива. Для анализа изменения энерговыделения выполняются расчеты для нескольких заранее заданных состояний экспериментального устройства: исходного состояния твэлов, разогретого состояния твэлов, состояния после разрушения оболочек твэлов, а также состояний с последовательным удалением отдельных рядов топлива. Данный подход довольно хорошо себя зарекомендовал на практике для оценки влияния отдельных стадий деградации на нейтронно-физические характеристики. Однако у него существуют определенные недостатки: значительные трудозатраты на подготовку расчетных моделей (до нескольких дней), человеческий фактор, и сложность обеспечения соответствия данных между различными состояниями экспериментальной сборки в процессе плавления.

В настоящей работе реализован новый подход, основанный на использовании результатов теплофизического моделирования для автоматизированного формирования нейтронно-физической модели. В процессе CFD-моделирования рассчитывается пространственное распределение топлива, конструкционных материалов и газовой фазы на различных этапах развития аварийного процесса [9]. Полученные данные экспортируются и обрабатываются разработанным программным обеспечением, которое автоматически формирует расчетную решетку MCNP, соответствующую текущему состоянию экспериментального устройства.

Программный алгоритм преобразования результатов численного моделирования представлен на рисунке 3. Основной задачей программы является построение расчетной решетки (lattice) с последующим определением материального состава каждой ячейки на основе данных о распределении фаз и термогидродинамических параметров. На первом этапе осуществляется считывание данных о расчетных элементах, полученных из теплофизического расчета на определенный момент времени в виде текстового файла. Данные включают в себя порядковый номер элемента, его координаты, температуру, плотность, объем, а также объемные доли материалов (VOF - Volume of Fluid). Эти данные формируют массив элементарных объемов, полученных в результате CFD-расчета. Следует отметить, что теплогидравлические данные считываются программой мгновенно.

Далее выполняется чтение геометрии расчетной области, представленной в виде решетки, параметры которой задаются пользователем. Сюда входят размеры сетки и ее тип (гексагональная и квадратная).

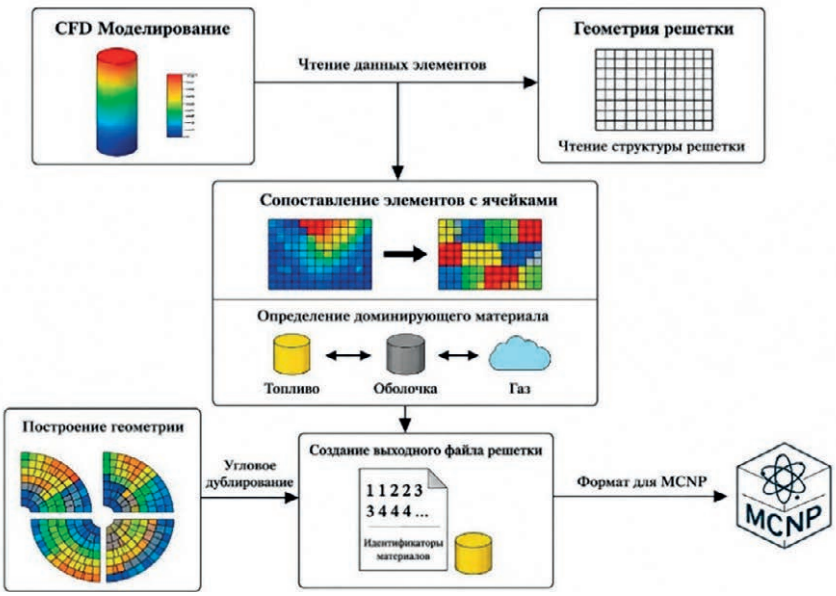


Рисунок 3. Схема алгоритма преобразования результатов CFD-моделирования ANSYS в расчетную решетку для нейтронно-физических расчетов в коде MCNP

Данные инструменты являются стандартными средствами для моделирования повторяющихся структур.

