

СПЕКТРАЛЬНЫЙ ФАКТОР В ГАММА-ДИАГНОСТИКЕ ПОЛЕЙ ИЗЛУЧЕНИЙ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК ВНИИЭФ

А. С. Кошелев, В. Х. Хоружий

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» 607188, г. Саров Нижегородской обл.

Представлены результаты расчета по методике С-007 прогнозного ожидания спектрально-обусловленных различий дозовых показаний γ -детекторов ДТС, ИС-7 (методика ИКС), КГК-2 и ВЭД-2 для 12 γ -композиций полей излучений реакторных установок ВНИИЭФ и двух изотопных источников ^{60}Co и ^{137}Cs .

Ключевые слова: спектр γ -квантов, доза, мощность дозы.

SPECTRAL FACTOR IN GAMMA-DIAGNOSTICS OF RADIATION FIELDS IN VNIIEF REACTOR FACILITIES / A. S. KOSHELEV, V. KH. KHORUZHYY // There are presented the results of calculation performed with the aid of C-007 technique of forecasting expectation of spectrally conditioned differences in dose readings of γ -detectors DTS, IS-7 (IKS technique), KGK-2 and VEH-2 for 12 γ -compositions of radiation fields in VNIIEF reactor facilities and two isotopic sources of ^{60}Co and ^{137}Cs .

Key words: spectrum of γ -quanta, dose, dose rate.

Введение

В интересах расширения возможностей диагностирования γ -составляющей полей излучений, базировавшихся ранее исключительно на использовании дозиметров интегрального типа (с фиксацией только суммарного дозового отклика) ИС-7 (метод ИКС) и ДТС [1] с выраженной биоориентацией, осуществляется внедрение в практику измерений дозиметров дифференциального типа (с фиксацией дозового отклика в формате текущего времени) ВЭД-2 [2] и КГК-2 (штучного изготовления при участии разработчика дозиметра, сотрудника ГНУ НИИТМ Чуляева С. В.), ориентированных, в первую очередь, на использование в интересах технодозиметрии (дозовое воздействие на материалы, элементы и функциональные блоки при их радиационном нагружении в реакторных полях излучений).

Для градуировки детекторов-дозиметров ВЭД-2 и КГК-2 в условиях максимального приближения к условиям диагностических измерений в реакторных полях излучений во ВНИИЭФ, при участии группы специалистов ФГУП «ВНИИФТРИ»

под руководством доктора технических наук Генераловой В. В., создан, аттестован и функционирует на реакторе БР-К1 специализированный гамма-источник (СГИ) с рабочей областью $100 \times 100 \times 50$ мм, конструктивно встроенной в цилиндрическую полость диаметром ~ 300 мм, длиной ~ 350 мм контейнера горизонтальной загрузки (КГЗ) во внутризонную полость реактора [3]. Изученные к настоящему времени пространственные, спектральные и временные характеристики СГИ представлены в [4].

Разнообразие типов дозиметров и, в первую очередь, разнообразие механизмов формирования их дозовых откликов, безусловно, предопределяет принципиальную возможность проявления различий и в их спектральной чувствительности. При значительном многообразии спектральных структур, используемых в практических целях реакторных γ -полей (формируемых как непосредственно излучениями активных зон (АЗ) реакторов металлического, графитового и растворного типов, так и с использованием разнообразных трансформеров собственно γ -излучения и нейтронного излучения в γ -кванты, в том числе конструктивно

включенных в состав АЗ, [5]), можно ожидать несовпадения результатов измерений одного и того же дозового параметра, выполненных детекторами-дозиметрами разного типа, из-за различий в их спектральной чувствительности.

Для количественной конкретизации прогнозного ожидания принципиально возможных различий в показаниях детекторов-дозиметров разного типа при измерении единого дозового параметра было организовано и осуществлено расчетное исследование влияния спектральной вариативности γ -составляющей полей излучений реакторов БР-К1 и БР-1М на вариативность дозовых откликов детекторов ДТС, ИС-7, КГК-2 и ВЭД-2 при их применении в полях излучений избранных основных конфигураций, используемых при проведении исследовательских и прикладных работ на данных реакторах.

Организация расчета

В качестве объектов рассмотрения были выбраны следующие области формирования полей излучений во внутризонном, околозонном и значимо удаленном от зоны пространствах и соответствующие им спектральные γ -композиции:

– область формирования СГИ в КГЗ реактора БР-К1 с определением спектра γ -квантов в ее геометрическом центре (рис. 1); обозначение спектра далее по тексту – БР-К1 КГЗ СГИ;

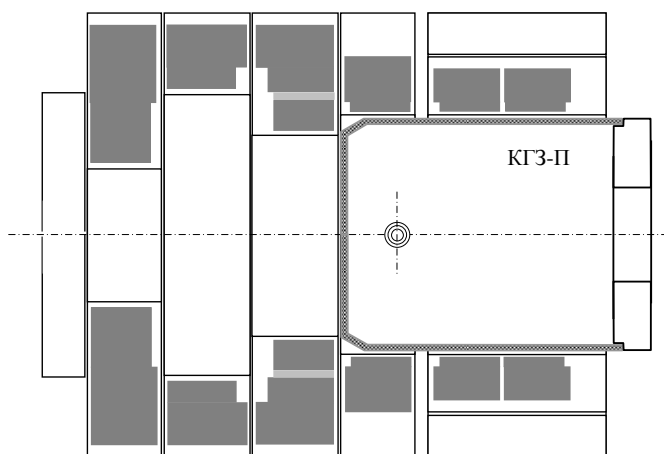


Рис. 1. Конфигурационная схема АЗ БР-К1 со встроенным СГИ, использованная в схеме расчета по методике С-007 для позиции в его геометрическом центре

– область пространства внутри контейнера вертикальной загрузки (КВЗ) во внутризонную полость реактора БР-1М вокруг контрольной опорной позиции ОП-1 (позиция размещения мониторинговых активационных и делительных детекторов на специальной подставке на расстоянии 50 мм от дна КВЗ) с определением спектра γ -квантов в ОП-1 (рис. 2); обозначение спектра далее по тексту – БР-1М КВЗ ОП-1;

