

# ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛУБИНЫ ВЫГОРАНИЯ ОБЛУЧЕННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

**С.Г. Олейник\*, В.А. Болтенков\*\***

**\* ВНИИАЭС**

**\*\* Одесский национальный политехнический университет**



Предложена структурная схема системы для контроля выгорания ОЯТ в реальном масштабе времени. Промоделировано формирование поля интенсивности гамма-излучения от контролируемой ТВС в произвольной точке расположения детектора. Определены зоны ТВС, контролируемые одним гамма-детектором. Материалы статьи могут служить основанием для выбора оптимальной конфигурации гамма-детекторов при решении различных технологических задач, связанных с оценкой глубины выгорания ОЯТ.

## СТРУКТУРА СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛУБИНЫ ВЫГОРАНИЯ

Перевод реакторов ВВЭР-440 на тепловыделяющие сборки (ТВС) с начальным обогащением 4,4% по  $^{235}\text{U}$  (вместо использовавшихся ранее ТВС с начальным обогащением 3,6%) обусловил проблему загрузки облученного ядерного топлива (ОЯТ) в транспортные контейнеры ТК-6 транспортного упаковочного комплекта (ТУК). Транспортировка ОЯТ в ТУК ТК-6 согласно [1] может осуществляться только при условии неперевышения эффективным коэффициентом размножения значения 0,95. В связи с этим возникла необходимость контроля глубины выгорания ОЯТ непосредственно перед загрузкой его в ТУК ТК-6 [2].

Не менее важной задачей, требующей контроля выгорания ОЯТ, является организация сухих хранилищ ОЯТ (СХОЯТ). Согласно требованиям пп.6.2.2 и 6.3.3 [1] необходимо проводить контроль выгорания облученных ТВС непосредственно перед их загрузкой в многоместную герметичную корзину (МГК).

Поскольку в настоящее время на АЭС отсутствуют системы экспрессного контроля выгорания ОЯТ, их создание и внедрение в эксплуатацию является важной научно-практической задачей. Один из путей решения этой задачи - построение системы контроля выгорания, основанной на измерении собственного гамма-излучения облученной ТВС. Гамма-спектрометрия дает возможность идентифицировать продукты деления по их пикам в гамма-спектре и по отношению активностей реперных изотопов рассчитать выгорание ОЯТ без предварительного знания времени его выдержки и начального обогащения. Оптимальным с точки зрения минимизации временных затрат является измерение гамма-спектров облученных ТВС непосредственно в процессе выполнения транспортно-технологических операций (ТТО) [3]. Поскольку время

ТТО регламентировано достаточно жестко, операции по определению глубины выгорания ядерного топлива (ЯТ) должны быть согласованы с временным графиком ТТО. Поэтому основным критерием при построении структуры системы определения выгорания должна быть выбрана ее работоспособность в режиме реального времени. За время извлечения перегрузочной машиной одной ТВС система должна обеспечить измерение ее собственного гамма-излучения, провести амплитудный анализ импульсов счета, осуществить обработку спектра собственного гамма-излучения, рассчитать характеристики выгорания ЯТ и занести их в базу данных. Работу системы в таком режиме будем называть далее работой в режиме реального времени; при этом соблюдается основной принцип построения систем реального времени – темп поступления входных данных в систему (характеристик собственного гамма-излучения топливной сборки) должен соответствовать темпу формирования выходных данных системы (характеристик состояния облученного ЯТ).

Структура системы, построенной на основании сформулированного выше критерия реального времени, представлена на рис. 1. Основным элементом системы, регистрирующим собственное гамма-излучение ТВС, является набор детекторов гамма-излучения. В [4] показано, что наиболее подходящими для контроля глубины выгорания ОЯТ являются полупроводниковые детекторы на основе CdZnTe. Наш опыт применения различных детекторов позволил остановиться на детекторах типа SDP310/LC/20S фирмы Ritesc. С точки зрения совмещения транспортно-технологических операций и контроля выгорания ОЯТ наиболее целесообразным представляется размещение детекторов на рабочей штанге перегрузочной машины (ПМ). Количество и угловое размещение детекторов относительно контролируемой ТВС остается одним из ключевых вопросов построения системы.

Система из  $n$  детекторов, образующая блок детектирования, должна осуществить регистрацию собственного излучения ОЯТ в процессе извлечения ТВС и преобразовать его в электрические сигналы для последующей передачи на амплитудный анализатор.

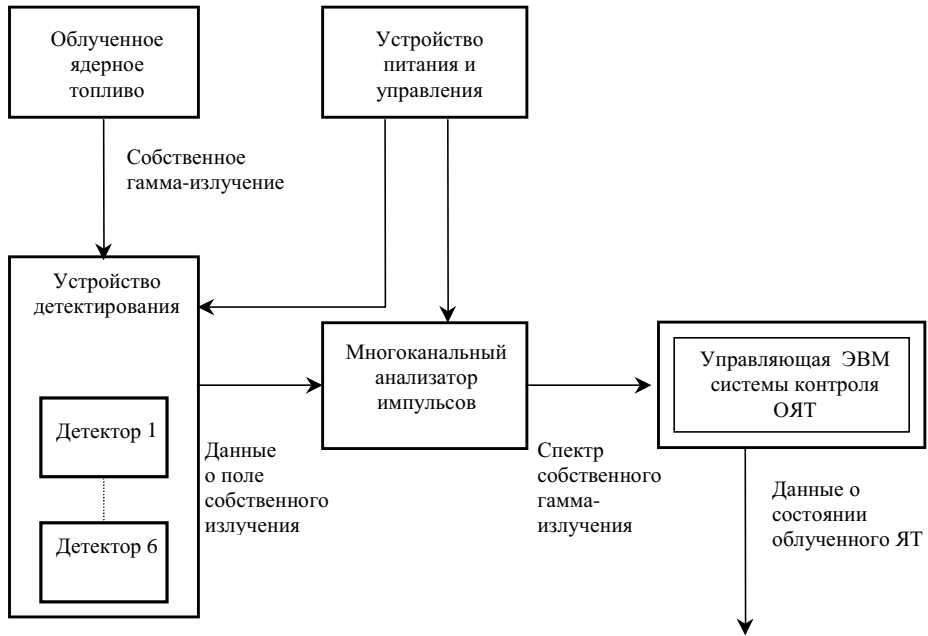


Рис.1. Структурная схема системы определения глубины выгорания облученного ЯТ

В АСУ ТП АЭС

Многоканальный амплитудный анализатор должен осуществлять функции накопления, обработки и последующей передачи на вычислительную и управляющую ЭВМ информации о распределении импульсов счета от детекторов по амплитудам, т.е. первичного (необработанного) гамма-спектра. Проведена сравнительная оценка характеристик анализаторов фирм Amptec, EG&G Ortec и GBS. С точки зрения выполнения сформулированного выше критерия реального времени целесообразно выбрать анализатор МСА 116 фирмы GBS. При использовании большого числа детекторов скорость счета может получиться достаточно высокой, поэтому в этом случае необходимо применить два или более амплитудных анализаторов. Поскольку никакой из серийно выпускаемых анализаторов не обеспечивает селекцию формы импульса при больших нагрузках, разработан также амплитудный анализатор собственной конструкции [5].