Следующим этапом является сопоставление элементов CFD с ячейками расчетной решетки. Для каждой ячейки определяется доминирующий материал. Для этого проводится перебор данных массива элементов, и с учетом геометрических размеров и расположения ячейки решетки определяется принадлежность данного элемента к ячейке. Затем определяется доминирующая материальная фракция данного элемента. Классификация материала в ячейке расчетной сетки осуществляется по максимальному значению количества элементов соответствующей фазы, что позволяет однозначно задать материал ячейки (например, топливо, оболочка или газ). Время работы в данной фазе зависит от выбранных пользователем размеров решетки.

Дополнительно реализован алгоритм углового дублирования (полярной симметрии), позволяющий восстановить полную геометрию системы на основе расчетов. Это существенно снижает вычислительные затраты при сохранении точности представления пространственного распределения материалов.

На заключительном этапе формируется выходной файл решетки, в котором каждой ячейке присваивается числовой идентификатор материала. Полученная структура используется в дальнейшем для задания геометрии и материального состава в расчетах с использованием кода MCNP.

Разработанный подход обеспечивает автоматизированный перенос результатов термогидродинамического моделирования в нейтронно-физическую постановку задачи. В данном исследовании рассматривалось общее представление расчетного метода, как потенциально возможного в будущей перспективе. Исследование сеточной сходимости является важной задачей и обязательно будет проводиться в последующих работах по данной тематике.

Типы используемых решеток

В рамках построения нейтронно-физической модели используются различные типы расчетных решеток, обеспечивающие дискретизацию пространственной области и задание геометрии системы. Выбор типа решетки определяется особенностями геометрии объекта исследования и требованиями к точности моделирования. В работе реализована поддержка двух основных типов решеток: прямоугольной и гексагональной (рисунок 4).

Прямоугольная (квадратная) решетка представляет собой регулярную структуру, основанную на декартовой системе координат. Ячейки такой решетки имеют форму параллелепипедов и равномерно распределены по пространству с заданным шагом по осям X, Y и Z. Основным преимуществом данного типа решетки является простота реализации и удобство индексации элементов, что делает ее эффективной при моделировании областей с регулярной геометрией. Однако в задачах, связанных с описанием плотной упаковки топливных элементов, прямоугольная решетка может приводить к дополнительным геометрическим приближениям.

Гексагональная решетка применяется для более точного описания структуры активной зоны ядерных реакторов. В поперечном сечении такая решетка имеет шестиугольную форму ячеек, что позволяет более адекватно моделировать плотную упаковку твэлов. При этом в трехмерной постановке каждая ячейка представляет собой призму, вытянутую вдоль оси Z, то есть по высоте ячейки сохраняют форму параллелепипеда, а гексагональная структура проявляется только в плоскости XY. Данный тип решетки обеспечивает более корректное воспроизведение геометрии и, как следствие, нейтронно-физических характеристик системы, однако требует более сложных алгоритмов определения принадлежности элементов и поиска соседних ячеек.

В разработанном алгоритме тип решетки определяется на этапе считывания входных данных по параметру lat. В зависимости от значения данного параметра осуществляется выбор соответствующего способа задания геометрии, вычисления границ ячеек и построения трехмерного массива решетки.

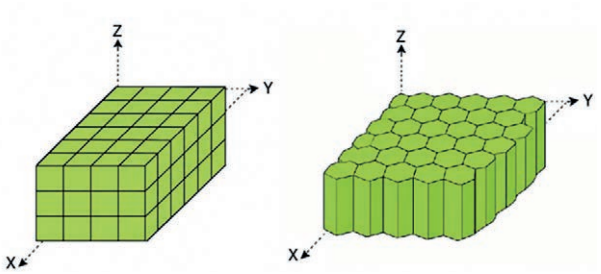


Рисунок 4. Типы используемых решеток

Отдельно стоит сказать о влиянии размера решетки на геометрическую интерпретацию расплава. Безусловно, с уменьшением размеров ячеек решетки улучшается качество воспроизведения расплава топлива.

