

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2026-3-142-150>
УДК 621.039.536

ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ СВЯЗЕЙ МЕЖДУ СОСТАВЛЯЮЩИМИ КОМПОНЕНТАМИ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В РЕАКТОРЕ ИГР

Д.Т. Женис*, О.М. Жанболатов, Н.Е. Мухамедов, Р.А. Иркимбеков, Г.А. Витюк

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

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

В работе представлены результаты исследования взаимосвязи между мгновенной и запаздывающей компонентами энерговыделения в активной зоне импульсного исследовательского реактора ИГР при холодном состоянии активной зоны. С использованием программного кода MCNP6 выполнена серия расчетов мгновенного и запаздывающего энерговыделения с высокой статистической точностью, получены детальные данные о пространственном распределении энерговыделения по всем колоннам и блокам активной зоны и отражателя. Для количественной оценки взаимосвязи применен ранговый коэффициент корреляции Спирмена, значения которого для всех исследованных колонн превысили 0,98, что свидетельствует о наличии монотонной статистической зависимости между мгновенным и запаздывающим энерговыделением. Методом наименьших квадратов в логарифмическом масштабе определены параметры степенной зависимости запаздывающего энерговыделения от мгновенного энерговыделения для восьми типов колонн; коэффициент детерминации $R^2 > 0,97$ подтверждает адекватность моделей. При этом подчеркивается, что установленная корреляционная связь не является доказательством причинно-следственной связи между мгновенным и запаздывающим энерговыделением, а отражает влияние нейтронного поля на формирование обоих компонентов энерговыделения. В отличие от традиционного подхода, предполагающего прямой расчет запаздывающей компоненты, предложенный подход позволяет оценивать запаздывающее энерговыделение по значениям мгновенного энерговыделения с использованием полученных степенных зависимостей. Полученные результаты могут быть использованы для ускорения нейтронно-физических расчетов при многовариантном анализе экспериментальных конфигураций, а также при разработке сопряженных методик моделирования для реакторных исследований.

Ключевые слова: нейтронно-физическая модель, корреляционная связь, MCNP, активная зона ИГР, энерговыделение, мгновенные, запаздывающие компонента, коэффициент Спирмена.

ВВЕДЕНИЕ

Точная оценка распределения энерговыделения в активной зоне реактора ИГР является ключевым элементом анализа его нейтронно-физических и тепло-гидравлических характеристик, а также расчетной оценки безопасности при проведении экспериментов. Ранее для реактора ИГР был предложен метод расчета энерговыделения в материалах облучательного устройства с учетом запаздывающей компоненты [1], который в настоящее время используется при расчетном сопровождении испытаний экспериментальных устройств на реакторе ИГР.

Детализированная нейтронно-физическая модель реактора, реализованная в коде MCNP [4], обеспечивает воспроизведение пространственно-энергетического распределения энерговыделения с высоким уровнем достоверности. При стандартных настройках расчета в MCNP учитывается лишь мгновенная составляющая энерговыделения. Расчет запаздывающей компоненты в экспортируемой версии MCNP выполняется на одном процессорном ядре, что приводит к существенному увеличению времени счета. Снижение числа частиц для сокращения времени расчета,

в свою очередь, повышает статистическую погрешность и снижает достоверность результатов. При этом систематический анализ взаимосвязи между мгновенной и запаздывающей компонентами энерговыделения для реактора ИГР ранее не выполнялся.

В настоящей работе исследование корреляционных связей между мгновенной и запаздывающей компонентами энерговыделения выполнено для холодного состояния реактора ИГР – состояния нулевой мощности при комнатной температуре всех элементов активной зоны (топливо, графитовые блоки отражателя). Для холодного состояния нейтронно-физическая модель определена наиболее точно, поскольку ее параметры не осложнены эффектами теплового расширения конструкции и доплеровского уширения сечений. По результатам серии нейтронно-физических расчетов получены данные о пространственном распределении мгновенного и запаздывающего энерговыделения в активной зоне и отражателе с детализацией по колоннам и блокам, оснащенным экспериментальным устройством.

Для количественной оценки связи между компонентами выбран ранговый коэффициент корреляции

Спирмена. Такой выбор обусловлен особенностями анализируемых данных: широким диапазоном значений (порядка шести десятичных порядков), возможным отклонением распределения от нормального, а также нечувствительностью рангового коэффициента к форме зависимости и его устойчивостью к статистическим выбросам, характерным для расчетов методом Монте-Карло. Для дополнительной оценки соответствия полученной зависимости расчетным данным использован метод наименьших квадратов в логарифмическом масштабе.