Далее необходимо осуществить в полученных спектрах поиск пиков полного поглощения, определение площади пиков, определение интенсивности излучения в пике полного поглощения, собственно расчет глубины выгорания ОЯТ контролируемой ТВС и ведение базы данных. Эти функции возлагаются на управляющую ЭВМ системы определения глубины выгорания. Для обеспечения режима реального времени предполагается в качестве управляющей ЭВМ использовать персональный компьютер в промышленном исполнении, который вполне в состоянии обеспечить выполнение перечисленных выше задач в режиме реального времени. При необходимости управляющий компьютер должен передать требуемые данные о состоянии ядерного топлива в АСУ ТП АЭС в стандартном протоколе.

Для нормального функционирования блока детектирования и амплитудного анализатора система должна включать устройство питания и управления, обеспечивающее подачу на указанные устройства требуемых напряжений питания и сигналов синхронизации их работы.

Если функционирование узлов и блоков системы (начиная с амплитудного анализатора и далее по структурной схеме) моделировалось ранее [5] или определено техническими характеристиками применяемых устройств и блоков, то процесс формирования полей собственного гамма-излучения ТВС в точке расположения детектора (т.е. процесс формирования и сбора первичной информации детектором) ранее не исследовался. Этот процесс представляет большой научный и практический интерес в плане оптимизации числа детекторов и их расположения относительно контролируемой ТВС. Поэтому в данной статье приведены результаты имитационного моделирования системы контроля выгорания ОЯТ на этапе формирования и регистрации первичной информации о собственном гамма-излучении ТВС.

## **ЗАДАЧИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Имитационное моделирование осуществлялось для тепловыделяющей сборки реактора ВВЭР-1000 с учетом ее конкретной геометрии.

Источником собственного гамма-излучения является каждый твэл топливной сборки. С учетом конструкции ТВС и большого количества заполняющих ее твэлов можно определенно утверждать, что суммарное поле интенсивности гамма-излучения в возможных точках расположения детекторов будет формироваться достаточно сложным образом.

Следует ожидать выраженной угловой зависимости интенсивности гамма-излучения в точке контроля и неравномерности вкладов отдельных твэлов в суммарное поле. Теоретически описать процесс формирования суммарного поля не представляется возможным. Поэтому средством исследования основных закономерностей, наблюдающихся при контроле интенсивности собственного гамма-излучения от ТВС в целом,

было выбрано имитационное моделирование.

Если отдельные конструкции топливных сборок уже исследовались путем моделирования, в частности ТВС реактора ВВР, имеющая значительно более простую конструкцию [6], то подобные исследования для топливной кассеты ВВЭР-1000 нам не известны. Представляет интерес решение ряда задач:

- оценка вкладов отдельных твэлов в общую интенсивность гамма-излучения в точке размещения детектора;
- анализ закономерностей изменения интенсивности различных продуктов деления (ПД) при различных угловых положениях детектора;
- исследование влияния на результирующую интенсивность гамма-излучения ПД неравномерного распределения их гамма-активности по ТВС;
- анализ измеренной интенсивности полей отдельных ПД или отношения измеренных интенсивностей с учетом эффективности регистрации детектора;
- оценка зон контроля, охватываемых одним детектором при его определенном расположении; рекомендации по количеству требуемых детекторов и их размещению относительно ТВС.

## ОБЩИЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

При расположении детектора в  $n$ -ой точке наблюдения на расстоянии  $R_n$  от оси ТВС интенсивность гамма-излучения  $i$ -го изотопа ПД с энергией  $E_\gamma$  в точке расположения детектора равна

$$I_n^{i\gamma} = \sum_m A_{mi} k_{i\gamma} w_{mn}, \quad (1)$$

где  $A_{mi}$  - активность  $i$ -го изотопа для  $m$ -го твэла с учетом реального выгорания;  $k_{i\gamma}$  - внешний выход  $\gamma$ -й гамма-линии для  $i$ -го изотопа;  $w_{mn}$  - коэффициент вклада  $m$ -го твэла в интенсивность гамма-излучения  $i$ -го изотопа с энергией, учитывающий эффекты ослабления при распространении гамма-пучка от  $m$ -го твэла до  $n$ -ой точки наблюдения,  $m=1, \dots, 312$ .

Измеренная интенсивность (скорость счета) будет существенно меньше из-за малых размеров чувствительной области детектора. В связи с этим наблюдается выраженная зависимость эффективности регистрации от энергии регистрируемых гамма-квантов, которую можно учесть, вводя эффективность регистрации детектора  $\epsilon(E_\gamma)$  для изотопа с энергией  $E_\gamma$ . Измеренная интенсивность гамма-излучения  $i$ -го изотопа с энергией  $E_\gamma$  выражается в виде

$$I_n^{i\gamma mes} = \sum_m A_{mi} k_{i\gamma} w_{mn} \epsilon(E_\gamma). \quad (2)$$

В дальнейшем в данном разделе индексы  $i\gamma$  будем опускать, поскольку речь идет об интенсивности гамма-излучения в точке регистрации именно  $i$ -го изотопа с энергией  $E_\gamma$ , т.е. при моделировании считается, что пики гамма-спектра выделены и обработаны.

Ослабление при распространении гамма-излучения, главным образом, связано с двумя физическими механизмами:

- с геометрическим ослаблением, связанным с пространственным расхождением пучка:

$$P_{geom} = \frac{S_{det}}{4\pi R_{mn}^2}, \quad (3)$$

где  $S_{det}$  - активная площадь детектора;  $R_{mn}$  - расстояние от центра  $m$ -го твэла до  $n$ -ой

точки расположения детектора.

• с физическим ослаблением гамма-излучения при прохождении через различные среды ( в частности, при прохождении через  $UO_2$  в других твэлах, находящихся на пути гамма-пучка к детектору, в их циркониевых оболочках, а также в воде, как внутри ТВС, так и вне ее). Физическое ослабление излучения от  $m$ -го твэла выражается как

$$P_{phys} = \exp \left( - \sum_l \mu_l l_l \right), \quad (4)$$

где  $\mu_l$  - линейные коэффициенты ослабления гамма-квантов с энергией  $E_\gamma$  для соответствующих сред (они представлены в различных справочных источниках; авторы, в частности, использовали электронный справочник XCOM: Photon Cross Sections Database / National Institute of Standards and Technology-Gaithersburg, MD 20899, 1996);  $l_l$  - длина пробега гамма-излучения в среде типа  $l$  (воде, двуокиси урана и цирконии).