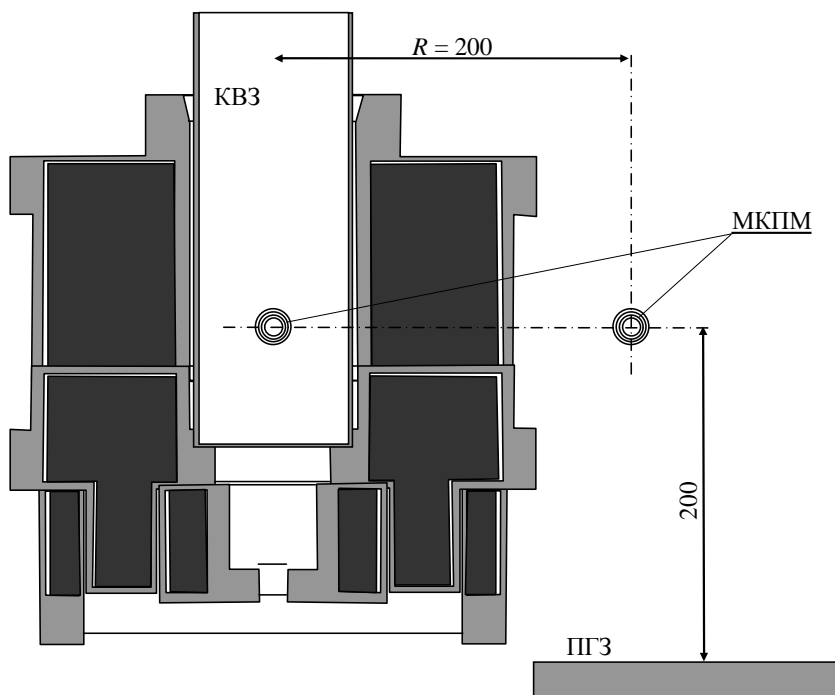


Рис. 2. Конфигурационная схема АЗ БР-1М, использованная в схеме расчета по методике С-007 для позиций КВЗ ОП-1 и ПГЗ R200

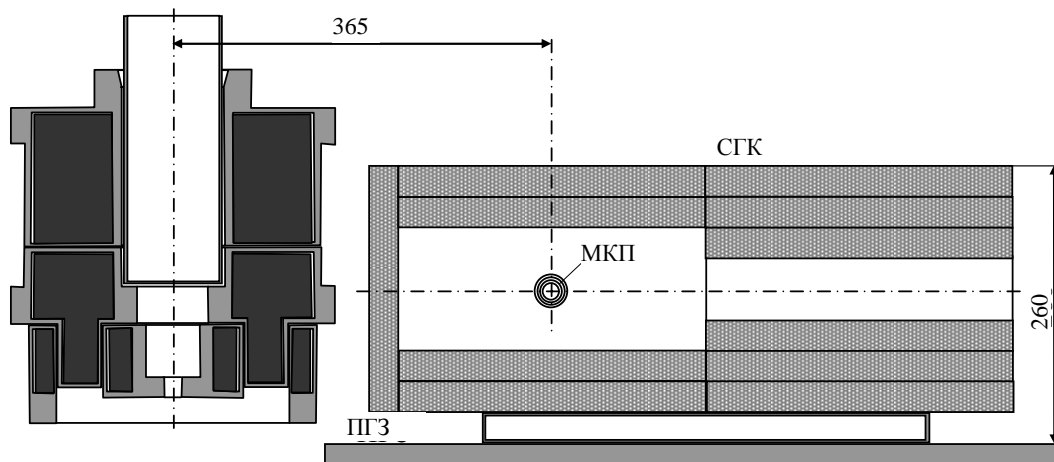


Рис. 3. Конфигурационная схема АЗ БР-1М и SGK ПС-30, использованная в схеме расчета по методике С-007 для позиции в геометрическом центре полости SGK

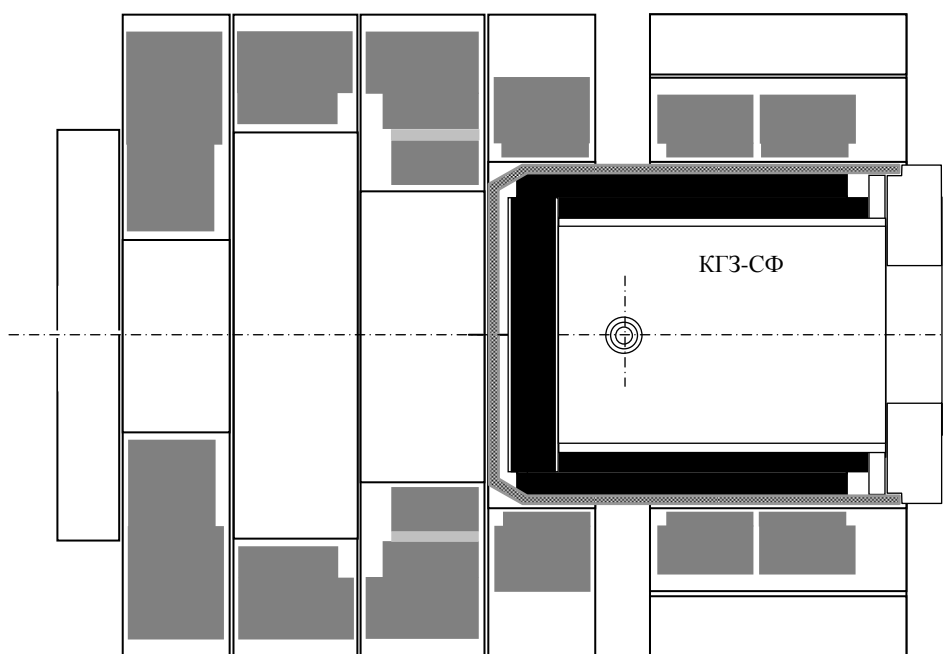


Рис. 4. Конфигурационная схема АЗ БР-К1 со встроенным СФ, использованная в схеме расчета по методике С-007 для позиции в координате $Z = 6$ см

– область пространства у боковой поверхности АЗ БР-1М в сторону платформы горизонтальной загрузки (ПГЗ) с центром на расстоянии 200 мм по радиусу от центральной осевой АЗ с определением спектра γ -квантов в позиционной координате $R = 200$ мм (рис. 2); обозначение спектра далее по тексту – БР-1М ПГЗ R200;

– область пространства внутри свинцового фильтра (СФ) для КГЗ реактора БР-К1 с геометрическим центром в координате $Z = 6$ см на центральной осевой СФ (рис. 3); определенный в $Z = 6$ см спектр γ -квантов далее по тексту обозначается как БР-К1 КГЗ СФ;

– область пространства внутри нейтронного гамма-конвертора (НГК) для КГЗ реактора БР-К1 с геометрическим центром в координате $Z = 6$ см на центральной осевой (рис. 4); определенный в $Z = 6$ см спектр γ -квантов далее по тексту обозначается как БР-К1 КГЗ НГК;

– область пространства внутри специализированного гамма-конвертора с передней, обращенной к АЗ, съемной стенкой толщиной 30 мм при его размещении на ПГЗ вплотную к экрану-ограничителю АЗ (рис. 5); определенный в геометрическом центре полости SGK спектр γ -квантов далее по тексту обозначается как БР-1М ПГЗ SGK ПС-30;