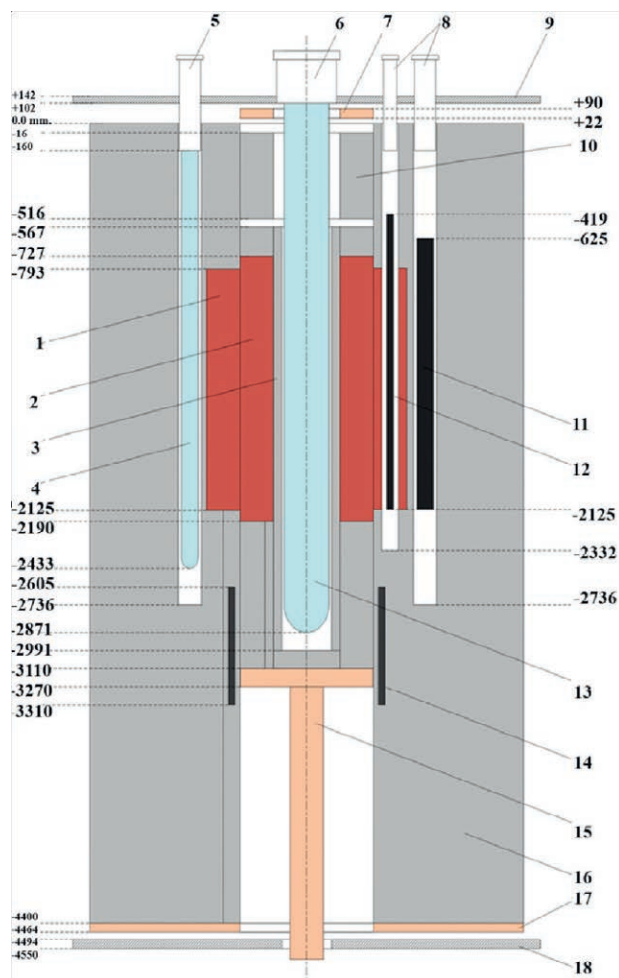
Установление степени корреляции позволяет количественно оценить взаимосвязь между мгновенной и запаздывающей компонентами и на основе полученных степенных зависимостей может быть разработан подход к оценке запаздывающего энерговыделения по значениям мгновенного энерговыделения без выполнения ресурсоемких прямых расчетов.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Реактор ИГР – импульсный исследовательский ядерный реактор на тепловых нейтронах с гомогенной уран-графитовой активной зоной, являющийся самогасящимся по принципу ограничения импульса мощности. Конструктивно реактор представляет собой кладку из графитовых блоков, собранных в колонны высотой 4400 мм и размещенных в герметичном стальном цилиндрическом кожухе диаметром 3100 мм с гелиевой средой. Между кладкой и корпусом реактора установлены цилиндрические тепловые экраны, а сам корпус расположен в баке с охлаждающей водой [3].

Активная зона реактора имеет форму, близкую к кубической, с размерами 1400×1400 мм и объемом 1,89 м³. Она сформирована из 168 графитовых колонн, из которых 147 пропитаны раствором уранилдинитрата (азотнокислого уранила) и выполняют роль топливных элементов, а 21 колонна, не содержащая урана, служит замедлителем. Общее количество пропитанных (топливных) блоков составляет 1440, из них 1004 блока – в неподвижной части кладки и 436 – в подвижной части. В конструкции реактора предусмотрены центральный и боковые экспериментальные каналы; управление и защита осуществляются 16 графитовыми стержнями регулирования с поглотителем из окиси гадолиния, схема реактора приведена на рисунке 1.

Концентрация урана в пропитанных блоках распределена неравномерно: на границе активной зоны с отражателем установлены блоки с наименьшим содержанием топлива, что снижает термические напряжения, возникающие из-за перепада энерговыделения между центром и периферией активной зоны. Кроме того, в нижней части колонн размещены непропитанные (не содержащие урана) блоки, выполняющие функции отражателя нейтронов и тепловой изоляции



1 – активная зона (неподвижная часть кладки); 2 – активная зона (подвижная часть кладки); 3 – крестообразная втулка; 4 – неподвижная ампула НА-82; 5 – стояк бокового экспериментального канала (БЭК); 6 – стояк центрального экспериментального канала (ЦЭК); 7 – тепловой экран верхний; 8 – стояк стержня регулирования; 9 – плита верхняя; 10 – отражатель подвесной; 11 – стержень регулирования (УС); 12 – стержень регулирования (КС, ПС, АР, РР); 13 – неподвижная ампула НА-228; 14 – «борная отсечка»; 15 – колонна с водоохлаждаемой плитой («столик»); 16 – отражатель боковой; 17 – тепловой экран нижний; 18 – плита нижняя

Рисунок 1. Принципиальная схема реактора ИГР и высотные размеры основных элементов его конструкции

между активной зоной и опорными металлоконструкциями. В результате различные участки кладки – центральные топливные блоки, приграничные блоки с пониженным содержанием урана и непропитанные блоки нижней части колонн – находятся в существенно различных нейтронно-физических условиях, характеризующихся различиями в спектре нейтронов и плотности делений. Именно это структурное разнообразие обусловило необходимость проведения корреляционного анализа не для одной произвольной

колонны, а для представительной выборки колонн, расположенных в различных функциональных зонах реактора, типовые конфигурации которых показаны на рисунке 2.

Корреляционный анализ проведен для референтных колонн №4, №5, №20, №22, №27, №28, №31 и №41.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Нейтронно-физическое моделирование

Для проведения нейтронно-физических расчетов активной зоны реактора ИГР использован программный код MCNP6.1, основанный на методе Монте-

Карло [4], с библиотекой оцененных ядерных данных ENDF/B-VII.1 [5]. При проведении расчетов использовалась модель реактора ИГР [2], детально описывающая реальную конструкцию и учитывающая неравномерность распределения концентрации урана в объеме активной зоны.