Угловое дублирование

Теплофизическое моделирование выполнялось в двумерной постановке задачи в среде ANSYS Fluent. Для использования полученных результатов в нейтронно-физических расчетах методом Монте-Карло в коде MCNP, требующих трехмерного описания геометрии, реализован алгоритм углового дублирования. Данный алгоритм обеспечивает преобразование двумерного распределения материалов в трехмерную расчетную модель с сохранением пространственных характеристик исследуемой системы. Метод углового дублирования основан на использовании полярной симметрии объекта исследования. Каждый расчетный элемент исходного сектора характеризуется коорди-

натами центра ячейки и набором физических параметров. В данной работе рассматривается только применение квадратной расчетной решетки. Необходимо учитывать, что при использовании каждого типа решетки алгоритм дублирования имеет свои особенности, что будет рассмотрено в последующих работах. Следует отметить, что угловое дублирование применимо только в случае осесимметричной модели. В противном случае, необходимо строить непосредственно полноразмерную модель, поскольку угловое дублирование будет работать некорректно.

В данном теплогидравлическом расчете использовалась упрощенная геометрия, то есть топливо, оболочки твэлов и межтвэльные полости построены в виде колец, что продиктовано осевой симметрией модели. В случае квадратной решетки для формирования полной модели координаты элемента последовательно поворачиваются относительно центральной оси системы на заданный угол. В дальнейших исследованиях по развитию данной темы планируется реализовать подробное описание каждого вида решеточной структуры с алгоритмом дублирования ячеек.

Преобразование координат выполняется согласно выражениям:

$$x' = x \cdot \cos\varphi - y \cdot \sin\varphi$$
$$y' = x \cdot \sin\varphi + y \cdot \cos\varphi$$

где x и y - координаты исходного элемента, x’ и y’ - координаты после поворота, φ - угол поворота.

Количество операций дублирования определяется отношением полного угла окружности к угловому размеру расчетного сектора. Для каждого нового положения сохраняются все физические характеристики исходного элемента, что обеспечивает корректное восстановление пространственного распределения материалов.

После выполнения процедуры дублирования формируется полный массив расчетных элементов, который используется для построения трехмерной решетки нейтронно-физической модели. Применение данного подхода позволяет сформировать трехмерную нейтронно-физическую модель на основе результатов двумерного теплофизического расчета. Преобразование данных теплофизического расчета с данной геометрией при считывании данных и составлении нейтронно-физической модели составляет порядка 30 минут.

На основе полученных распределений объемных долей материалов выполняется автоматическое построение расчетной решетки MCNP, пример которой представлен на рисунке 5.

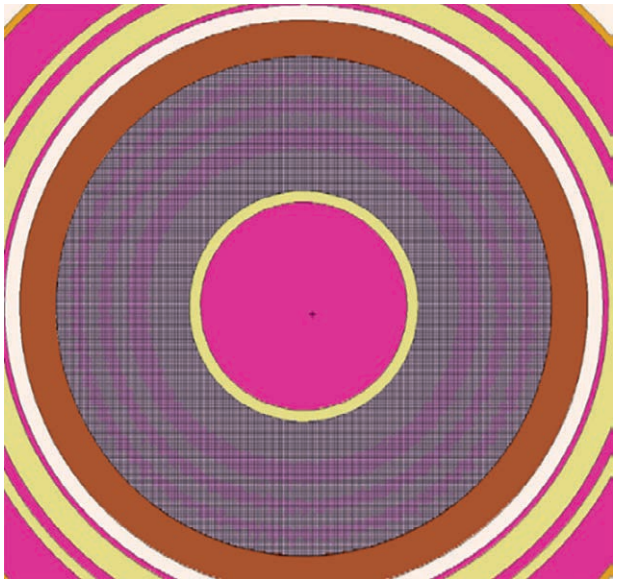


Рисунок 5. Моделирование топлива после обработки данных

Верификация и валидация модели

Валидация алгоритма преобразования производилась с использованием трехмерной теплофизической модели. Трехмерная теплофизическая модель представляла собой 1/16 часть устройства, поскольку топливная сборка является осесимметричной. Как показали расчеты, для достижения сходимости, временной шаг был задан равным 10^{-5} с. К сожалению, при имеющихся вычислительных мощностях на проведение теплофизического расчета потребовалось довольно длительное время, и расчеты с данной моделью не проводились. Однако, трехмерная модель подходит для верификации алгоритма.