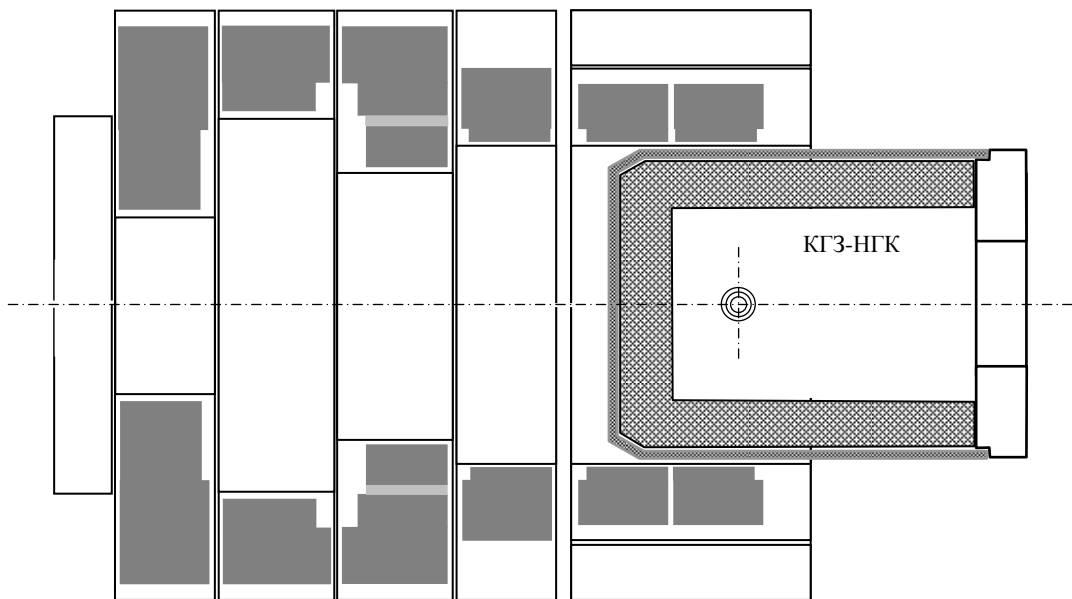


Рис. 5. Конфигурационная схема АЗ БР-К1 со встроенным НГК, использованная в схеме расчета по методике С-007 для позиции в координате $Z = 6$ см

– область пространства напротив окна в конвертере АЗ реактора ГИР-2 в сторону ПГЗ с геометрическим центром в позиционной координате $R = 300$ мм (расстояние по радиусу от центра АЗ; рис. 6); определенный в указанной координате R спектр γ -квантов далее по тексту обозначается как ГИР-2 ОК ПГЗ R300;

– области пространства напротив сплошной стенки конвертера АЗ реактора ГИР-2 в сторону ПГЗ с геометрическими центрами в позиционных координатах $R = 300$ мм и $R = 750$ мм (рис. 6, с поворотом конвертера АЗ на 180°); определенные в указанных координатах R спектры γ -квантов далее по тексту обозначаются как ГИР-2 СК ПГЗ R300 и ГИР-2 СК ПГЗ R750;

– три избранные области пространства в зале автономной работы (ЗАР) реактора БР-К1 (рис. 7) в системе координат X (вдоль центральной осевой колеи перемещения стенда горизонтальной загрузки, СГЗ, реактора с отсчетом от центральной осевой колеи перемещения реакторного стенда, РС) и Y (вдоль центральной осевой колеи перемещения РС с отсчетом от центральной осевой колеи перемещения СГЗ): $X = 0$ м, $Y = 2,5$ м; $X = 3$ м, $Y = 2,5$ м; $X = 9$ м, $Y = 2,5$ м; высота от пола для всех позиционных координат 2,2 м (высота от пола центра АЗ реактора); определенные в указанных координатах X , Y спектры γ -квантов далее по тексту обозначаются как БР-К1 ЗАР Х0Y2.5, БР-К1 ЗАР Х3Y2.5, БР-К1 ЗАР Х9Y2.5;

– область пространства внутри равномерно распределенного по поверхности сферы радиусом ~ 2 см изотопного источника ^{60}Co при наличии и отсутствии окружающего указанное пространство фильтра из свинца толщиной 0,15 мм; обозначение спектральных решений далее по тексту – ИИ ^{60}Co ;

– область пространства внутри равномерно распределенного по поверхности сферы радиусом ~ 2 см изотопного источника ^{137}Cs при наличии и отсутствии окружающего указанное пространство фильтра из свинца толщиной 0,15 мм; обозначение спектральных решений далее по тексту – ИИ ^{137}Cs .

Все спектральные расчеты выполнялись в рамках методики С-007 решения методом Монте-Карло связанных линейных уравнений переноса нейтронов, гамма-квантов, электронов и позитронов [6]. При построении расчетных схем учитывались конфигурационные особенности АЗ как первичных источников излучений и соответствующее координатное позиционирование областей расчета согласно рис. 1–7.

Основной объем расчетов выполнен в 23-групповом энергетическом формате (Ф23), представленном в табл. 1. Некоторые данные (взяты из ранее проведенных расчетов) соответствуют 18-групповому энергетическому формату (Ф18), отличающемуся от Ф23 заменой шести групп в интервале от 0,01 до 0,2 МэВ на одну группу в интервале от 0,05 до 0,2 МэВ.