Графитовая кладка активной зоны моделируется с использованием 31 типа блоков. Геометрия каждого блока задана прямоугольным параллелепипедом. Материальный состав ячеек включает графит марок ГМЗ или 11-03 с учетом технологических примесей – меди, железа и изотопов бора ^{10}B и ^{11}B . Для графита, пропитанного ураном, дополнительно учитываются мар-

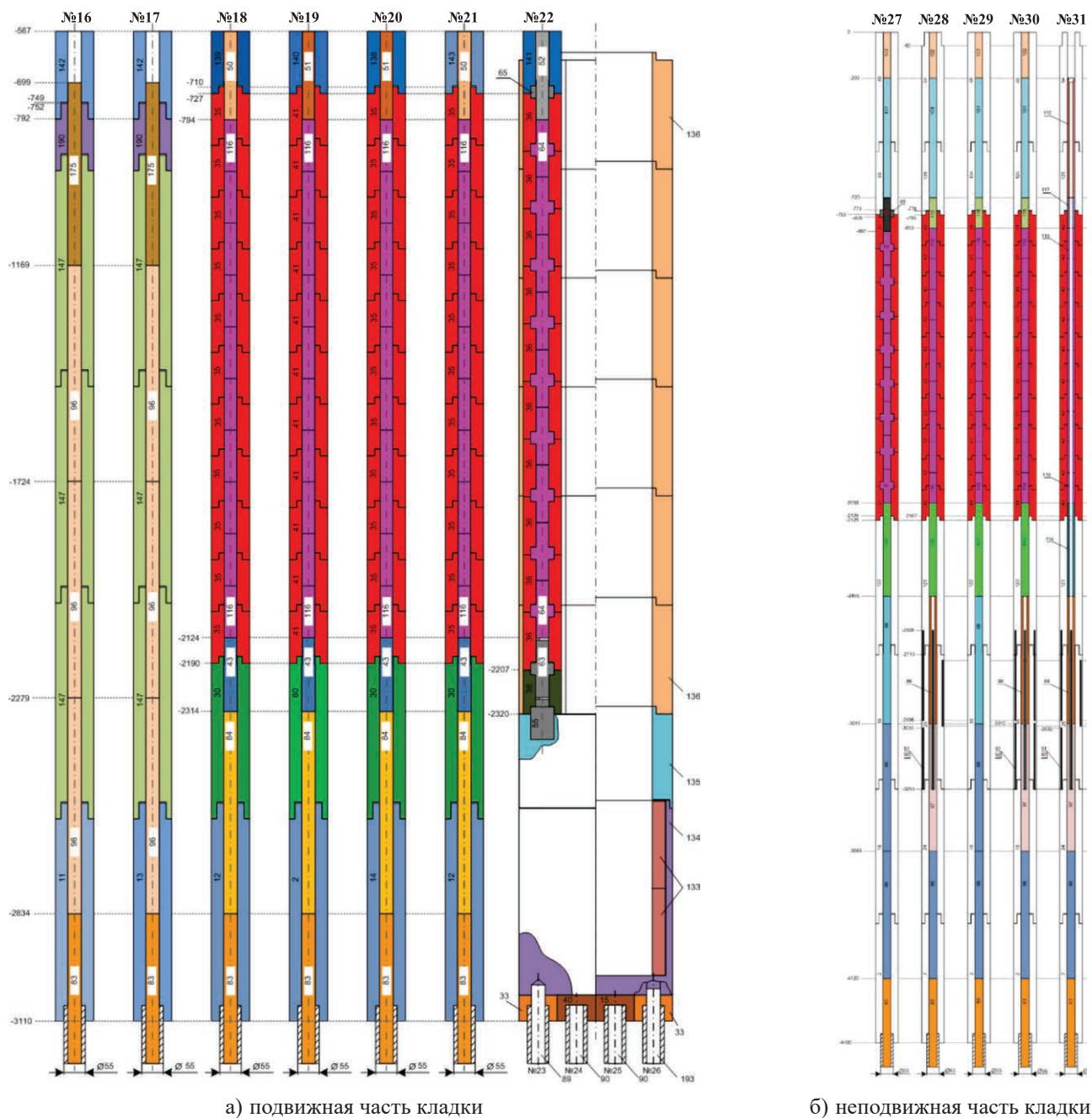
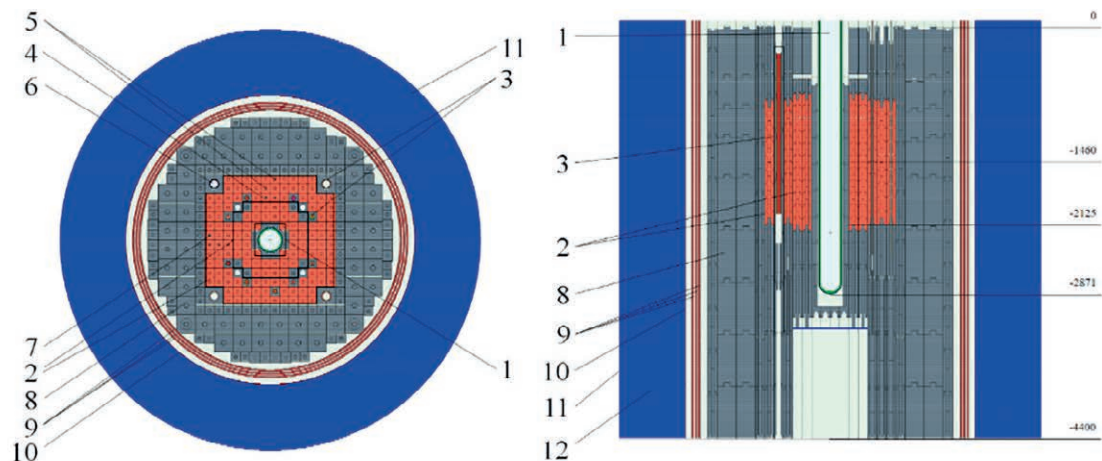