Для верификации использовалась квадратная решетка с различным размером сетки (0,11 и 0,055 см). Результаты работы программы с различными размерами решетки в сравнении с трехмерной теплофизической моделью представлены на рисунке 6, сравнение масс между теплофизической моделью и решетчатой структурой представлено в таблице 1. Целью верификации являлась проверка способности алгоритма воспроизводить геометрию и распределение массы топлива, полученные в детализированной теплофизической модели. Для этого сравнивались форма топливной композиции и масса топлива в каждом ряду для различных размеров расчетной решетки.

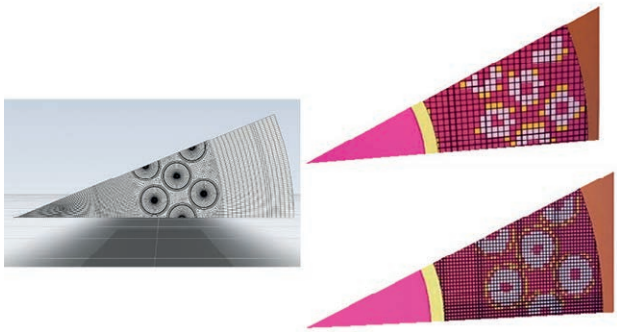


Рисунок 6. Верификация работы программы по данным трехмерной теплофизической модели

Таблица 1. Масса топлива в зависимости от размера решетки

	Масса в теплофизической модели, г	Масса при размере решетки 0,11 см, г	Масса при размере решетки 0,055 см, г
Внутренний ряд	155.1	161.4 (+4%)	157.7 (+2%)
Средний ряд	175.2	187.9 (+7%)	181.4 (+4%)
Внешний ряд	175.2	182.4 (+4%)	179.6 (+2%)

Валидация при использовании меньшей расчетной сетки по массе топлива составляет от 2% до 4% в различных рядах топлива.

Валидация нейтронно-физической модели объекта испытаний с ТВССК проводилась путем сравнения нейтронно-физических характеристик, полученных при проведении спектрометрических исследований топлива физического макета экспериментального устройства с ТВССК после его облучения в ИГР, с расчетными данными, полученными с помощью разработанной нейтронно-физической модели объекта испытаний с ТВССК [8]. Валидация проводилась для начального состояния экспериментального устройства.

Дополнительно проведена валидация разработанной методики преобразования результатов теплофизического моделирования в нейтронно-физическую модель. Для этого выполнено сопоставление распределений удельного энерговыделения, полученных для детализированной модели топливной композиции и модели, сформированной после обработки результатов теплофизического расчета.

Детализированная модель (расчет 1) включает явное описание 75 твэлов (по 25 твэлов в каждом из трех рядов). В модели, формируемой по результатам теплофизического расчета, пространственное распределение топлива представляется в виде трех кольцевых областей (расчет 2), соответствующих трем рядам расположения твэлов. При этом сохраняются основные интегральные характеристики топливной композиции, включая объем и массу топлива в каждом ряду.

Сравнение распределений удельного энерговыделения (рисунки 7-9) показывает, что модель, сформированная на основе результатов теплофизического расчета, в целом адекватно воспроизводит распределение энерговыделения, полученное для детализированной геометрии. Для расчета энерговыделения с погрешностью 1% в одной сетчатой ячейке требуется 7 суток расчетного времени. В данном случае это значительно больше, чем расчет с той же точностью при использовании стандартного метода. Работы по оптимизации методики будут включать в себя, в том числе, поиск возможностей сокращения вычислительного времени. В качестве одного из потенциальных решений предполагается использование вычислительного кластера, собранного из нескольких расчетных серверов.

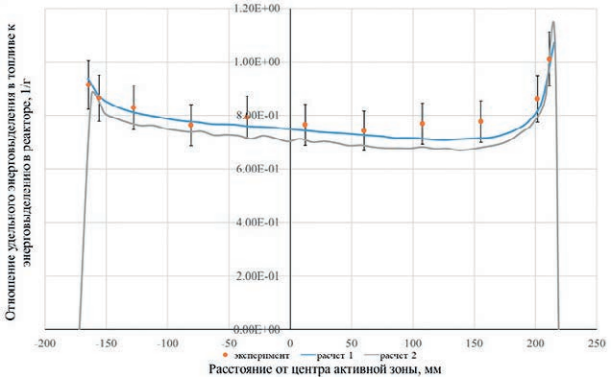


Рисунок 7. Отношение удельного энерговыделения в твэлах модели объекта испытаний с ТВССК 1 ряд