Таким образом, коэффициент вклада  $m$ -го твэла для  $n$ -го положения детектора, связанный с ослаблением, равен

$$w_{mn} = \frac{S_{det}}{4\pi R_{mn}^2 \exp \left( \sum_l \mu_l l_l \right)}. \quad (5)$$

## АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ИНТЕНСИВНОСТИ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ В ТОЧКЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ДЕТЕКТОРА

При решении задачи о моделировании интенсивности гамма-излучения от ТВС в точке расположения детектора введен ряд допущений.

1. Задача рассматривается в плоском сечении топливной сборки и твэлов, т.е. вертикальная неравномерность распределения активности ПД по твэлам не учитывается.

2. Твэл рассматривается как однородный цилиндр, имеющий активность  $A_m$ .

3. Краевые эффекты рассеяния гамма-пучка на ребрах, дистанционирующих решетках и других конструкционных элементах ТВС не учитываются.

4. Поскольку практический интерес представляют достаточно большие удаления детектора от оси ТВС (порядка 25 см), не учитываются геометрические эффекты коллиматора. На указанных расстояниях сборка видна из точки расположения детектора под достаточно малым углом. Поэтому можно считать, что практически весь пучок проходит через коллиматор без геометрических потерь.

5. Оценочные расчеты показывают, что при толщине циркониевой оболочки твэла 0,65 мм ослаблением гамма-пучка в циркониевом сплаве можно пренебречь по сравнению с ослаблением в двуокиси урана и в воде.

Для решения задачи введена прямоугольная система координат XOY с началом координат в геометрическом центре ТВС (рис. 2). Все твэлы и отверстия для стержней пронумерованы по горизонтальным рядам начиная с верхнего левого. Координаты каждого твэла или стержневого отверстия  $(x_m, y_m)$  легко находятся исходя из правильной треугольной симметрии конструкции с периодом 12,75 мм.

Координаты детектора, первоначально заданные в полярных координатах  $(\rho, \theta)$  (полюс совпадает с началом координат 0, угол  $\theta$  отсчитывается против часовой стрелки), пересчитываются в прямоугольные  $(x_0, y_0)$ . Дальнейшие этапы расчета таковы.

1. Для каждого  $n$ -го положения детектора  $(x_{0n}, y_{0n})$  и каждого  $m$ -го твэла с коор-

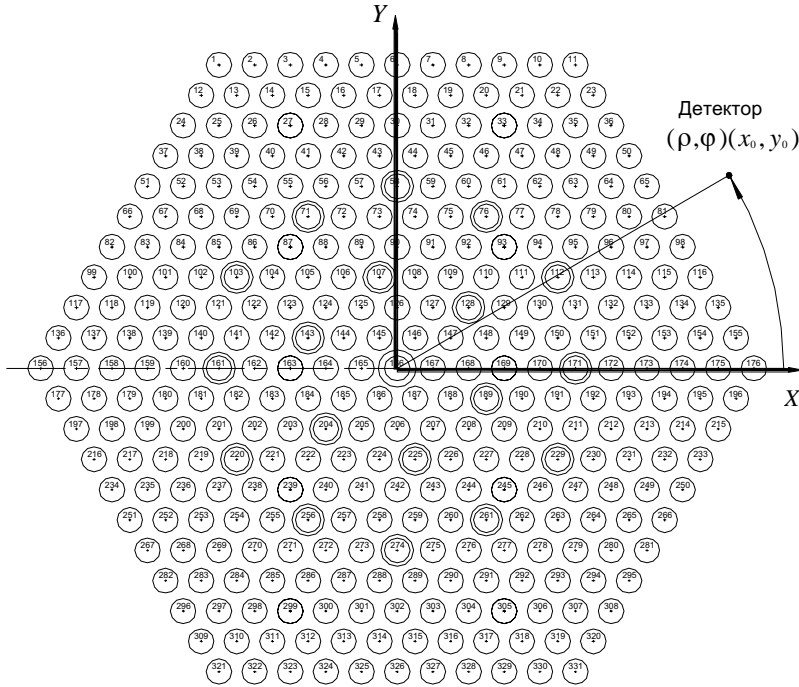


Рис.2. Картограмма ТВС. Геометрия задачи

динатой центра  $(x_m, y_m)$  находится уравнение прямой, проходящей через точку расположения детектора и центр  $m$ -го твэла,

$$Ax + By + C = 0; \quad (6)$$

коэффициенты этой прямой определяются соотношениями [7]

$$A = -(y_{0n} - y_m), \quad (7)$$

$$B = x_{0n} - x_m, \quad (8)$$

$$C = -y_m(x_{0n} + x_m) + x_m(y_{0n} + y_m). \quad (9)$$

2. Для каждого  $j$ -го твэла с координатами центра  $(x_j, y_j)$ , через который проходит гамма-излучение от твэла  $m$ , рассчитываются расстояния по нормали от его центра до прямой  $Ax + By + C = 0$ :

$$d_j = \frac{Ax_j + By_j + C}{\sqrt{A^2 + B^2}}. \quad (10)$$

3. Определяются твэлы, через которые проходит излучение от данного твэла на пути к детектору. Эти твэлы должны удовлетворять двум условиям:

- попадать в “коридор”, равный радиусу твэла ( 0,455 см );
- находиться от детектора на расстоянии, не большем, чем излучающий твэл, т.е. такие твэлы должны удовлетворять следующим условиям:

$$d_j \leq 0,455, \quad (11a)$$

$$\sqrt{(x_j - x_{0n})^2 + (y_j - y_{0n})^2} \leq \sqrt{(x_m - x_{0n})^2 + (y_m - y_{0n})^2}. \quad (11b)$$

4. Для каждого из твэлов, находящихся на пути гамма-пучка, определенных в п. 3, находится длина траектории в материале, заполняющем твэл:

$$L_j = 2\sqrt{R^2 - d_j^2}, \quad (12)$$

где  $R$  - радиус твэла,  $d_j$  - расстояние по нормали от центра твэла до линии  $Ax + By + C = 0$ .

5. Если среди твэлов, найденных по условиям п.3, есть стержневые отверстия, длины траекторий в них исключаются из массива  $\{L_j\}$ .