Рисунок 2. Типовые колонны активной зоны реактора ИГР



1 – центральный экспериментальный канал (ЦЭК); 2 – активная зона (подвижная и неподвижная части графитовой кладки); 3 – каналы управляющих стержней; 4 – канал физических измерений; 5 – канал термпары; 6 – боковой экспериментальный канал (БЭК); 7 – канал источника нейтронов; 8 – отражатель; 9 – боковая защита (трехслойная оболочка); 10 – кожух реактора; 11 – водяной бак; 12 – полость охлаждающей воды; 13 – ионизационные камеры (ИК); 14 – канал счетчика нейтронов; 15 – биологическая защита; 16 – верхняя защита

Рисунок 3. Вертикальное и горизонтальное сечения расчетной модели реактора ИГР

ганец, хром и никель. Для топливных блоков в состав материала также входит урановая компонента – уран, введенный в графит методом пропитки раствором уранилдинитрата, с учетом накопленных продуктов деления. Плотность пропитанного графита составляет $1,71 \text{ г/см}^3$, непропитанного – $1,65 \text{ г/см}^3$. Размеры основных топливных блоков составляют $97,6 \times 97,6 \times 133 \text{ мм}$. Блоки бокового, нижнего, верхнего и подвешенного отражателей выполнены из непропитанного графита и также моделируются в виде прямоугольных параллелепипедов, но имеют другие геометрические размеры.

При построении геометрической модели учитывались конструктивные особенности графитовой кладки, включая вертикальные зазоры между колоннами величиной 2 мм и зазор 5 мм между неподвижной и подвижной частями кладки; горизонтальные зазоры между блоками внутри колонн отсутствовали. Расчетная модель также учитывала переменную концентрацию урана по топливным блокам, центральный и боковой экспериментальные каналы, элементы системы регулирования, отражатель и тепловые экраны. На рисунке 3 приведено вертикальное сечение модели реактора ИГР, используемой для расчетного сопровождения экспериментов

Расчеты мгновенной и запаздывающей составляющих энерговыделения выполнены методом Монте-Карло с контролем относительной статистической погрешности. В каждом расчете использовалось 1 000 000 историй на цикл; первые 20 циклов исключались из накопления статистики, после чего результаты 200 циклов использовались для формирования итоговых расчетных величин, что соответствует

200 млн учитываемых историй. По данным MCNP медианная относительная статистическая погрешность для мгновенной составляющей составила 0,44 %, а для запаздывающей – 0,82 %. Для 90 % расчетных значений погрешность не превышала 4,3 % для мгновенной и 10,0 % для запаздывающей составляющей. Более высокие значения относительной погрешности наблюдались преимущественно для областей с низким уровнем энерговыделения.

Корреляционный анализ методом Спирмена

Для количественной оценки связи между мгновенной и запаздывающей компонентами энерговыделения применен коэффициент ранговой корреляции Спирмена r . Использование классического коэффициента корреляции Пирсона в данном случае нецелесообразно по нескольким причинам.

- широкий динамический диапазон значений мгновенной и запаздывающей компонент, охватывающий до шести порядков (от $6,6 \cdot 10^{-8}$ до $7,3 \cdot 10^{-2}$), при котором параметрические методы становятся чрезмерно чувствительными к максимальным значениям и фактически игнорируют закономерности в областях с низким энерговыделением;

- нелинейный, степенной характер зависимости между компонентами, для выявления которого ранговый коэффициент подходит существенно лучше линейного коэффициента корреляции;

- устойчивость к стохастическому шуму, присущему результатам расчетов методом Монте-Карло, поскольку использование рангов минимизирует влияние локальных статистических выбросов в отдельных блоках.