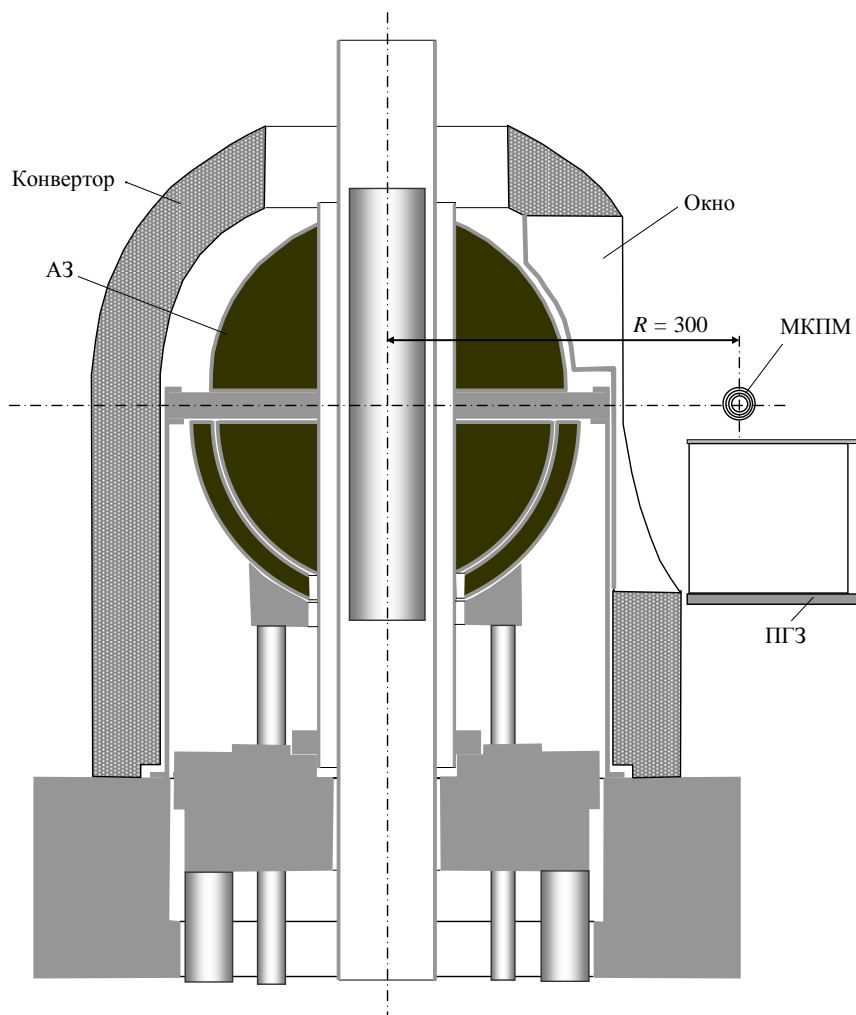


Рис. 6. Конфигурационная схема АЗ ГИР-2 с окном в конверторе в сторону ПГЗ, использованная в схеме расчета по методике С-007 для позиций ОК ПГЗ R300

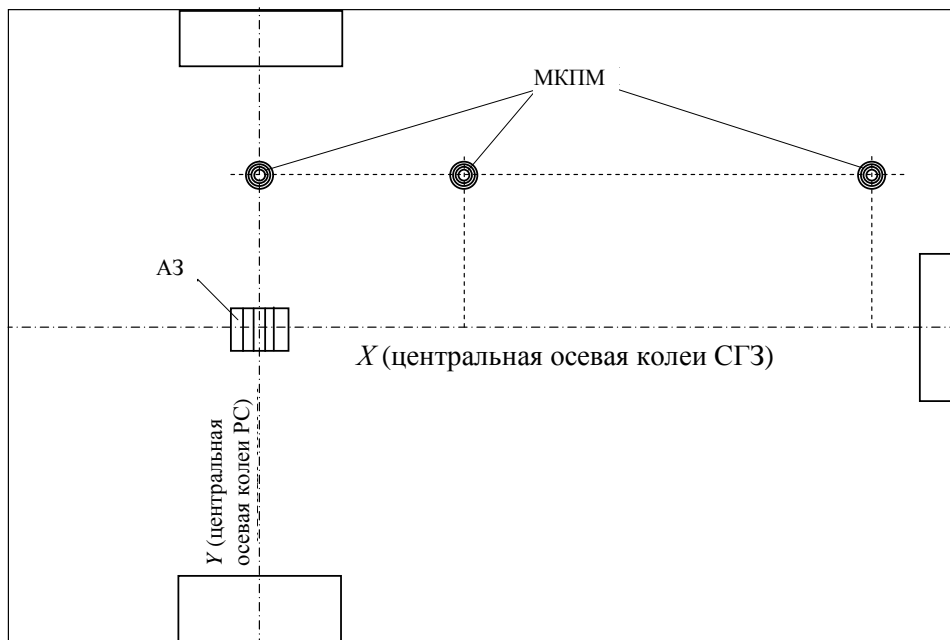


Рис. 7. План-схема рабочего зала реактора БР-К1, использованный в схеме расчета по методике С-007 в позиционных координатах X0Y2.5, X3Y2.5, X9Y2.5

Групповой энергетический формат Ф23

Группа	Энергетические границы группы, МэВ		ΔE , МэВ	\bar{E} , МэВ	Группа	Энергетические границы группы, МэВ		ΔE , МэВ	\bar{E} , МэВ
	E_{\min}	E_{\max}				E_{\min}	E_{\max}		
1	0,01	0,02	0,01	0,015	13	1,00	1,25	0,25	1,125
2	0,02	0,03	0,01	0,025	14	1,25	1,50	0,25	1,175
3	0,03	0,05	0,02	0,040	15	1,50	1,75	0,25	1,625
4	0,05	0,07	0,02	0,060	16	1,75	2,00	0,25	1,875
5	0,07	0,10	0,03	0,085	17	2,00	2,50	0,50	2,250
6	0,10	0,20	0,10	0,150	18	2,50	3,00	0,50	2,750
7	0,20	0,40	0,20	0,300	19	3,00	4,00	1,00	3,500
8	0,40	0,50	0,10	0,450	20	4,00	5,00	1,00	4,500
9	0,50	0,60	0,10	0,550	21	5,00	6,00	1,00	5,500
10	0,60	0,70	0,10	0,650	22	6,00	8,00	2,00	7,000
11	0,70	0,80	0,10	0,750	23	8,00	10,0	2,00	9,000
12	0,80	1,00	0,20	0,900	–	–	–	–	–

Для всех спектров реакторного происхождения отдельно определялись спектры мгновенных гамма-квантов (МГК) нейтронных взаимодействий с делением и без него и запаздывающих гамма-квантов (ЗГК) только радиоактивных продуктов деления. Так как МГК-составляющая доступна регистрации только с помощью детекторов ВЭД-2 и только в режиме генерирования импульсов делений на мгновенных нейтронах, а регистрация ЗГК-составляющей в рамках методики применения перечисленных выше детекторов-дозиметров невозможна, то в качестве приемлемой для сравнения с экспериментальными данными для поглощенных доз выбрана спектральная γ -композиция МГК + 0,7*ЗГК, в границах процентной вариативности отражающая суммарный энергетический γ -выход в интервале от десятков минут до нескольких часов выдержки измерительных детекторов-дозиметров на установочных позициях. Обозначение далее по тексту указанной γ -композиции – МЗГК.

Значительное внимание практической биодозиметрии в полях излучений энергетических и исследовательских реакторов на тепловых нейтронах уделяется вопросам применения корректирующих фильтров для измерительных γ -дозиметров [1], основное назначение которых – устранение избыточной чувствительности дозиметров в низкоэнергетической области спектра реакторного γ -излучения (ниже ~0,2 МэВ) по сравнению с чувствительностью к радиационному воздействию биоматериалов. В частности, дозиметры ИС-7 методики ИКС, широко используемой при диагностировании полей реакторных установок ВНИИЭФ, предписано использовать только в кор-

ректирующих фильтрах, в состав которых входит разборная оболочка из свинца толщиной ~0,1 мм.