6. Для всех твэлов, удовлетворяющих условиям (11а), (11б), находится сумма  $L_j$ , которая представляет собой суммарную длину траектории в  $UO_2$ . Тогда суммарное ослабление гамма-излучения от единичного  $m$ -го твэла на пути к детектору в  $UO_2$  составит

$$P_{UO_2}^{(m)} = \exp\left(-\mu_{UO_2} \sum_j L_j\right). \quad (13)$$

7. Общая длина траектории гамма-пучка от излучающего твэла до детектора равна

$$\sqrt{(x_m^2 - x_{on}^2)^2 + (y_m^2 - y_{on}^2)^2}. \quad (14)$$

8. Длина траектории в воде (как внутри сборки, так и вне ее) составит:

$$\sqrt{(x_m^2 - x_{on}^2)^2 + (y_m^2 - y_{on}^2)^2} - \sum_j L_j, \quad (15)$$

а суммарное ослабление в воде соответственно равно

$$P_{H_2O}^{(m)} = \exp\left(-\mu_{H_2O} \left(\sqrt{(x_m^2 - x_{on}^2)^2 + (y_m^2 - y_{on}^2)^2} - \sum_j L_j\right)\right). \quad (16)$$

9. Вклад каждого  $m$ -го твэла рассчитывается как

$$W_{mn} = \frac{S_{det}}{4\pi R_{mn}^2} \cdot P_{UO_2}^{(m)} \cdot P_{H_2O}^{(m)}. \quad (17)$$

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

$$I_n = \sum_m A_m W_{mn}. \quad (18)$$

11. Путем получения углового распределения интенсивности моделируется перемещение детектора по окружности, для этого организуется цикл по угловой координате детектора  $\theta$  с шагом  $\Delta\theta$ .

Предложенный алгоритм моделирования интенсивности гамма-излучения с учетом реальной геометрии топливной сборки и измерительной задачи является разработкой, отличающейся от подобных алгоритмов, применявшихся ранее (см., например, [6]) вычислительной простотой, т.к. не требует поворотов системы координат. В частности, время счета по данному алгоритму в 35-40 раз меньше, чем по алгоритму, использующему повороты системы координат, при тех же требованиях к памяти компьютера. Моделирование осуществлялось в программной среде Microsoft Visual C++ и в системе Matlab 5.2.

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

### Моделирование распределения активности ПД по сечению ТВС

Моделирование интенсивности гамма-излучения ТВС в точке расположения гамма-детектора проводилось для двух видов распределения активности ПД внутри сборки, имитирующих реальное выгорание ЯТ с максимальной неравномерностью по се-

чению 25% (симметричного и несимметричного).

Симметричное распределение моделировалось в соответствии с выведенным на основании анализа материалов [8] эмпирическим соотношением

$$A_m = (-5,84 \cdot 10^{-4} x_m^2 + 3,9 \cdot 10^{-3} x_m + 1,14)(-1,2 \cdot 10^{-3} y_m^2 - 6,1 \cdot 10^{-3} y_m + 1,15), \quad (19)$$

где  $(x_m, y_m)$  - координаты  $m$ -го твэла ТВС;  $m = 1, \dots, 312$ .

Распределение (19) имеет на оси сборки максимум активности ПД, равный примерно 1,25 по отношению к активности твэлов, находящихся на краях ТВС.

Несимметричное распределение со смещенным максимумом активности в районе расположения 248-го твэла моделировалось по эмпирической формуле, выведенной на основании анализа материалов [8]:

$$A_m = 0,6 \exp(-0,0012 r_m^2) + 0,7, \quad (20)$$

где  $r_m = \sqrt{(x_m - x_{248})^2 + (y_m - y_{248})^2}$ ;  $(x_m, y_m)$  - координаты  $m$ -го твэла ТВС,  $m = 1, \dots, 312$ ;  $(x_{248}, y_{248})$  - координаты 248-го твэла.

Распределение (20) имеет максимум активности на оси 248-го твэла, равный примерно 1,25 по отношению к минимальной активности твэлов в сборке.

Максимальная неравномерность гамма-активности твэлов в пределах ТВС, равная примерно 25%, экспериментально подтверждена путем разрушающего контроля облученных ТВС [8].

### **Анализ коэффициентов вкладов твэлов $w_{mn}$**

Коэффициенты вкладов твэлов  $w_{mn}$  рассчитывались по соотношению (17) для всех изотопов - продуктов деления, выбранных в качестве реперных для оценки выгорания ОЯТ и для различных положений детектора. Анализ полученных в результате моделирования коэффициентов  $w_{mn}$  позволил установить определенные закономерности.

1). Коэффициенты вкладов обладают заметной угловой зависимостью, что связано с различными длинами пробега гамма-пучка при различных угловых положениях детектора. Следует отметить, что для изотопов с энергией гамма-квантов выше 802 кэВ угловая зависимость коэффициентов вклада выражена слабее, чем для изотопов с более низкой энергией. Это объясняется меньшим поглощением  $m$  на высоких энергиях и соответственно большей проникающей способностью гамма-излучения.

2). В связи с малым затуханием гамма-излучения высоких энергий весовые вклады твэлов на высоких энергиях относительно равномерны за исключением твэлов, находящихся на оси симметрии при расположении детектора под углами, соответствующими ребрам сборки. В последнем случае гамма-пучок от крайнего дальнего твэла пробегает максимально возможное число твэлов - 18 и 3 стержневых отверстия, заполненных водой.

3). Вклады от твэлов на низких энергиях сильно разнятся по сечению ТВС; так для ближних к детектору и наиболее удаленных твэлов разница вкладов по величине может достигать 4-х порядков. В связи с этим на формирование интенсивности излучения в точке расположения детектора оказывает влияние лишь часть твэлов, ближних к детектору.

4). Угловые зависимости коэффициентов вкладов на низких энергиях сильно выражены и очень разнятся для различных углов расположения детектора. В частности для углов расположения детектора, соответствующих серединам граней, наблюдается сильное затухание по нескольким путям пробега, что выражается в появлении на картине коэффициентов вклада нескольких характерных «хребтов». Для уг-