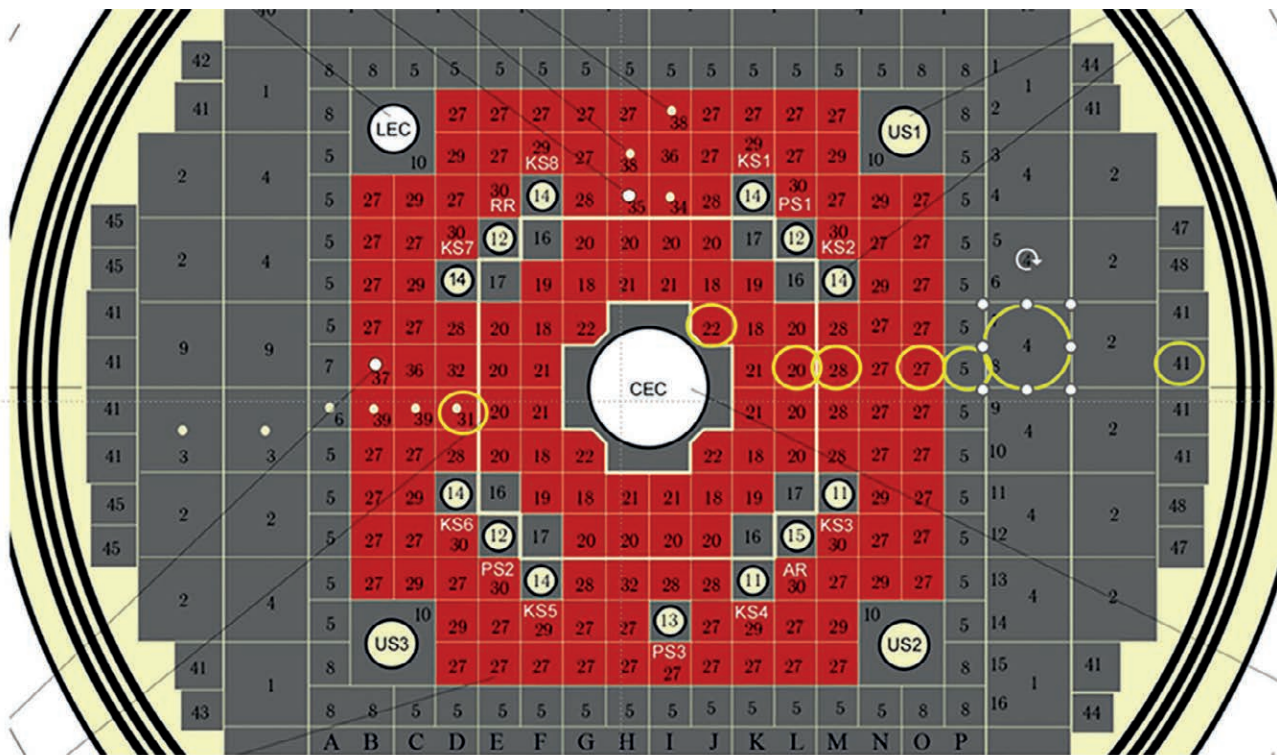


Рисунок 4. Выборочные колонны активной зоны (тип 27, 28, 20, 22, 31), отражателя (тип 41, 4, 5)

Для обеспечения достоверности анализа из 168 колонн активной зоны отобраны, как это было сказано выше, 8 референтных колонн (рисунок 4), представляющих различные функциональные зоны реактора: центральные топливные блоки с максимальными потоками нейтронов, блоки в области подвижных элементов системы управления и защиты, а также отражательные колонны на границе активной зоны.

Такой подход позволяет проверить устойчивость корреляционной связи в различных физических условиях, отличающихся спектром нейтронов и плотностью делений.

Расчет коэффициента ранговой корреляции выполнялся по классическому алгоритму [6]. Исходные значения мгновенной x и запаздывающей y компоненты заменяются их рангами R_{x_i} и R_{y_i} , для каждой пары значений вычисляется разность рангов $d_i = R_{x_i} - R_{y_i}$, после чего коэффициент Спирмена определяется по формуле:

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)}$$

где d_i – разность рангов мгновенной и запаздывающей компонент для i -го блока; n – число наблюдений (блоков) в колонне.

Результаты расчета коэффициента Спирмена для выбранных колонн представлены в таблице 1.

Таблица 1. Значения коэффициента корреляции Спирмена по типам колонн

Тип колонны	Расположение блока	ρ (Спирмен)
Тип 41	Графитовый блок бокового отражателя	1,0000
Тип 4	Графитовый блок бокового отражателя	0,9880
Тип 5	Графитовый блок бокового отражателя	0,9983
Тип 27	Топливный блок НЧК	0,9993
Тип 28	Топливный блок НЧК	0,9979
Тип 20	Топливный блок ПЧК	0,9989
Тип 22	Топливный блок ПЧК	0,9982
Тип 31	Топливный блок НЧК	0,9978

Высокие значения коэффициента ($\rho \approx 1$) подтверждают, что пространственное распределение запаздывающей компоненты хорошо детерминировано полем мгновенных нейтронов, что обосновывает возможность перехода от прямого расчета запаздывающей компоненты к использованию аналитических моделей. Для центральных топливных колонн наблюдается практически идеальная корреляция, тогда как в периферийных областях отражателя значение коэффициента несколько снижается, что может быть связано с изменением спектра нейтронов и увеличением вклада рассеяния.

Физически такая корреляция объясняется тем, что обе компоненты энерговыделения являются

следствием одного и того же поля плотности делений: мгновенная составляющая непосредственно пропорциональна локальной скорости деления, тогда как запаздывающая связана с распадом предшественников запаздывающих нейтронов и продуктов деления, образующихся в тех же актах деления. Таким образом, высокая степень корреляции обусловлена общей нейтронно-физической природой формирования мгновенной и запаздывающей компонент энерговыделения.

