

УДК 621.039.548:539.166

Р.Л. Гонтарь, магистр,
О.В. Маслов, д-р. техн. наук, доц.,
В.О. Давыдов, канд. техн. наук,
Одес. нац. политехн. ун-т

ВЛИЯНИЕ УГЛА ОБЛУЧЕНИЯ КОЛЛИМАТОРА ДЕТЕКТОРА НА КАЧЕСТВО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ТВЭЛОВ ТВС

Р.Л. Гонтарь, О.В. Маслов, В.О. Давыдов. Вплив кута опромінювання коліматора детектора на якість відновлювання інтенсивності гамма-випромінювання твєлів ТВЗ. Розглядається модернізований алгоритм відновлення томограми ТВЗ при різних кутах опромінювання коліматора детектора власним гамма-випромінюванням твєлів збірки. Виявлено основні чинники, що впливають на якість відновлення ТВЗ.

Р.Л. Гонтарь, О.В. Маслов, В.О. Давыдов. Влияние угла облучения коллиматора детектора на качество восстановления интенсивности гамма-излучения твэлов ТВС. Рассматривается модернизированный алгоритм восстановления томограммы ТВС при различных углах облучения коллиматора детектора собственным гамма-излучением твелов сборки. Выявлены основные факторы, влияющие на качество восстановления ТВС.

R.L. Gontar, O.V. Maslov, V.O. Davydov. Influence of fud angle of detector collimator on the quality of gamma-radiation intensity restoration in fuel assembly elements. The upgraded algorithm for reconstructing WFA tomograms at various angles of irradiating the detector collimator with the fuel assembly elements' own gamma-radiation in considered. The principal factors affecting the quality of WFA restoration are revealed.

Задача восстановления томограммы тепловыделяющей сборки (ТВС) является актуальной, т.к. позволяет получить достоверную информацию о распределении ядерного топлива и его продуктов деления в каждом из твэлов в осевом направлении после выгорания в ядерном реакторе.

ТВС ВВЭР-1000 представляет собой сложную пространственную теплообменную систему кассетного типа. Кассета содержит 331 стержень, из которых 18 используются как направляющие для перемещения подвижных поглощающих стержней, один — для размещения детекторов энерговыделения, а остальные 312 — твэлы. Твэл представляет собой трубку из циркониевого сплава наружным диаметром 9,1 мм и толщиной стенки 0,65 мм и длиной 3842 мм. Внутри трубки размещены таблетки диоксида урана UO_2 с обогащением ^{235}U 1,6...4,4%. Твэлы дистанционируются внутри ТВС в виде правильной треугольной решетки с периодом 12,75 мм.

В качестве примера показано взаимное размещение твэлов ТВС реактора ВВЭР-1000, Д — точка установки детектора. Расстояние от центра ТВС (стержень №166) до точки Д образует радиус окружности по которой перемещается детектор (рис. 1).

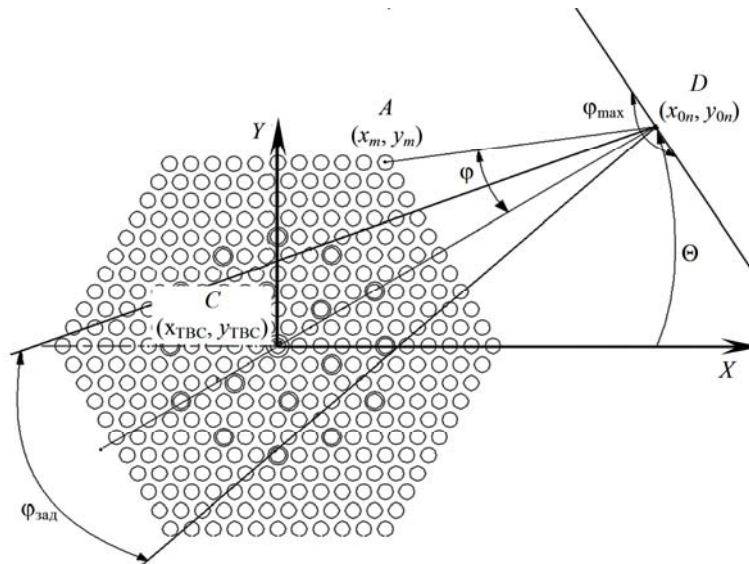


Рис. 1. Картограмма ТВС

Проведено исследование по восстановлению томограммы, при этом рассматривалась задача моделирования интенсивности гамма-излучения от твэлов ТВС в точке расположения детектора [1]. Обосновано проведение 360 измерений, соответствующих положениям детектора по угловой координате Θ , равномерно распределенных вокруг ТВС с шагом $\Delta\Theta$ [1].