По рекомендации начальника лаборатории технологической дозиметрии ВНИИФТРИ доктора технических наук В. В. Генераловой на реакторных установках ВНИИЭФ также планируется изучение метрологической необходимости (целесообразности) применения корректирующих фильтров со всеми γ -детекторами практического применения. В качестве основного варианта корректирующего фильтра, по согласованию с В. В. Генераловой, предполагается использование свинцовой оболочки толщиной 0,15 мм. Поэтому для трех характерно-типовых спектральных γ -композиций – БР-К1 КГЗ СГИ, БР-1М СГК ПС-30 и БР-К1 ЗАР Х9У2.5 – поиск спектральных решений был осуществлен в двух вариантах: без свинцового фильтра и в сферической оболочке из свинца толщиной 0,15 мм вокруг области определения спектра.

В геометрии изотропного поля γ -квантов изотопных источников ^{60}Co и ^{137}Cs произведена также расчетная оценка особенностей фильтрации моноэнергетических γ -квантов с энергиями 1,1732 МэВ, 1,3325 МэВ (^{60}Co) и 0,6616 МэВ (^{137}Cs) свинцом толщиной 0,15 мм.

В качестве расчетных данных, ориентированных на сравнение с соответствующими экспериментально определяемыми, рассматривались поглощенные дозы в документально конкретизированных материалах детекторов ДТС [1], ИС-7 [7] и в избранных материалах детекторов КГК-2 (типизированный газ-наполнитель промышленных ионизационных камер), ВЭД-2 (нержавеющая сталь марки 12Х18Н10Т, далее по тексту

«Сталь»), предположительно определяющих дозовый отклик указанных детекторов. Состав типизированного газа-наполнителя (далее по тексту «ИК-газ») принят следующим (%): 98,36 аргон, 1,44 азот, 1,20 гелий.

Расчет поглощенных доз организован в индивидуализированных слоях комбинированного поглотителя мультисферного (КПМ), фиксируемого в области расчета спектра γ -флюенса. Внешний диаметр КПМ ~2,6 см. Количество индивидуальных сферических слоев соответствует выбранному ряду материалов поглощения. Плотность каждого материала принимается равной $1,602 \cdot 10^{-16}$ г/см³, что обеспечивает представление рассчитываемых величин непосредственно в единицах «Гр» вместо «МэВ» при пренебрежимо малой значимости возмущения поля излучений в месте размещения КПМ. Результаты расчета фиксируются в указанных индивидуализированных областях.

В схеме расчета с фильтром функцию фильтрации γ -квантов выполнял внешний слой КПМ, заполненный свинцом с поверхностной плотностью, соответствующей толщине материала 0,15 мм нормальной плотности.

В качестве параметров выдачи были приняты групповые флюенсы МГК и ЗГК в нормировке на одно деление в АЗ, полные флюенсы МГК и ЗГК в энергетических границах константного обеспечения (от 0,001 МэВ до ~20 МэВ), соответствующие полному флюенсу поглощенные дозы в материалах ДТС, ИС-7, ИК-газ, Сталь в Гр на одно де-

ление в АЗ (также в границах константного обеспечения).

В процессе анализа первичных расчетных данных было осуществлено их переформатирование в части определения групповых флюенсов МЗГК (перенормировка на единичный флюенс МЗГК), их средних энергий \bar{E} и поглощенных доз (также перенормировка на единичный флюенс МЗГК).

Результаты расчета. Анализ

Использованные для анализа результаты расчета представлены в виде табл. 2, 3 и рис. 8–11.

Расчеты с фильтром обнаружили двойственный характер функции фильтрации внешнего γ -излучения. С одной стороны, во всех рассмотренных вариантах реакторных γ -спектров имеет место уменьшение полного флюенса МЗГК под фильтром. С другой стороны, имеет место выраженное перераспределение группового флюенса МЗГК под фильтром в область более высоких энергий («ужесточение» спектра), проявляющееся как в росте средних энергий спектра, так и в росте поглощенных доз на единичный флюенс под фильтром для всех рассмотренных материалов.

Влияние фильтра из свинца толщиной 0,15 мм на флюенс и поглощенные дозы в избранных материалах для γ -квантов ИИ можно рассматривать как пренебрежимо малое.

Таблица 2

Поглощенные дозы в избранных дозиметрических материалах

Спектр	ДТС	ИС-7	ИС-7*	ИК-газ	ИК-газ*	Сталь	Сталь*
Поглощенные дозы, Гр·см ² /квант							
БР-К1 КГЗ СГИ	4,0876–12	4,0481–12	4,1218–12	3,8098–12	3,9036–12	4,2228–12	4,3930–12
БР-1М КВЗ ОП-1	4,1517–12	4,1269–12	–	3,8710–12	–	4,2119–12	–
БР-1М ПГЗ R200	4,3713–12	4,2257–12	–	4,0332–12	–	4,3409–12	–
БР-К1 КГЗ СФ	4,3201–12	4,3016–12	–	4,0432–12	–	4,4668–12	–
БР-К1 КГЗ НГК	5,8119–12	5,7389–12	–	5,3791–12	–	6,2208–12	–
БР-1М СКГ ПС-30	5,5914–12	5,5042–12	5,6504–12	5,3967–12	5,5008–12	6,2639–12	6,2802–12
ГИР-2 ОК ПГЗ R300	5,9238–12	5,8558–12	–	5,5735–12	–	6,1556–12	–
ГИР-2 СК ПГЗ R300	6,3794–12	6,3037–12	–	6,1236–12	–	6,7522–12	–
ГИР-2 СК ПГЗ R750	6,1899–12	6,1016–12	–	5,8329–12	–	6,4851–12	–
БР-К1 ЗАР Х0У2.5	5,2783–12	5,1735–12	5,4525–12	5,2557–12	5,5774–12	6,1814–12	6,6607–12
БР-К1 ЗАР ХЗУ2.5	5,5187–12	5,3982–12	5,7496–12	5,4980–12	5,9587–12	6,6528–12	7,4764–12
БР-К1 ЗАР Х9У2.5	5,8696–12	5,7290–12	6,2107–12	5,8981–12	6,4474–12	7,2227–12	7,7811–12
ИИ Со-60	5,3121–12	5,2839–12	5,2573–12	4,8395–12	4,8205–12	5,0337–12	5,0295–12
ИИ Cs-137	3,0931–12	3,0747–12	3,0535–12	2,8321–12	2,8313–12	2,9930–12	3,0412–12