Аппроксимация зависимости между компонентами энерговыделения

На основании установленной корреляционной связи между мгновенной (x) и запаздывающей (y) компонентами энерговыделения построена функциональная зависимость в виде степенной функции:

$$y = k \cdot x^a$$

Выбор данной формы обусловлен физической природой процессов энерговыделения, а также монотонным характером связи между рассматриваемыми величинами, установленным по результатам корреляционного анализа [7, 8]. Для определения параметров a и k выполнен переход к логарифмическим переменным:

$$u = \log_{10}(x), v = \log_{10}(y)$$

Исходная нелинейная зависимость приводится к линейному виду:

$$v = a \cdot u + b, \text{ где } b = \log_{10}(k)$$

Параметры a и b определены методом наименьших квадратов. Для выборки из 20 блоков колонны тип 41 получены средние значения $\bar{u} = -4,4875$, $\bar{v} = -4,4704$, коэффициент регрессии $a = 1,00934$ и свободный член $b = 0,05910$, откуда масштабный коэффициент $k = 10^b = 1,1458$. Итоговая аппроксимирующая зависимость для данной колонны имеет вид:

$$y = 1,1458 \cdot x^{1,00934}$$

Полученное значение показателя степени, близкое к единице, указывает на практически линейную зависимость между компонентами энерговыделения для данной колонны. В таблице 2 представлены параме-

тры регрессионной зависимости для всех исследованных типов колонн.

Анализ данных показывает, что значения коэффициентов a и k существенно различаются в зависимости от типа колонны. Для колонн типов 41 и 5 показатель степени близок к единице, что соответствует практически линейной зависимости. Для колонн типов 4 и 27 наблюдается умеренное отклонение от линейности. Для колонн типов 20, 22, 28 и 31 значение показателя степени значительно меньше единицы, что свидетельствует о выраженной нелинейности зависимости. Коэффициент k уменьшается при переходе от центральных областей к периферийным, что отражает снижение относительного вклада запаздывающей компоненты энерговыделения.

Для оценки точности полученных зависимостей выполнена проверка на отдельных блоках. Для блока типа 41 (10108) при мгновенном значении $x = 1,713 \cdot 10^{-4}$ расчетное значение запаздывающей компоненты составило $y = 1,81 \cdot 10^{-4}$ при фактическом $y = 1,784 \cdot 10^{-4}$ (относительная погрешность около 1,5%). Для блока 10115 при $x = 5,7377 \cdot 10^{-5}$ расчетное значение $y = 6,00 \cdot 10^{-5}$ при фактическом $y = 6,17 \cdot 10^{-5}$ (погрешность около -2,7 %). Коэффициент детерминации R^2 для всех исследованных колонн превысил 0,97, что свидетельствует о высокой адекватности степенной модели.

Дополнительный анализ показал, что использование единой зависимости для всех колонн реактора приводит к снижению точности, поскольку параметры a и k существенно зависят от пространственного расположения колонны. В связи с этим все колонны разделены на две группы:

– активная зона – усредненные параметры: $a \approx 0,46$, $k \approx 0,18$. Зависимость: $y = 0,18 \cdot x^{0,46}$.

– отражатель – усредненные параметры: $a \approx 1,01$, $k \approx 1,76$. Зависимость: $y = 1,76 \cdot x^{1,01}$.

Различие параметров аппроксимации объясняется физическими особенностями зон реактора. В активной зоне наблюдается выраженная нелинейность, связанная с изменением спектра нейтронов и плотности делений. В отражателе зависимость близка к линей-

Таблица 2. Параметры регрессионной зависимости между мгновенными и запаздывающими компонентами для различных колонн

Тип колонны	Расположение блока	количество блоков в колонне	a	b	k
Тип 41	Графитовый блок бокового отражателя	20	1,0093	0,0591	1,1458
Тип 4	Графитовый блок бокового отражателя	20	0,9053	-0,2520	0,5592
Тип 5	Графитовый блок бокового отражателя	19	1,1053	0,5530	3,5683
Тип 27	Топливный блок НЧК	32	0,9180	-0,1810	0,6586
Тип 28	Топливный блок НЧК	36	0,4803	-1,4840	0,0328
Тип 20	Топливный блок ПЧК	28	0,1791	-1,8210	0,0151
Тип 22	Топливный блок ПЧК	30	0,2621	-1,7990	0,0159
Тип 31	Топливный блок НЧК	35	0,4599	-1,5390	0,0289

ной вследствие преобладания процессов рассеяния, что обуславливает иной характер соотношения между мгновенной и запаздывающей компонентами энерговыделения.

Возможное физическое объяснение состоит в том, что в отражателе, где собственное деление практически отсутствует, обе компоненты энерговыделения формируются переносом излучения из активной зоны и убывают с расстоянием сходным образом, что и дает близкое к линейному соотношение ($a \approx 1$). В топливных же колоннах локальная скорость деления меняется в широких пределах, а вклад запаздывающей компоненты дополнительно зависит от локального накопления и распада предшественников запаздывающих нейтронов, из-за чего связь между компонентами оказывается существенно нелинейной ($a \approx 0,46$). Это согласуется с конструкцией реактора: колонны типа 41 расположены в структуре бокового отражателя (колонны №1--9 и №40--49), физически обособленной от топливной решетки активной зоны и набранной целиком из непропитанных ураном графитовых блоков, тогда как колонны типов 27, 28, 20, 22, 31 входят непосредственно в топливную решетку. Данное объяснение носит предварительный характер и нуждается в дальнейшей проверке путем анализа вкладов отдельных групп предшественников.