Максимальный угол облучения коллиматора φ_{\max} детектора составил 180° . Для проводимых исследований количество положений детектора строго дискретно и составляет 360 и 720 точек измерений.

Целью данной работы является исследование зависимости качества восстановления томограммы ТВС от величины угла облучения твэлами ТВС коллиматора детектора. Этот угол может изменяться в пределах от 0 до 180° . Качество восстановления ТВС будет зависеть от количества твэлов, которое попадает в угол облучения коллиматора детектора (см. рисунок 1).

Для этого необходимо провести моделирование интенсивности гамма-излучения от каждого из твэлов ТВС в точку расположения детектора при разных углах облучения коллиматора детектора. В зависимости от рассматриваемого угла облучения коллиматора детектора количество твэлов, расположенных в рассматриваемом угле, будет различно, что и определит качество восстановления.

Решение рассматриваемой задачи основано на усовершенствовании алгоритма [1]. Введем прямоугольную систему координат XOY с центром в центре ТВС, где ось OX совпадает с диагональю ТВС, и проведем индексацию всех твэлов и стержневых отверстий. Создадим матрицу размером 331×360 , куда будем помещать значения коэффициентов ослабления излучения для одного изотопа, от каждого 331 стержня для всех 360 положений коллиматора детектора. В случае увеличения количества точек измерений или количества энергий изотопов продуктов деления будет изменяться размер матрицы. В случае увеличения количества изотопов до двух размер матрицы будет составлять 331×720 . В случае увеличения точек измерений детектора до 720 размер матрицы также будет 331×720 . В случае увеличения количества энергий до двух и точек измерений до 720 размер матрицы составит 331×1440 . Рассмотрены следующие исходные данные:

- координаты каждого из 331 стержня;
- радиальная координата детектора — 22,5 см, определяемая техническими характеристиками оборудования;
- шаг измерений детектора относительно оси ТВС;
- угол облучения коллиматора детектора, определяемый двумя лучами, расположенными под заданным углом $\varphi_{\text{зад}}$.

На первом шаге осуществляется заполнение матрицы расчетными значениями интенсивности гамма-излучения твэлов в точке измерения в зависимости от угла раскрытия коллиматора детектора. Значения интенсивности учитывают ослабление гамма-излучения при прохождении через материал оболочки, топливную таблетку и теплоноситель.

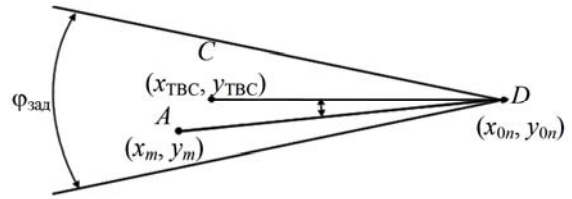


Рис. 2. Геометрия задачи

На втором шаге для каждого n -го положения детектора (x_{0n}, y_{0n}) при измерении текущей суммарной интенсивности гамма-излучения в пределах от 0 до 360° с шагом 1° и каждого m -го твэла с координатой центра (x_{0m}, y_{0m}) , попадающего в область облучения для коллиматора детектора $\varphi_{\text{зад}}$, определяется уравнение прямой AD , проходящей через точку расположения детектора (x_{0n}, y_{0n}) и центр m -го твэла. Кроме того, для каждого n -го положения детектора (x_{0n}, y_{0n}) определяется уравнение прямой CD , проходящей через точку расположения детектора (x_{0n}, y_{0n}) и центр ТВС $(x_{\text{ТВС}}, y_{\text{ТВС}})$.

Уравнение прямой AD имеет вид $A_1x + B_1y + C_1 = 0$, ее коэффициенты определяются как $A_1 = -(y_{0n} - y_m)$; $B_1 = x_{0n} - x_m$; $C_1 = 0$. Уравнение прямой CD имеет вид $A_2x + B_2y + C_2 = 0$, ее коэффициенты определяются как $A_2 = y_{\text{ТВС}} - y_{0n}$; $B_2 = x_{\text{ТВС}} - x_{0n}$; $C_2 = 0$.