Спектр	ДТС	ИС-7	ИС-7*	ИК-газ	ИК-газ*	Сталь	Сталь*
Поглощенные дозы, Гр·см ² /квант							
Однонормированные поглощенные дозы (в нормировке на поглощенную дозу в ДТС)							
БР-К1 КГЗ СГИ	1,0000	0,9904	1,0084	0,9321	0,9550	1,0331	1,0747
БР-1М КВЗ ОП-1	1,0000	0,9940	–	0,9324	–	1,0145	–
БР-1М ПГЗ R200	1,0000	0,9667	–	0,9226	–	0,9930	–
БР-К1 КГЗ СФ	1,0000	0,9957	–	0,9359	–	1,0340	–
БР-К1 КГЗ НГК	1,0000	0,9874	–	0,9255	–	1,0704	–
БР-1М СКГ ПС-30	1,0000	0,9844	1,0106	0,9652	0,9838	1,1203	1,1232
ГИР-2 ОК ПГЗ R300	1,0000	0,9885	–	0,9409	–	1,0391	–
ГИР-2 СК ПГЗ R300	1,0000	0,9881	–	0,9599	–	1,0584	–
ГИР-2 СК ПГЗ R750	1,0000	0,9857	–	0,9423	–	1,0477	–
БР-К1 ЗАР Х0У2.5	1,0000	0,9801	1,0330	0,9957	1,0567	1,1711	1,2619
БР-К1 ЗАР Х3У2.5	1,0000	0,9782	1,0418	0,9962	1,0797	1,2055	1,3547
БР-К1 ЗАР Х9У2.5	1,0000	0,9761	1,0581	1,0049	1,0984	1,2305	1,3257
ИИ Со-60	1,0000	0,9947	0,9897	0,9110	0,9074	0,9476	0,9468
ИИ Cs-137	1,0000	0,9940	0,9872	0,9156	0,9153	0,9676	0,9832
Двунормированные поглощенные дозы (в нормировке на дозу в ДТС и на дозы в СГИ)							
БР-К1 КГЗ СГИ	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
БР-1М КВЗ ОП-1	1,0000	1,0037	–	1,0004	–	0,9820	–
БР-1М ПГЗ R200	1,0000	0,9761	–	0,9899	–	0,9612	–
БР-К1 КГЗ СФ	1,0000	1,0054	–	1,0041	–	1,0009	–
БР-К1 КГЗ НГК	1,0000	0,9971	–	0,9930	–	1,0361	–
БР-1М СКГ ПС-30	1,0000	0,9940	1,0022	1,0355	1,0302	1,0844	1,0451
ГИР-2 ОК ПГЗ R300	1,0000	0,9981	–	1,0095	–	1,0059	–
ГИР-2 СК ПГЗ R300	1,0000	0,9977	–	1,0299	–	1,0245	–
ГИР-2 СК ПГЗ R750	1,0000	0,9953	–	1,0110	–	1,0141	–
БР-К1 ЗАР Х0У2.5	1,0000	0,9897	1,0244	1,0683	1,1065	1,1336	1,1742
БР-К1 ЗАР Х3У2.5	1,0000	0,9877	1,0332	1,0689	1,1306	1,1669	1,2605
БР-К1 ЗАР Х9У2.5	1,0000	0,9856	1,0493	1,0781	1,1502	1,1911	1,2335
ИИ Со-60	1,0000	1,0044	0,9815	0,9775	0,9502	0,9172	0,8810
ИИ Cs-137	1,0000	1,0037	0,9790	0,9824	0,9585	0,9366	0,9148

Примечание. Данные с индексом * соответствуют расчету с фильтром.

Таблица 3

Средние энергии единичного флюенса \bar{E} для избранных γ -спектров и его СГИ-нормированные дозовые эффективности по поглощению в ДТС $D_{ДТС}$

Спектр	\bar{E} , МэВ	$D_{ДТС}$, $\frac{\text{Гр} \cdot \text{см}^2}{\text{квант}}$	Спектр	\bar{E} , МэВ	$D_{ДТС}$, $\frac{\text{Гр} \cdot \text{см}^2}{\text{квант}}$
БР-К1 КГЗ СГИ	0,979	1,0000	ГИР-2 СК ПГЗ R300	1,879	1,5366
БР-1М КВЗ ОП-1	1,033	1,0157	ГИР-2 СК ПГЗ R750	1,786	1,5143
БР-1М ПГЗ R200	1,093	1,0694	БР-К1 ЗАР Х0У2.5	1,518	1,2913
БР-К1 КГЗ СФ	1,093	1,0569	БР-К1 ЗАР Х3У2.5	1,625	1,3501
БР-К1 КГК НГК	1,625	1,4218	БР-К1 ЗАР Х9У2.5	1,764	1,4360
БР-1М СКГ ПС-30	1,577	1,3679	ИИ Со-60	1,253	1,2996
ГИР-2 ОК ПГЗ R300	1,684	1,4492	ИИ Cs-137	0,662	0,7567

Особенности перераспределения групповых флюенсов МЗГК без фильтра и в фильтре для спектров БР-К1 КГЗ СГИ, БР-1М ПГЗ СГК ПС-30, БР-К1 ЗАР Х9У2.5 наглядно иллюстрируют приведенные на рис. 8 гистограммы, отображающие доленое содержание соответствующего группового флюенса в его суммарном единичном представлении.

Данные, приведенные на рис. 9–11, наглядно иллюстрируют особенности спектральных композиций, формируемых непосредственно реакторными γ -квантами (спектр БР-К1 КГЗ СГИ, рис. 9), γ -квантами n - γ -трансформеров (в реакторной практике ВНИИЭФ это устройства, изготовленные с использованием пресс-материала из смеси полипропилена с окисью кадмия (10 % по массе); спектр БР-1М ПГЗ СГК ПС-30, рис. 10) и фоновыми γ -квантами, рождающимися при радиационном захвате замедляющихся реакторных нейтронов в бетонной защите реакторных залов (спектр БР-К1 ЗАР Х9У2.5, рис. 11).

Системное «ужесточение» в представленной графически спектральной последовательности подтверждается соответствующим ростом средних энергий перечисленных γ -спектров и относительной дозовой эффективности ДТС (\bar{E} и $D_{\text{ДТС}}$ в табл. 3 соответственно).

В первом разделе табл. 2 в формате «Гр·см²/квант» представлена генеральная выборка расчетных поглощенных доз для всех избранных спектров МЗГК и материалов дозиметрической ориентации.