Выводы

Проведенное исследование для холодного состояния реактора ИГР показало наличие устойчивой и воспроизводимой монотонной связи между мгновенной и запаздывающей компонентами энерговыделения, которая в первом приближении хорошо описывается степенной функцией. Коэффициент ранговой корреляции Спирмена для всех исследованных колонн превысил 0,98, а коэффициент детерминации степенной аппроксимации – 0,97, что подтверждает высокую адекватность предложенной модели.

При этом выявлено, что параметры аппроксимационной модели закономерно изменяются в зависимости от пространственного положения колонн, что отражает различия нейтронно-физических условий в активной зоне и отражателе. В центральной области активной зоны наблюдается практически линейный характер связи между компонентами, тогда как по

мере перехода к периферийным областям и отражателю возрастает степень нелинейности зависимости, что связано с изменением спектрального состава и вкладом процессов рассеяния.

Полученные результаты подтверждают наличие устойчивых корреляционных связей между компонентами энерговыделения в холодном состоянии реактора ИГР и позволяют использовать мгновенную компоненту в качестве основы для реконструкции запаздывающей составляющей с приемлемой точностью. Такой подход позволяет упростить расчет запаздывающей компоненты и снизить вычислительные затраты за счет ее определения по результатам расчета мгновенной компоненты, без необходимости выполнения отдельного прямого расчета запаздывающего энерговыделения.

В целом предложенный подход может быть использован как элемент упрощенной оценки энерговыделения при нейтронно-физическом моделировании реактора ИГР, а также при проведении многовариантных расчетов и анализе экспериментальных конфигураций.

Исследование выполнено для холодного состояния реактора ИГР. Установленная корреляционная связь обусловлена пространственной топологией поля плотности делений, которая определяется прежде всего конструкцией активной зоны и распределением урана в ней. Переход к горячему (мощностному) состоянию изменяет сечения взаимодействия за счет доплеровского уширения, что может количественно сместить значения коэффициентов a и k , однако не меняет физического механизма формирования связи между мгновенной и запаздывающей компонентами. Соответственно, повторение анализа для горячего состояния целесообразно для уточнения численных коэффициентов аппроксимации, но не ожидается, что оно выявит качественно иной характер зависимости, и полученные для холодного состояния выводы можно считать физически устойчивыми к изменению теплового состояния реактора.

Работа выполнена в рамках проекта грантового финансирования АР23490508 «Разработка концептуального проекта большого импульсного исследовательского реактора на тепловых нейтронах».

ЛИТЕРАТУРА:

1. Жанболатов О.М., Иркимбеков Р.А. Особенности расчета мощности элементов экспериментального устройства для реакторных испытаний на игр. *Вестник НЯЦ РК*. 2020;(2):55-60. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2020-2-55-60>
2. Ruslan A. Irkimbekov, Vladimir A. Vityuk, Galina A. Vityuk, Olzhas M. Zhanbolatov, Artur S. Surayev, Yuri A. Popov, Andrey N. Kotlyar Development of a new computational support tool for experiments in the impulse graphite reactor // *Nuclear Engineering and Design* 2025, 443, 114278, 10.1016/j.nucengdes.2025.114278.
3. Vurim A.D., et al. The IGR reactor research capabilities // *Annals of Nuclear Energy*. – 2018. – Vol. 113. – P. 126–132.
4. MCNP-6.1 Monte-Carlo N-Particle Transport Code: Los Alamos National Laboratory.
5. Chadwick M.B. et al. ENDF/B-VII.1 Nuclear Data for Science and Technology: Cross Sections, Covariances, Fission Product Yields and Decay Data. Nuclear Data Sheets. 2011. Vol. 112, No. 12. P. 2887–2996. DOI:10.1016/j.nds.2011.11.002.
6. Спирмен Ч. Доказательство и измерение связи между двумя вещами // *Американский журнал психологии*. – 1904. – Т. 15, № 1. – С. 72–101. DOI: 10.2307/1412159.
7. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. – М.: Вильямс, 2016. – 912 с.
8. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. – М.: Физматлит, 2006. – 816 с.

REFERENCES:

1. Zhanbolatov O.M., Irkimbekov R.A. Features of Power Calculation of Experimental Device Elements for Reactor Tests at the IGR Reactor. *Bulletin of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan*. 2020;(2):55–60. DOI: 10.52676/1729-7885-2020-2-55-60.
2. Irkimbekov R.A., Vityuk V.A., Vityuk G.A., Zhanbolatov O.M., Surayev A.S., Popov Yu.A., Kotlyar A.N. Development of a New Computational Support Tool for Experiments in the Impulse Graphite Reactor. *Nuclear Engineering and Design*. 2025. Vol. 443. Article 114278. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2025.114278.
3. Vurim A.D., et al. The IGR Reactor Research Capabilities. *Annals of Nuclear Energy*. 2018. Vol. 113. P. 126–132.
4. *MCNP6.1 Monte Carlo N-Particle Transport Code*. Los Alamos National Laboratory.
5. Chadwick M.B., et al. ENDF/B-VII.1 Nuclear Data for Science and Technology: Cross Sections, Covariances, Fission Product Yields and Decay Data. Nuclear Data Sheets. 2011. Vol. 112, No. 12. P. 2887–2996. DOI: 10.1016/j.nds.2011.11.002.
6. Spearman C. The Proof and Measurement of Association between Two Things. *The American Journal of Psychology*. 1904. Vol. 15, No. 1. P. 72–101. DOI: 10.2307/1412159.
7. Draper N.R., Smith H. *Applied Regression Analysis*. 3rd ed. New York: Wiley, 1998.
8. Kobzar A.I. *Applied Mathematical Statistics*. Moscow: Fizmatlit, 2006. 816 p.