Небольшие расхождения наблюдаются преимущественно в периферийных областях модели, что может быть связано с заменой дискретного представления отдельных твэлов эквивалентным кольцевым распределением топлива. Полученное распределение энерговыделения качественно соответствует результатам

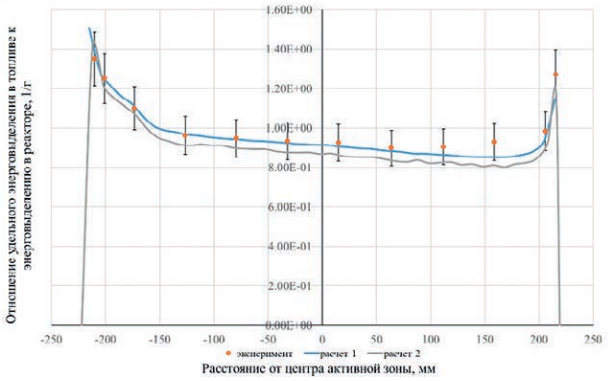


Рисунок 8. Отношение удельного энерговыделения в твэлах модели объекта испытаний с ТВССК 2 ряд

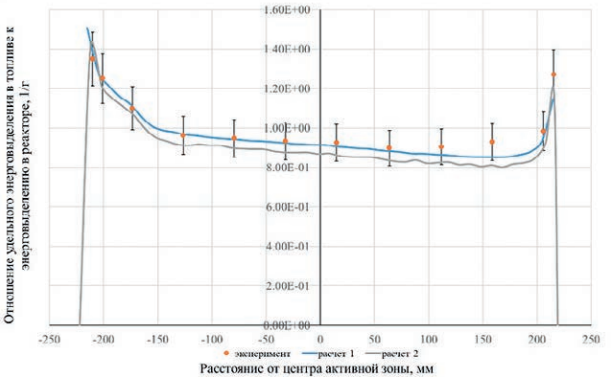


Рисунок 9. Отношение удельного энерговыделения в твэлах модели объекта испытаний с ТВССК 3 ряд

детализированной модели и воспроизводит основные закономерности изменения удельного энерговыделения по радиусу топливной композиции.

На рисунках 7-9 представлены профили относительного удельного энерговыделения в твэлах в зависимости от расстояния от центра активной зоны. Методическая погрешность определения энерговыделения при спектрометрических исследованиях на реакторе ИГР составляет около 10% и обусловлена методикой определения энерговыделения на основе спектрометрических измерений активности продуктов деления. Сравнение расчетных данных с экспериментальными результатами показывает в целом удовлетворительное совпадение по всей высоте ТВС.

Ограничения предложенного метода моделирования

Несмотря на довольно высокую привлекательность предложенной методики, существуют определенные трудности ее применения.

Во-первых, для построения модели с решетчатой структурой необходима опорная детализированная нейтронно-физическая модель. Замена всей модели на решетчатую структуру нецелесообразна, поскольку изменение агрегатного состояния происходит лишь в месте локализации и движения расплава топливных элементов устройства. Конструкция рассмотренного экспериментального устройства подразумевает, что движение расплава топлива в течение эксперимента идет в направлении центра ТВС, где расположена стальная труба.. Место расположения топлива снаружи ограничено графитовым материалом, температура плавления которого выше температуры плавления топлива. Следовательно, лишь пространство внутри графитового цилиндра заменено сетчатой структурой. Остальные элементы экспериментального устройства описаны стандартными средствами, принятыми при MCNP-моделировании, взятыми из опорной модели. В случае необходимости моделирования достаточно большой геометрической области, вычислительная сложность наложения сетки будет неоправданно большой.

Во-вторых, большинство экспериментальных устройств, испытываемых на реакторе ИГР, являются осесимметричными. Поскольку трехмерная CFD-модель занимает большое количество памяти и требуются значительные вычислительные ресурсы для расчета характеристик с высокой точностью, использование в теплофизических расчетах кольцевой модели является оправданным шагом. В случае двумерной модели выходные файлы имеют небольшой объем, и считывание данных происходит быстро. Также в течение нескольких минут происходит заполнение решетчатой структуры. Использование трехмерных моделей, особенно несимметричных, значительно увеличит время работы программы.