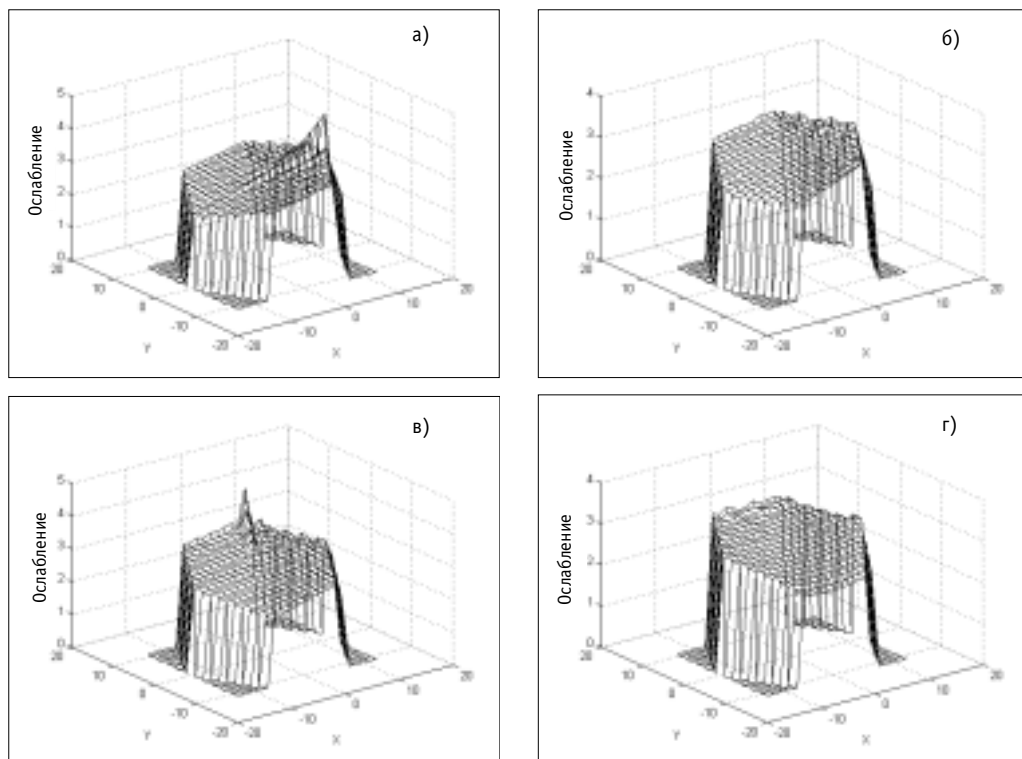


Рис. 3. Коэффициенты вкладов твэлов для  $^{134}\text{Cs}$  1365 кэВ) для углов расположения детектора: а) -  $0^\circ$ , б) -  $30^\circ$ , в) -  $60^\circ$ , г) -  $90^\circ$

лов, соответствующих ребрам ТВС, такого явления не наблюдается.

5). Среди коэффициентов вкладов отсутствуют резко отличающиеся по значению от остальных (так называемые «прострелы», которые имеют место при оценке коэф-фициентов вклада в топливной сборке реактора BWR [6]). Это объясняется более плотной геометрией рассматриваемой ТВС ВВЭР-1000 - невозможно проникновение излучения от любого твэла к детектору без пересечения с другими твэлами, за исключением двух-трех рядов, ближних к детектору.

Типичные картины коэффициентов вклада, иллюстрирующие сказанное выше, приведены на рис. 3, 4. Для удобства интерпретации на рис.3,4 показано ослабление излучения отдельных твэлов (величина, обратная  $w_{mn}$ ) в логарифмическом масштабе.

Анализ результатов моделирования интенсивности гамма-излучения ПД в точке расположения детектора

Моделирование интенсивности гамма-излучения в точке расположения детектора по описанному выше алгоритму производилось для установления основных закономерностей формирования полей интенсивности с целью выработки рекомендаций по выбору количества детекторов и их расстановки вокруг измеряемой ТВС. Моделирование осуществлялось для расстояния от оси сборки до детектора  $R=22,5$  см, которое соответствует проекту реальной измерительной системы и определяется габаритами рабочей штанги ПМ.

Поскольку для определения выгорания представляют реальный интерес отношения измеренных интенсивностей различных изотопов[3], промоделированы отношения интенсивностей различных ПД с учетом эффективности регистрации по соотношению (2). При этом эффективность регистрации рассчитывалась по соотношению

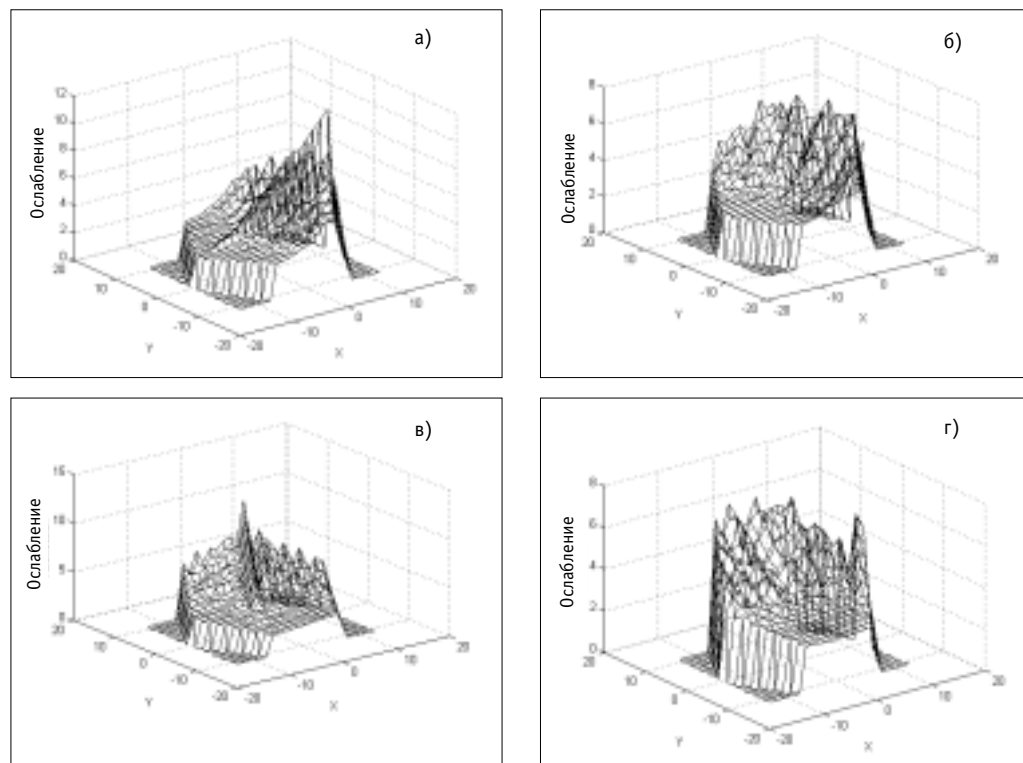


Рис.4. Коэффициенты вкладов твзлов для  $^{134}\text{Cs}$  (569 кэВ) для углов расположения детектора: а) -  $0^\circ$ , б) -  $30^\circ$ , в) -  $60^\circ$ , г) -  $90^\circ$

$$\epsilon(E_\gamma) = 0,0092 \cdot \exp(-0,00558E_\gamma), \quad (21)$$

где  $E_\gamma$  - энергия  $\gamma$ -й линии  $i$ -го изотопа. Формула (21) получена эмпирическим путем с достоверностью аппроксимации  $R^2 = 0,956$  [4]. Отметим, что для обоих моделируемых распределений активности по сечению ТВС (19) и (20) результаты моделирования качественно совпадают.