**A STUDY OF THE CORRELATIONS AMONG THE COMPONENTS
OF ENERGY RELEASE IN AN IGR REACTOR**

D. T. Zhengis*, O. M. Zhanbolatov, N. Ye. Mukhamedov, R. A. Irkimbekov, G. A. Vityuk

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

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

The paper presents the results of a study on the relationship between the prompt and delayed components of energy release in the core of the pulsed research reactor IGR at the cold state. Using the MCNP6 code, a series of high-precision prompt and delayed energy release calculations was performed, yielding detailed data on the spatial distribution of energy release over all columns and blocks of the core and reflector. The Spearman rank correlation coefficient, applied to quantify the relationship, exceeded 0.98 for all analyzed columns, indicating a monotonic statistical relationship between the components. Parameters of a power-law approximation were determined by the least-squares method in logarithmic coordinates for eight column types, with a coefficient of determination R^2 above 0.97 confirming the adequacy of the models. It is emphasized that the established correlation does not prove a cause-and-effect relationship, but reflects the joint influence of a single neutron field on the formation of both energy release components. Unlike the conventional approach requiring direct calculation of the delayed component, the developed reconstructive approach allows the delayed energy release to be estimated from the prompt component using the proposed approximating dependences. The results can be used to speed up neutronic calculations in multi-variant analysis of experimental configurations and in the development of coupled simulation methodologies for reactor studies.

Keywords: *neutronic modeling, correlation, MCNP, IGR reactor core, energy release, instantaneous and delayed components, Spearman's correlation coefficient.*

ИГР РЕАКТОРЫНДАҒЫ ЭНЕРГИЯ БӨЛІНУІНІҢ ҚҰРАУШЫ КОМПОНЕНТТЕРІ АРАСЫНДАҒЫ
КОРРЕЛЯЦИЯЛЫҚ БАЙЛАНЫСТАРДЫ ЗЕРТТЕУ

Д. Т. Жеңіс*, О. М. Жанболатов, Н. Е. Мухамедов, Р. А. Иркимбеков, Г. А. Витюк

ҚР ҰЯО «Атом энергиясы институты» филиалы, Қурчатов, Қазақстан

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

Мақалада ИГР импульстік зерттеу реакторының активті аймағындағы энергия бөлінудің лездік және кешігетін құрамдастары арасындағы байланысты зерттеу нәтижелері келтірілген. MCNP6 бағдарламалық кодын пайдаланып, лездік және кешігетін энергия бөлінудің жоғары статистикалық дәлдіктегі есептеулер сериясы орындалды. Активті аймақ пен рефлектордың барлық колонналары мен блоктары бойынша энергия бөлінудің кеңістіктік таралуы туралы егжей-тегжей деректер алынды. Құрамдастар арасындағы байланысты сандық бағалау үшін Спирменнің рангілік корреляция коэффициенті қолданылды. Оның мәні зерттелген барлық колонналар үшін 0,98-ден асып, құрамдастар арасында монотонды статистикалық байланыстың бар екенін көрсетті. Логарифмдік масштабта ең кіші квадраттар әдісімен сегіз колонна типі үшін дәрежелік аппроксимациялық тәуелділіктің параметрлері анықталды; детерминация коэффициенті R^2 0,97-ден жоғары болуы модельдердің дұрыстығын растайды. Анықталған корреляциялық байланыс себеп-салдарлық тәуелділіктің дәлелі емес, ол екі құрамдастың да қалыптасуына ортақ нейтрондық өрістің бірлескен әсерін көрсететіні атап өтіледі. Кешігетін құрамдасты тікелей есептеуді талап ететін дәстүрлі тәсілден айырмашылығы, әзірленген реконструктивті тәсіл ұсынылған аппроксимациялық тәуелділіктерді пайдалана отырып, кешігетін энергия бөлінуді лездік құрамдас бойынша бағалауға мүмкіндік береді. Алынған нәтижелер эксперименттік конфигурацияларды көпнұсқалы талдау кезінде нейтрондық-физикалық есептеулерді жеделдету үшін, сондай-ақ реакторлық зерттеулерге арналған байланыстырылған модельдеу әдістемелерін әзірлеу үшін қолданылуы мүмкін.

Түйін сөздер: нейтрондық-физикалық модельдеу, корреляциялық байланыс, MCNP, ИГР реакторының активті аймағы, энергия бөліну, лездік құрамдас, кешігетін құрамдас, Спирмен коэффициенті.