На третьем шаге принимаем, что m -й твэл попадает в сектор облучения коллиматора детектора, если угол φ (см. рисунки 1 и 2) между прямыми AD и CD меньше, либо равен углу $\varphi_{\text{зад}}/2$. Значение угла φ определяется как

$$\varphi = \arctg\left(\frac{A_1B_2 - A_2B_1}{A_1A_2 + B_1B_2}\right).$$

На четвертом шаге вводим дополнительный признак i для каждого m -го твэла, с которым пересекается прямая CD . Для каждого i -го твэла с известными координатами (x_i, y_i) , через который проходит гамма-излучение, рассчитываются расстояния от его центра до прямой $A_x + B_y + C = 0$ по нормали d_i (рис. 3). Коэффициенты прямой определяются как $A = y_m - y_z$; $B = x_m - x_z$; $C = 0$. Величина нормали

$$d_i = \frac{Ax_i + By_i + C}{\sqrt{A^2 + B^2}}.$$

На пятом шаге проверяем отобранные группы m -х и i -х твэлов по следующим условиям:

— если координаты центров рассматриваемых двух групп твэлов одновременно попадают в область облучения коллиматора детектора, образованную углом $\varphi_{\text{зад}}$, то активность твэла рассчитывается как [3]

$$A_m = (-5,84 \cdot 10^{-4} x_m^2 + 3,9 \cdot 10^{-3} x_m + 1,14)(-1,2 \cdot 10^{-3} y_m^2 - 6,1 \cdot 10^{-3} y_m + 1,15),$$

иначе активность этих групп твэлов определяем равной нулю;

$$\varphi \leq \varphi_{\text{зад}} / 2;$$

— если координаты центров рассматриваемых двух групп твэлов находятся от коллиматора детектора на расстоянии, не большем, чем излучающий твэл, т.е.

$$\sqrt{(x_i - x_{0n})^2 + (y_i - y_{0n})^2} \leq \sqrt{(x_m - x_{0n})^2 + (y_m - y_{0n})^2},$$

то определяем расстояние, проходимое гамма-излучением в материале оболочки твэла [3], иначе это расстояние равно нулю.

На шестом шаге от каждого m -го твэла, испускающего гамма-излучение, находится длина пробега в материале i -х твэлов, находящихся на пути гамма-излучения (см. рисунок 3).

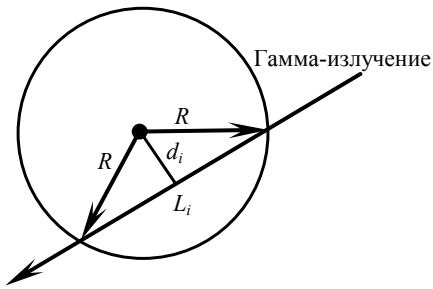


Рис. 3. Геометрия пересечения твэла с пучком гамма-излучения

$$L_i^{об} = 2\sqrt{R^2 - d_i^2}, \quad (1)$$

где R — радиус твэла.

На седьмом шаге для i -х твэлов, найденных по условиям шага 5, определяем длину пробега гамма-излучения через трубки с водой, и исключаем их из излучающих, поэтому задаем активность в каждой из них равной нулю. Далее для всех твэлов находится сумма $L_i^{таб}$, которая представляет собой суммарный пробег гамма-излучения в топливной таблетке UO_2 . Тогда суммарное ослабление гамма-излучения от единичного m -го твэла на пути к коллиматору детектора в топливных таблетках UO_2 составит [1]

$$P_{UO_2}^m = e^{-\mu_{UO_2} \sum_i L_i^{таб}}, \quad (2)$$

а суммарное затухание гамма-излучения в оболочке твэла

$$P_{об}^m = e^{-\mu_{об} \sum_i L_i^{об}}.$$

На восьмом шаге определяем общую длину пробега гамма-излучения от излучающего m -го твэла до коллиматора детектора

$$G = \sqrt{(x_m^2 - x_{0n}^2)^2 + (y_m^2 - y_{0n}^2)^2}. \quad (3)$$

На девятом шаге определяем длину пробега в воде (как внутри ТВС, так и вне ее) как

$$Z = G - \sum_i L_i^{таб}, \quad (4)$$

а суммарное затухание гамма-излучения в воде

$$P_{H_2O}^m = e^{-\mu_{H_2O} \cdot Z}. \quad (5)$$

На десятом шаге определяем величину ослабления гама-излучения от m -го твэла к коллиматору детектора