Основной проблемой является продолжительность нейтронно-физического расчета состояния экспериментального устройства после выполнения программы. Традиционный подход к анализу состояний экспериментального устройства является более оптимизированным с точки зрения скорости получения результата на данный момент развития существующих методик. Стоит учитывать также, что в консервативных подходах расчета энерговыделения экспериментального устройства учитывается запаздывающее энерговыделение. При использовании сетчатой структуры для расчета энерговыделения с учетом запаздывающего энерговыделения длительность расчета будет несоизмеримо большой.

Несмотря на указанные сложности, развитие данного метода представляется перспективным для создания нового расчетного инструмента, который может быть использован при обосновании и подготовке экспериментов с топливом на реакторе ИГР.

Выводы

В рамках выполненной работы разработан и реализован подход к моделированию динамики объемного распределения топлива экспериментального устройства с использованием кода MCNP6 и программного обеспечения на базе VB.NET. Созданный алгоритм обеспечивает корректный перенос данных теплофизического моделирования (CFD) в нейтронно-физическую модель, что позволяет учитывать изменение геометрии и фазового состава деградирующего топлива в расчете.

Разработанный подход позволяет учитывать изменение формы и структуры топлива при его плавлении, что является важным фактором для повышения точности расчетов нейтронно-физических характеристик. В отличие от традиционного метода использование разработанного способа позволяет намного быстрее создавать нейтронно-физические модели при изменениях состояния топлива, при этом значительно сокращается количество ручных операций, вследствие чего снижается влияние человеческого фактора.

Приведены основные ограничения применения данного подхода. Тем не менее использование данной методики способствует более достоверной интерпретации экспериментальных данных и будет способствовать повышению качества расчетного сопровождения внутриреакторных испытаний. Время выполнения программы составляет 30 минут, что быстрее традиционного метода. Однако расчетное время в MCNP, полученной нейтронно-физической модели в 7 раз больше, нежели при расчете модели, разработанной традиционным способом. На данном этапе это является основным препятствием для широкого использования методики.

Практическая значимость работы заключается в возможности применения разработанного программного инструмента для повышения эффективности и обоснования безопасности экспериментов на реакторе ИГР.

Полученные результаты подтверждают перспективность дальнейшего развития методов сопряженного теплофизического и нейтронно-физического моделирования для анализа поведения ядерного топлива в аварийных режимах.

Работа выполнена в рамках РБП 036 «Развитие атомных и энергетических проектов», подпрограммы 105 «Прикладные научные исследования технологического характера в сфере атомной энергетики», мероприятие BR24792713 «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан» на 2024-2026 годы по теме «Исследование возможности проведения облучательных экспериментов с топливом энергетического реактора на предельных параметрах работы реактора ИГР».

Литература:

1. ANSYS, Inc. Products Release 2021 R1. Academic research Mechanical and CFD.
2. Сураев А.С., Витюк Г.А., Пахниц А.В., Иркимбеков Р.А. Компьютерное моделирование тяжелых аварий на реакторе ИГР // X Международная конференция «Атомная энергетика, ядерные и радиационные технологии XXI века: тезисы докладов, Минск, 28-31 мая 2024 г.» – Минск: Государственное научное учреждение «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» Национальной академии наук Беларуси, 2024. – С. 50.
3. Kelsingazina R., Vityuk V., Vurim A., Vityuk G., Mukhamedov N., Tikhomirov G. Computational approaches for determining the nuclear heating value of structural materials during the irradiation at the IGR reactor // Annals of Nuclear Energy.– 2024.– Vol.204, art. no. 110532.– https://doi.org/10.1016/j.anucene.2024.110532.
4. Ivanov K., Avramova M. Challenges in coupled thermal–hydraulics and neutronics simulations for LWR safety analysis // Annals of Nuclear Energy – 2007. – Vol. 34, No. 6 – P. 501– 513 – https://doi.org/10.1016/j.anucene.2007.02.016
5. Avramova M., Ivanov K. Coupled Multiphysics Modeling for Nuclear Reactor Applications // Nuclear Engineering and Design – 2010.– Vol. 240.– P. 601-614. https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2010.03.009
6. Ruslan A. Irkimbekov, Vladimir A. Vityuk, Galina A. Vityuk, Olzhas M. Zhanbolatov, Artur S. Surayev, Yuri A. Popov, Andrey N. Kotlyar (2025) Development of a new computational support tool for experiments in the impulse graphite reactor // Nuclear Engineering and Design, 443 (2025), 114278, doi.org/10.1016/j.nucengdes.2025.114278
7. MCNP-6.1 Monte-Carlo N-Particle Transport Code: Los Alamos National Laboratory.
8. Қабдылқақов Е.А., Сураев А.С., Жанболатов О.М., Витюк Г.А., Иркимбеков Р.А. Совершенствование методов моделирования плавления ТВС в условиях экспериментальных исследований на реакторе ИГР // Вестник НЯЦ РК.– 2025.– Вып. 2(102).– С. 151–164.– https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-2-151-164.
9. Eickhoff M., Rückert A., Pfeifer H. Solidification modeling with User defined function in Ansys Fluent //Progress in Applied CFD – CFD2017 Selected papers from 12th International Conference on Computational Fluid Dynamics in the Oil & Gas, Metallurgical and Process Industries. – SINTEF Academic Press, 2017.

References:

1. ANSYS, Inc. Products Release 2021 R1. Academic research Mechanical and CFD.
2. Suraev A.S., Vityuk G.A., Pakhnits A.V., Irkimbekov R.A. Computer Modeling of Severe Accidents at the IGR Reactor. In: Proceedings of the 10th International Conference “Nuclear Energy, Nuclear and Radiation Technologies of the XXI Century”, Minsk, May 28-31, 2024. Minsk: Joint Institute for Power and Nuclear Research - Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus, 2024. P. 50.
3. Kelsingazina R., Vityuk V., Vurim A., Vityuk G., Mukhamedov N., Tikhomirov G. Computational approaches for determining the nuclear heating value of structural materials during the irradiation at the IGR reactor // Annals of Nuclear Energy.– 2024.– Vol.204, art. no. 110532.– https://doi.org/10.1016/j.anucene.2024.110532.
4. Ivanov K., Avramova M. Challenges in coupled thermal–hydraulics and neutronics simulations for LWR safety analysis // Annals of Nuclear Energy.– 2007.– Vol. 34, No. 6.– P. 501–513.– https://doi.org/10.1016/j.anucene.2007.02.016
5. Avramova M., Ivanov K. Coupled Multiphysics Modeling for Nuclear Reactor Applications // Nuclear Engineering and Design. – 2010.– Vol. 240.– P. 601-614. https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2010.03.009
6. Ruslan A. Irkimbekov, Vladimir A. Vityuk, Galina A. Vityuk, Olzhas M. Zhanbolatov, Artur S. Surayev, Yuri A. Popov, Andrey N. Kotlyar (2025) Development of a new computational support tool for experiments in the impulse graphite reactor // Nuclear Engineering and Design, 443 (2025), 114278, doi.org/10.1016/j.nucengdes.2025.114278
7. MCNP-6.1 Monte-Carlo N-Particle Transport Code: Los Alamos National Laboratory.
8. Kabdylkakov E.A., Suraev A.S., Zhanbolatov O.M., Vityuk G.A., Irkimbekov R.A. Improvement of Methods for Modeling the Melting of Fuel Assemblies under Experimental Conditions at the IGR Reactor // NNC RK Bulletin.– 2025.– Issue 2(102).– P. 151–164.– https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-2-151-164.
9. Eickhoff M., Rückert A., Pfeifer H. Solidification modeling with User defined function in Ansys Fluent //Progress in Applied CFD – CFD2017 Selected papers from 12th International Conference on Computational Fluid Dynamics in the Oil & Gas, Metallurgical and Process Industries. – SINTEF Academic Press, 2017.