В случае приоритетного использования СГИ для калибровки всех средств γ -диагностики полей излучений реакторных установок ВНИИЭФ функцию системообразующего дозиметра-монитора приобретает дозиметр ДТС (современная модификация СО ПД(ДТС)-0.05/10), с помощью которого осуществлялась первичная и пролонгируется повторная процедура аттестации СГИ специалистами ФГУП «ВНИИФТРИ».

С учетом ключевой роли детекторов ДТС в системе средств измерения дозовых характеристик полей излучений реакторных установок ВНИИЭФ была поэтапно осуществлена процедура двойной нормировки данных первого раздела табл. 2.

На первом этапе нормировки поглощенные в ДТС дозы для всех избранных спектров были приняты равными точно 1, а относительные поглощенные дозы в материалах остальных детекторов определены по соответствующим делениям на дозовые параметры ДТС. Полученные указанным образом однонормированные величины представлены во втором разделе табл. 2. Вариативность

численных величин относительно 1 характеризует различие спектральных чувствительностей избранных детекторов относительно чувствительности ДТС при условии непосредственного (прямого) измерения поглощенной дозы в каждом из рассматриваемых материалов.

Практически же при определении дозовой характеристики поля используется чувствительность конкретного детектора-дозиметра, определенная при его калибровке в СГИ в формате поглощенной дозы в воздухе, устанавливаемом, в свою очередь, по показаниям детектора ДТС при аттестации (перееаттестации) СГИ. Поэтому на втором этапе нормировки были приравнены 1 все однонормированные поглощенные дозы для спектра БР-К1 КГЗ СГИ и проведен соответствующий очевидный перерасчет всех остальных однонормированных поглощенных доз. Полученные результаты представлены в третьем разделе табл. 2.

Выборка численных величин двунормированных поглощенных доз по определению является расчетным прогнозным ожиданием различий в дозовых показаниях разноименных измерительных детекторов в рассмотренном множестве спектров при их калибровке в СГИ, обусловленных различиями спектрального происхождения (спектрально-обусловленное различие).

Анализ выборки прогнозных ожиданий показывает:

- практически значимых расхождений в показаниях детекторов-дозиметров ДТС и ИС-7 без корректирующего фильтра из свинца толщиной 0,15 мм не прогнозируется; как поглотитель фильтр крайне слабо проявляет себя в спектрах ИИ; в спектрах реакторного зала наличие фильтра на ИС-7 незначительно, но увеличивает дозовый отклик детектора;

- для детектора КНК-2 (дозовые функционалы «ИК-газ», «ИК-газ*») можно ожидать незначительного (до ~3 %) увеличения дозового отклика (относительно показаний ДТС) в спектрах γ -трансформеров и увеличения его до ~7 % без фильтра и до ~15 % в фильтрах в спектрах реакторного зала;

- характер расхождений дозовых откликов детекторов ДТС и ВЭД-2 (дозовые функционалы «Сталь», «Сталь*») аналогичен таковому для КНК-2, только существенно более выражен – прогнозируемое различие показаний ВЭД-2 без фильтра в спектрах зала приближается к уровню ~20 %, а в фильтре ~25 %; для ВЭД-2 можно ожидать занижения показаний в спектрах ИИ относительно показаний ДТС до ~10 %.

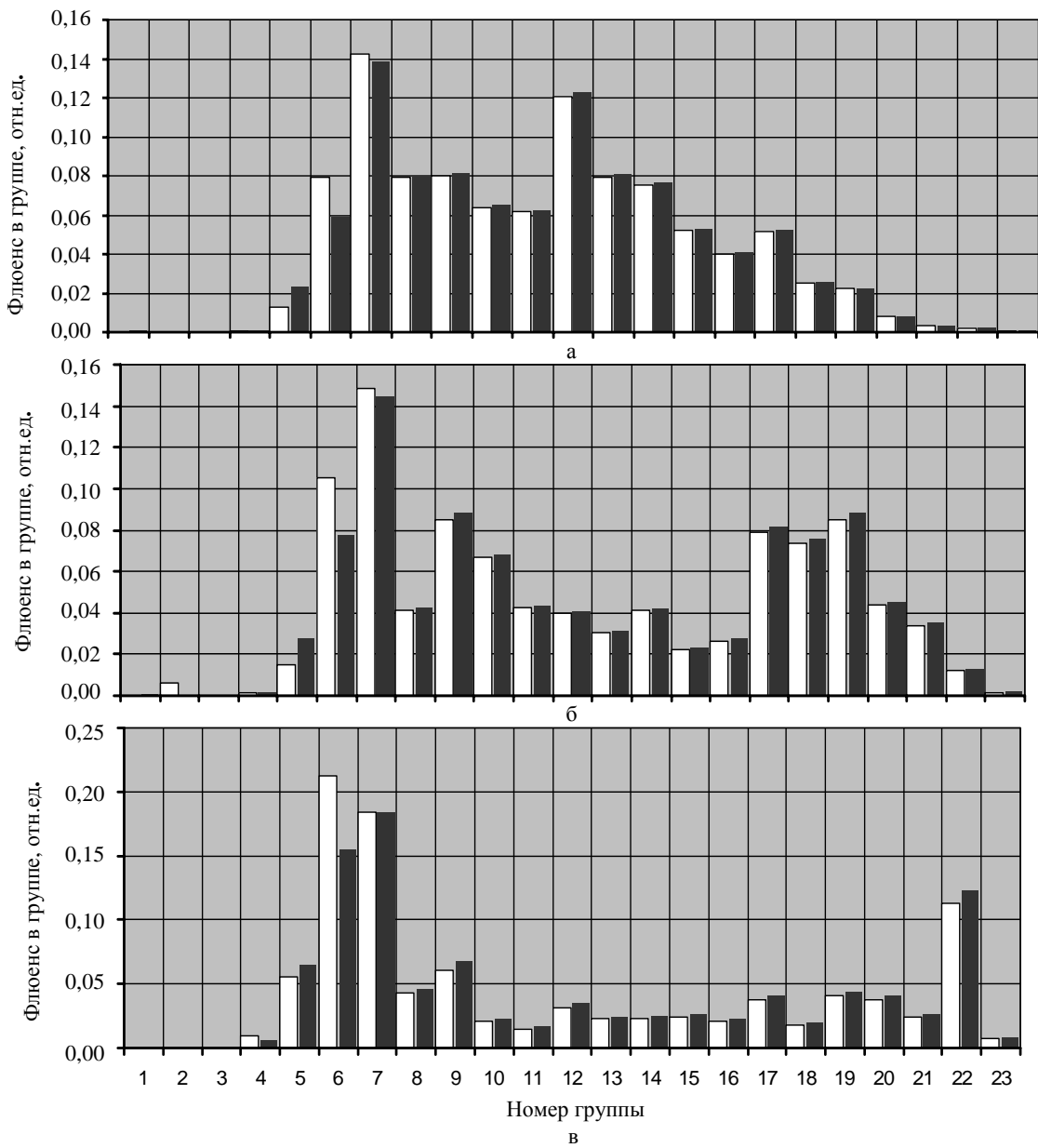


Рис. 8. Спектры без фильтра (■) и с фильтром (□): а – БР-К1 КГЗ СГИ; б – БР-1М ПГЗ СГК ПС-30; в – БР-К1 ЗАР Х9У2,5