На рис. 5 представлено промоделированное отношение измеренных интенсивностей ПД  $^{106}\text{Rh}$  (511 кэВ) и  $^{137}\text{Cs}$  (661 кэВ) в зависимости от угла наблюдения. Анализ графика показывает, что на серединах граней имеются провалы величиной до 3,5% от среднего хода кривой, а точкам ребер ТВС соответствуют осциллирующие максимумы. Разброс точек графика по отношению к его среднему значению не превосходит 6,5%. Основная угловая зависимость, связанная с неравномерностью активности (20), практически сглажена.

По мере увеличения энергии изотопа, интенсивность которого относим к интенсивности  $^{137}\text{Cs}$  (661 кэВ), описанная угловая зависимость сглаживается (рис. 6). В частности для верхней кривой отношения измеренных интенсивностей  $^{134}\text{Cs}$  (604 кэВ) и  $^{137}\text{Cs}$  (661 кэВ) разброс точек графика не превосходит 1,8% от среднего, а минимумы, максимумы и осцилляции таковы, что их анализ практического значения не имеет.

Качественно иной вид имеет картина зависимости отношения измеренной интенсивности изотопов средних (795-802 кэВ) и высоких (1004-1365 кэВ) энергий к интенсивности  $^{137}\text{Cs}$  (661 кэВ) (рис.7). На серединах ребер наблюдаются двухмодальные максимумы, величина которых растет с увеличением энергии изотопа, интенсивность которого мы относим к интенсивности  $^{137}\text{Cs}$  (661 кэВ). Для  $^{154}\text{Eu}$  (1274 кэВ)

величина максимума доходит до 3%; наблюдается также более выраженная основная угловая зависимость относительной интенсивности, связанная с неравномерностью активности по ТВС, определяемая средним наклоном кривой.

### Анализ зон охвата площади ТВС одним детектором

С точки зрения выбора количества детекторов, необходимых для решения конкретной технико-экономической задачи, связанной с определением выгорания, представляет интерес ответ на вопрос, какую часть (зону) ТВС контролирует один детектор, в связи с этим были количественно проанализированы коэффициенты вкладов отдельных твэлов в интенсивность на детекторе. Анализ производился для углов, соответствующих серединам граней ТВС и ее ребрам для различных изотопов ПД. Результаты анализа представлены в табл. 1, 2.

В таблицах приведены количество твэлов, охватываемых одним детектором; процент охвата 60-градусного сектора ТВС, прилегающего к детектору; процент охвата сборки в целом. Под допустимой неравномерностью учета коэффициентов вкладов понимается процентное отклонение коэффициента вклада твэла, включаемого в зону охвата, от максимального значения коэффициента вклада  $w_0$ , который имеет твэл (или ряд твэлов), ближний к детектору.

В частности, при допустимой неравномерности 25% в зону охвата включались все  $m$ -е твэлы, коэффициенты вклада которых удовлетворяют условию

$$w_m > 0,75w_0; \quad (22)$$

при допустимой неравномерности 40% условие включения  $m$ -го твэла в зону охвата

$$w_m > 0,60w_0; \quad (23)$$

наконец, для допустимой неравномер-

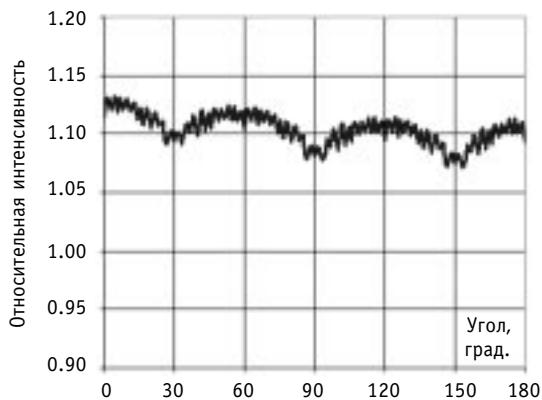


Рис. 5. Угловая зависимость отношения интенсивностей  $^{106}\text{Rh}$  (511 кэВ) и  $^{137}\text{Cs}$  (661 кэВ)

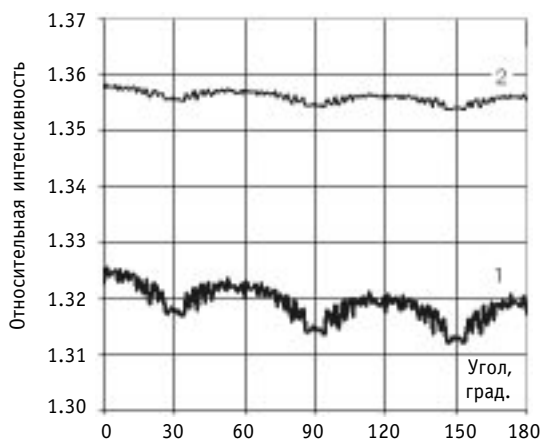


Рис. 6. Угловая зависимость отношения интенсивности  $^{134}\text{Cs}$  (604 кэВ) к интенсивности  $^{137}\text{Cs}$  (661 кэВ) (1) и угловая зависимость отношения интенсивности  $^{106}\text{Rh}$  (622 кэВ) к интенсивности  $^{137}\text{Cs}$  (661 кэВ) (2)

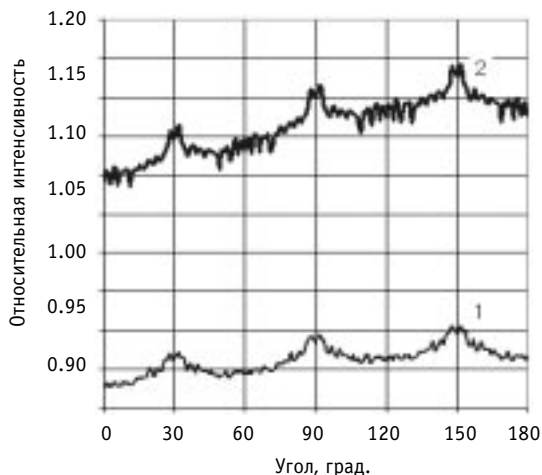


Рис. 7. Угловая зависимость отношения интенсивности  $^{134}\text{Cs}$  (802 кэВ) к интенсивности  $^{137}\text{Cs}$  (661 кэВ) (1) и угловая зависимость отношения интенсивности  $^{154}\text{Eu}$  (1274 кэВ) к интенсивности  $^{137}\text{Cs}$  (661 кэВ) (2)