MCNP БАҒДАРЛАМАСЫНДА ЭКСПЕРИМЕНТТІК ҚҰРЫЛҒЫ ОТЫНЫНЫҢ КӨЛЕМДІК ТАРАЛУ ДИНАМИКАСЫН МОДЕЛЬДЕУ ӘДІСТЕМЕСІН ӘЗІРЛЕУ

Д. М. Секен[1,2*], О. М. Жанболатов[1], А. С. Сураев[1,2], Р. А. Иркимбеков[1], Н. Е. Мухамедов[1,2]

[1]Атом энергиясы институтының филиалы, Курчатов, Қазақстан
[2]Шәкәрім университеті, Семей, Қазақстан

** Байланыс үшін e-mail: seken@nnc.kz*

Жұмыста жылуфизикалық және нейтрондық-физикалық есептеулерді байланыстыру негізінде отынның көлемдік таралу динамикасын модельдеу әдістемесі ұсынылған. CFD-модельдеу нәтижелерін MCNP есептік моделіне автоматтандырылған түрде түрлендіру алгоритмі әзірленді. Әдістеме отынның деградациясы мен балқуы барысында геометрияның, фазалық құрамның және отын мен конструкциялық материалдардың кеңістіктік таралуының өзгерістерін ескеруге мүмкіндік береді. Осы мақсатта жылуфизикалық есептеулер деректерін өңдеуді, әртүрлі типтегі есептік торларды құруды, бұрыштық қайталау алгоритмін жүзеге асыруды және нейтрондық-физикалық есептеулерге арналған кіріс деректерін автоматты түрде қалыптастыруды қамтамасыз ететін бағдарламалық жасақтама әзірленді. Отын деградациясының бекітілген сатылары үшін жеке нейтрондық-физикалық модельдер жиынтығын құруға негізделген дәстүрлі тәсілден айырмашылығы, әзірленген әдістеме жылуфизикалық модельдеу нәтижесінде алынған эксперименттік құрылғының кез келген күйі үшін энергия бөлінуін есептеуге мүмкіндік береді. ИГР реакторы моделінің құрамындағы отыны бар сынақ объектісінің әзірленген нейтрондық-физикалық моделіне верификация жүргізілді. Алынған нәтижелер ядролық отынның деградациясы мен балқу процестерін зерттеуге арналған эксперименттерді есептік сүйемелдеуде, сондай-ақ реакторлық зерттеулер үшін жылуфизикалық және нейтрондық-физикалық модельдеудің байланыстырылған әдістемелерін әзірлеуде пайдаланылуы мүмкін.

Түйін сөздер: *нейтрондық-физикалық модельдеу, сәулелендіру құрылғылары, ИГР реакторы, энергия бөліну, MCNP, CFD, ТВССК, твэл.*

DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR MODELING THE DYNAMIC VOLUMETRIC DISTRIBUTION OF FUEL IN AN EXPERIMENTAL DEVICE USING MCNP

D.M. Seken[1,2*], O.M. Zhanbolatov[1], A.S. Surayev[1,2], R.A. Irkimbekov[1], N.E. Mukhamedov[1,2]

[1]Branch "Institute of Atomic Energy" RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan
[2]Shakarim University, Semey, Kazakhstan

** E-mail for contacts: seken@nnc.kz*

The paper presents a methodology for modeling the dynamics of volumetric fuel distribution based on the coupling of thermal-hydraulic and neutronic calculations. An algorithm was developed for the automated conversion of CFD simulation results into an MCNP computational model. The methodology makes it possible to account for changes in geometry, phase composition, and spatial distribution of fuel and structural materials during fuel degradation and melting processes. To achieve this, software was developed for processing thermal-hydraulic calculation data, generating computational lattices of various types, implementing an angular duplication algorithm, and automatically creating input files for neutronic calculations. Unlike the conventional approach, which relies on the development of a set of separate neutronic models corresponding to fixed stages of fuel degradation, the proposed methodology enables power distribution calculations for any state of the experimental device obtained from thermal-hydraulic simulations. Verification of the developed neutronic model of the test facility containing fuel within the reactor model of the IGR reactor was performed. The obtained results can be used for computational support of experiments investigating nuclear fuel degradation and melting processes, as well as for the development of coupled thermal-hydraulic and neutronic modeling methodologies for reactor research applications.

Keywords: *neutronic modeling, irradiation devices, IGR reactor, power generation, MCNP, CFD, TVSSK, fuel rod.*