$$R_{mn} = \sqrt{0,1 \sqrt{(x_m - x_{0n})^2 + (y_m - y_{0n})^2}},$$

$$w_{mn} = \frac{P_{UO_2}^m P_{H_2O}^m P_{об}^m}{4\pi R_{mn}^2}. \quad (6)$$

На одиннадцатом шаге задается моделируемое распределение активности по твэлам A_m (с учетом выгорания) внутри ТВС, $m=1, \dots, 312$, и рассчитывается интенсивность излучения в n -й точке расположения детектора

$$I_n = \sum_m A_m w_{mn}.$$

Путем получения углового распределения интенсивности моделируется перемещение детектора по окружности, для этого организуется цикл по угловой координате детектора с Θ с шагом $\Delta\Theta=1$.

По рассмотренному алгоритму были проведены исследования четырех энергий следующих изотопов: Cs^{134} (1365 кэВ), Cs^{134} (1167 кэВ), Cs^{134} (1038 кэВ), Cs^{134} (802 кэВ). Кроме того, рассматривались 360, 720 и 1080 точек измерения по угловой координате, а изменение $\varphi_{зад}$ от 10 до 180 с шагом 10. Для определения математического ожидания и дисперсии моделировались измеренные показания детектора для каждого варианта в количестве пяти независимых случаев.

В результате проведения математических экспериментов выявлено, что данные, полученные при измерениях для угла облучения коллиматора детектора в диапазоне $0...60^\circ$, приводят к резкому увеличению дисперсии во всех рядах, а значит и к ухудшению качества восстановления томограммы ТВС.

Графическая зависимость количества твэлов, попавших в зону облучения коллиматора детектора, от величины угла облучения коллиматора детектора (рис. 4) свидетельствует о том, что количество твэлов, попавших в “зону” зрения коллиматора детектора в диапазоне $0...60^\circ$, меньше 331, т.е. является недостаточным для качественного восстановления томограммы ТВС, в диапазоне $70...180^\circ$ количество твэлов, попадающих в зону облучения коллиматора детектора, величина постоянная — 331, и является оптимальной для проведения дальнейших исследований.

Таким образом, была получена зависимость качества восстановления ТВС от величины угла облучения твэлами ТВС коллиматора детектора. Этот угол изменялся в пределах от 0 до 180° . Данное исследование выполнялось для разного количества точек измерения детектором, а именно для 360, 720 и 1080.

В результате проведенного исследования установлено, что качество восстановления ТВС зависит от количества твэлов, попадающих в угол облучения коллиматора детектора, а также то, что данный угол должен составлять не менее 70° .

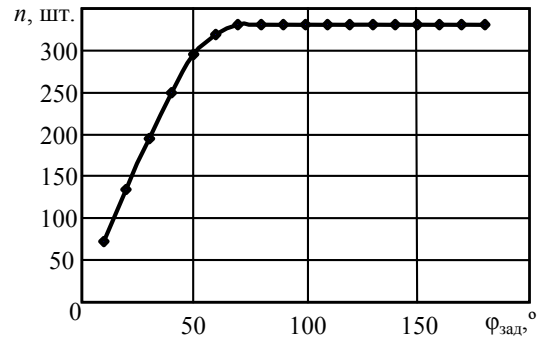


Рис. 4. Зависимость количества твэлов, попадающих в зону облучения коллиматора детектора, от угла облучения коллиматора детектора

Литература

1. Давыдов, В.О. Оценка качества восстановления распределения выгорания по объему ТВС методами пассивной компьютерной томографии / В.О. Давыдов, О.В. Маслов, О.В. Неделин // Ядер. и радиац. безопасность. — 2009. — Вып. 1. — С. 23 — 27.
2. Гнеденко, Б.В. Математические методы в теории надежности / Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев, А.Д. Соловьев. — М.: Наука, 1965. — 524 с.
3. Олейник, С.Г. Пассивная компьютерная томография ядерного топлива / С.Г. Олейник, В.А. Болтенков, О.В. Маслов // Атом. энергия. — 2005. — Т. 98, вып. 3. — С. 227 — 229.

Рецензент д-р. техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Крылов В.Н.

Поступила в редакцию 19 октября 2010 г.