Таблица 1

**Зоны перекрытия ТВС одним детектором, расположенным напротив середины грани**

Изотопы ПД	Допустимая неравномерность учета коэффициентов вкладов 25%			Допустимая неравномерность учета коэффициентов вкладов 40%			Допустимая неравномерность учета коэффициентов вкладов 50%		
	к-во твэлов	% 60 <sup>0</sup> сектора	% пл. ТВС	к-во твэлов	% 60 <sup>0</sup> сектора	% пл. ТВС	к-во твэлов	% 60 <sup>0</sup> сектора	% пл. ТВС
Cs134 (1365 кэВ)	34	62	10,4	57	100*	17,3	73	100*	22,1
Cs134 (802 кэВ)	32	58	9,7	55	89	16,7	68	100*	20,6
Cs134 (604 кэВ)	32	58	9,7	49	87	14,9	63	100*	19,1
Cs134 (563 кэВ)	32	58	9,7	48	87	14,6	62	100*	18,8
Cs137 (661 кэВ)	31	56	9,4	51	93	15,5	63	100*	19,1

\* - с перекрытием части соседних секторов

Таблица 2

**Зоны перекрытия ТВС одним детектором, расположенным напротив ребра**

Изотопы ПД	Допустимая неравномерность учета коэффициентов вкладов 25%			Допустимая неравномерность учета коэффициентов вкладов 40%			Допустимая неравномерность учета коэффициентов вкладов 50%		
	к-во твэлов	% 60 <sup>0</sup> сектора	% пл. ТВС	к-во твэлов	% 60 <sup>0</sup> сектора	% пл. ТВС	к-во твэлов	% 60 <sup>0</sup> сектора	% пл. ТВС
Cs134 (1365 кэВ)	17	31	5,2	33	60	10,0	41	75	12,0
Cs134(802 кэВ)	13	24	4,0	31	56	9,4	41	75	12,0
Cs134(604 кэВ)	11	20	3,3	27	49	8,2	37	67	9,4
Cs134(563 кэВ)	9	16	2,7	23	42	7,0	31	56	11,8
Cs137(661 кэВ)	13	24	4,0	29	53	8,8	39	71	19,1

ности 50% условие включения  $m$ -го твэла в зону охвата

$$w_m > 0,5w_0. \quad (24)$$

Рассматривать допустимую неравномерность коэффициентов вклада, меньшую 25%, не имеет смысла. Как указывалось выше, коэффициенты вкладов сильно разнятся по величине, и условию, более жесткому, чем (22), как показывает анализ, удовлетворяет очень малое число твэлов.

Анализ данных табл. 1 и 2 позволяет сделать следующие выводы:

- для всех изотопов ПД и для всех рассмотренных погрешностей зона перекрытия ТВС одним детектором, расположенным напротив середины грани, существенно выше, чем детектором, расположенным напротив ребра ТВС;
- при расположении детектора на середине грани зона охвата слабее зависит от энергии изотопов ПД, чем при расположении детектора напротив ребра; это объясняется большей длиной пробега гамма-лучей в материале ТВС во втором случае и соответственно большим ослаблением для изотопов с малой энергией;
- с допустимой неравномерностью учета коэффициентов вкладов 40%, которую

можно считать вполне приемлемой, и с использованием контроля по  $^{134}\text{Cs}$  (1365 кэВ) детектор, расположенный на середине грани ТВС, позволяет полностью перекрыть прилегающий к нему сектор, т.е. применение шести детекторов, размещенных напротив середин граней, позволяет перекрыть зоной контроля всю площадь сечения топливной сборки.

Данные табл. 1, 2 могут служить основанием для выбора оптимального размещения детекторов и их числа в конкретной практической задаче.

Приведем иллюстративные примеры оценок зон охвата с помощью табл. 1, 2.

1). Пусть 3 детектора размещены на серединах нечетных (или четных) граней ТВС, и контроль осуществляется по изотопу  $^{134}\text{Cs}$  (1365 кэВ). С допустимой неравномерностью учета коэффициентов вклада 25% контролем будет перекрыто 31,2% площади ТВС, с неравномерностью 40% будет перекрыто 51,9% площади сечения и с неравномерностью 50% - 66,3% площади. Отметим, что зоны перекрытия находятся под углами  $120^\circ$ , т.е. контроль осуществляется по принципу «сектор через сектор».

2). Если использовать три детектора, размещенных напротив нечетных (или четных) ребер при том же реперном изотопе, зоны перекрытия соответственно составят для 25% допустимой неравномерности - 15,6%, для 40% допустимой неравномерности - 30,0%, для 50% допустимой неравномерности - 36,0% (контроль по принципу «сектор через сектор»).

3). При том же реперном изотопе 6 детекторов, расположенных по центрам граней, с допустимой погрешностью 25% перекрывают 61,2% площади ТВС. Если расположить еще 6 детекторов напротив ребер, зона контроля увеличивается до 92,4%.

Отметим два обстоятельства, которые необходимо учитывать при пользовании табл. 1,2.

Во-первых, расчеты по данным таблиц являются оценочными, т.к. при больших значениях зон охвата (более 1/6 от общей площади ТВС) для одновременного размещения детекторов по серединам граней и по ребрам зоны их контроля могут перекрываться, в этом случае оценка, полученная по таблицам, будет завышенной, поэтому требуется проводить уточненный расчет по имитационной программе.

Во-вторых, зоны охвата следует оценивать для конкретных реперных изотопов. Поскольку для определения выгорания используется отношение интенсивностей двух изотопов ПД, расчет зоны контроля нужно проводить по реперному изотопу с наибольшим ослаблением, и т.к. обычно это  $^{137}\text{Cs}$  (661 кэВ), следует пользоваться нижними строками таблиц.

## ВЫВОДЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

В статье предложена структурная схема системы определения глубины выгорания ОЯТ. Поскольку наиболее актуальным для моделирования является процесс формирования и сбора первичной информации о собственном гамма-излучении контролируемой ТВС, разработан экономичный алгоритм моделирования интенсивности поля гамма-излучения в произвольной точке расположения детектора. Алгоритм основан на расчете интенсивности в точке наблюдения как суммы интенсивностей излучения отдельных твэлов с учетом их коэффициентов вклада. Алгоритм учитывает физическое ослабление в материалах компонентов ТВС и водной среде бассейна перегрузки для соответствующих энергий гамма-излучения ПД, а также геометрическое ослабление. Алгоритм разработан для конкретной геометрии топливной сборки ВВЭР-1000.

Проведено имитационное моделирование коэффициентов вкладов отдельных твэлов ТВС в результирующую интенсивность гамма-излучения в точке расположения детектора. Показано, что при низких энергиях гамма-излучения ПД коэффициенты вкладов отдельных твэлов имеют выраженную угловую зависимость и сложную струк-

туру внутри ТВС.

Промоделированы отношения измеренных интенсивностей собственного гамма-излучения ТВС в точке расположения детектора для изотопов ПД с различной энергией с учетом эффективности регистрации. Моделирование осуществлялось для распределений гамма-активности ПД по сечению ТВС, имитирующих реальное выгорание. Установлены общие закономерности углового распределения интенсивности для ПД высоких, средних и низких энергий. В зависимости от энергии ПД для различных угловых положений детектора наблюдаются минимумы и максимумы интенсивности в определенных точках.

Рассчитаны зоны охвата площади контроля ТВС одним детектором в зависимости от его расположения для различных энергий ПД. Установлено, что для всех изотопов ПД зона перекрытия ТВС одним детектором, расположенным напротив середины грани, существенно выше, чем детектором, расположенным напротив ребра ТВС. Применение полученных результатов для выбора конфигурации системы детекторов проиллюстрировано примерами.

Полученные в результате моделирования данные могут служить основанием для оптимизации размещения детекторов и их числа при построении системы контроля глубины выгорания ОЯТ, предназначенной для решения конкретной технологической задачи.

## Литература

1. ПНАЭГ-14-029-91. Правила безопасности при хранении и транспортировке ядерного топлива на объектах атомной энергетики. - М.: ЦНИИАтоминформ, 1992. - 33 с.
2. Внедрение на Кольской АЭС прибора для измерения глубины выгорания отработавших тепловыделяющих сборок/ *Пыткин Ю.Н., Андрушечко С.А, Васильев Б.Ю. и др.*: Тр. Российской международн. конф. по учету, контролю и физической защите ядерных материалов. - Обнинск, 1997. - Т.3. - С.637-645.
3. *Маслов О.В., Максимов М.В., Олейник С.Г.* Обоснование радиационных методов контроля состояния ядерного топлива в реальном времени при проведении перегрузки: Тр. Одесского политехн. ун-та. - 2000. - Вып. 3 (12). - С. 50-55.
4. *Билей Д.В., Маслов О.В.* Анализ возможности использования CdTe-детекторов для создания систем контроля состояния ядерного топлива на АЭС//Автоматика. Автоматизация. Электротехн. комплексы и системы. - 1998. - №1(4) - С.141-148.
5. *Галченков О.Н., Маслов О.В, Олейник С.Г.* Сравнение двух способов построения спектров в цифровом гамма-спектрометре//Ядерная и радиационная безопасность. - 2000. - Т. 3. - Вып. 3. - С.61 - 63.
6. *Jacobsson S.* Theoretical Investigations of Tomographic Methods used for Determination of the Integrity of Spent BWR Nuclear Fuel. - Uppsala University, Internal Report ISV-6/97, 1996. - P. 59.
7. *Ильин В.А., Поздняк Э.Г.* Аналитическая геометрия. - М.: Наука, 1988. - С. 224.
8. Исследования ТВС ВВЭР-1000 №№ Е0328 и Е0329, ПС СУЗ № 02.356 и СВП № 15137, отработавших на 1-м блоке Запорожской АЭС. - Отчет о НИР 14.05.93.00 Р 21230663. - Государственный научный центр НИИАР, Димитровград, 1994. - 149 с.

Поступила в редакцию 28.01.2002

## ABSTRACTS OF THE PAPERS

### УДК 621.311.25: 621.039.58

*Systematization of Probabilistic Analysis of NPP Fire Safety Problems \ I.B. Kuzmina, N.L. Salnikov; Editorial board of Journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2002. – 6 pages, 2 illustrations. – References, 5 titles.*

Matrix model of Probabilistic Analysis of NPP Fire Safety (PAFS) is suggested. Such presentation of PAFS researching provides comfortable and visible understanding of PAFS volume and probabilistic values. Different blocks of matrix are the complexes of the problems. Particularities of PAFS performance are considered, and also listing of general problems with their interfaces is formed.

### УДК 621.039.51: 539.1.074

*Determination low multiplying subcritical states by Rossi- $\alpha$  technique \ V.V. Doulin, I.P. Matveenko; Editorial board of Journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2002. – 9 pages, 4 tables, 4 illustrations. – References, 7 titles.*

The method of obtaining the spatial corrections at measurement of low multiplying subcritical states by Rossi- $\alpha$  technique was applied. For that solution of inhomogeneous equation adjoint with respect to detector count rate is used.

The experiment on determination of value of low multiplying subcriticality of media (3 kg  $^{239}\text{Pu}$  (95%)) was carried out. A new installation for registration Rossi –  $\alpha$  distribution was developed that has essentially improved accuracy of measurements.

The measurement results were analysed with using this new method and traditional method for calculation of spatial corrections using solution of homogeneous relative asymptotic power equation.

### УДК 621.039.5: 621.039.547.5

*Physical characteristics of the light-water reactor with ultra-long life of thorium-based fuel \ G.G. Koulikov, A.N. Shmelev, E.F. Kryuchkov, G.V. Tikhomirov, M.Yu. Ternovikh, V.A. Apse, M. Saito, V.V. Artisyuk; Editorial board of Journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2002. – 11 pages, 4 tables, 1 illustration. – References, 11 titles.*

Physical characteristics of the light-water reactor loaded with (Th-Pa-U)-fuel are analysed. It is demonstrated that introduction of  $^{231}\text{Pa}$  into Th-based fuel composition opens a possibility of principle to reach ultra-long life-time of fuel due to stabilization of its multiplying properties during the reactor operation.

### УДК 621.039.53: 621.039.526

*Analysis of Applicability of the Gallium and its Alloys for Cooling of LMFR \ V.S. Okunev; Editorial board of Journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2002. – 10 pages, 2 tables, 3 illustrations. – References, 14 titles.*

The possibilities of applicability of the gallium and Na-Ga-Pb-alloys (with different concentrations of the components) as a coolant of the LMFR are researched by the base of analysis of the physical and chemical properties, problem of compatibility with construction materials, inherent safety.

### УДК 539.1.01.07: 621.039.516

*Simulation of Spent Fuel Burnup Determination System \ S.G. Oleynik, V.A. Boltenkov; Editorial board of Journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2002. – 14 pages, 2 tables, 7 illustrations. – References, 8 titles.*

A structural chart of the system for spent fuel burnup control in real time is proposed. The formation of intensity field of gamma-radiation from monitored fuel assembly in an optional point of