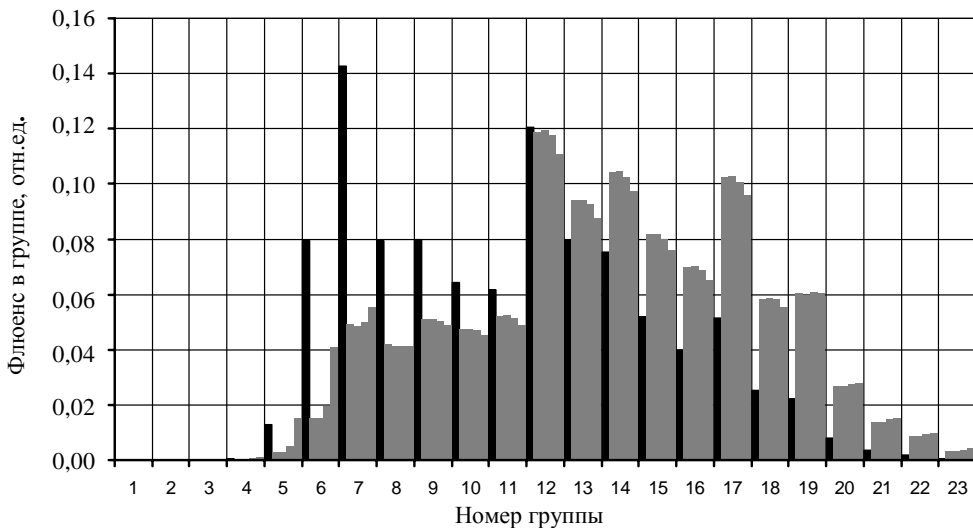


Рис. 9. Спектр в СГИ

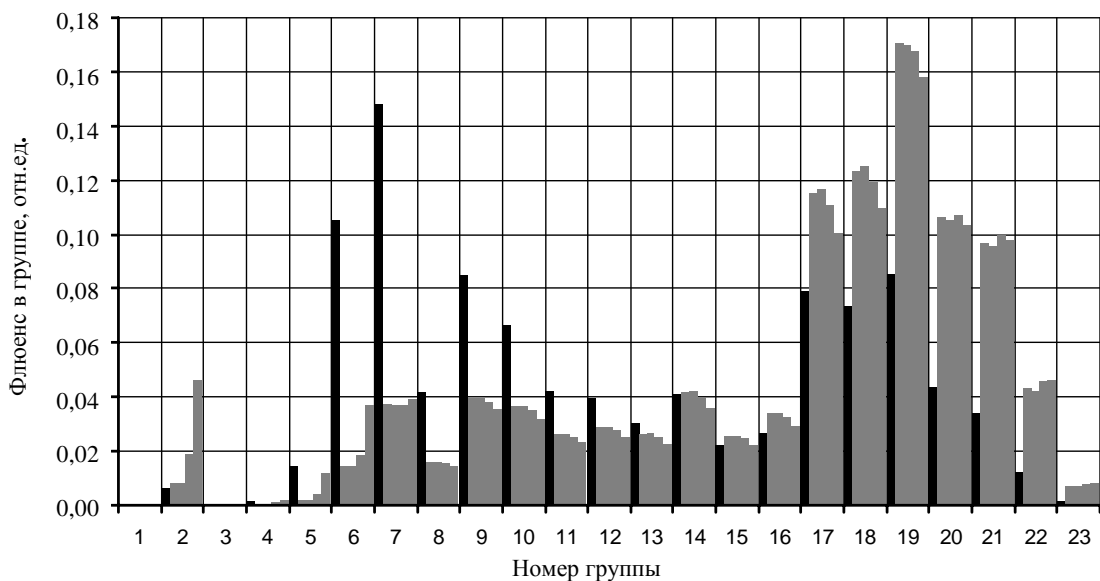


Рис. 10. Спектр в SGK ПС-30

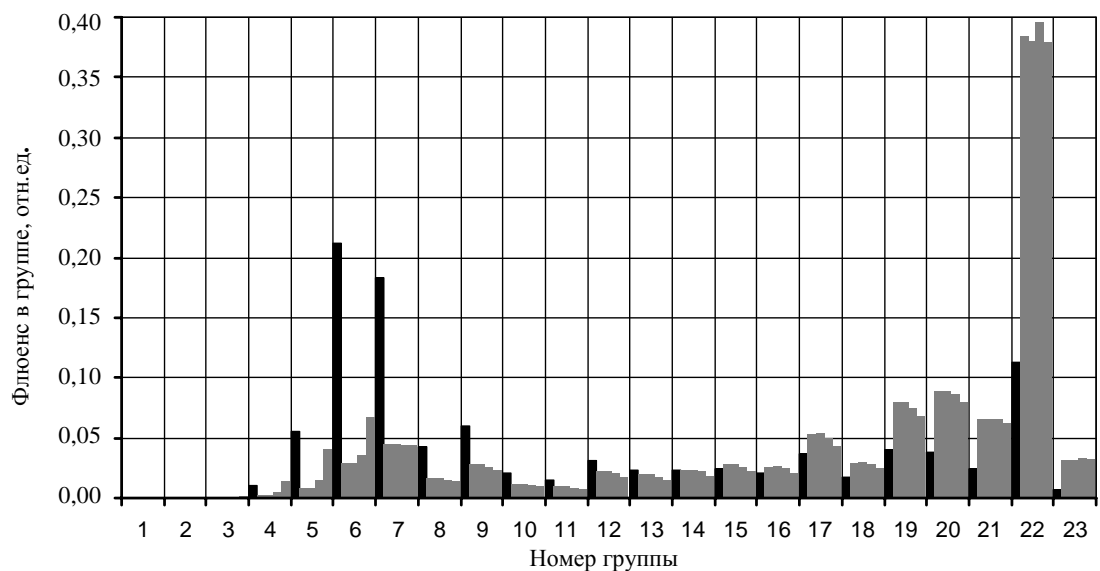


Рис. 11. Спектр в зале БР-К1

Заключение

Полученные в результате развернутого расчетного исследования прогнозные оценки влияния различий в спектральной чувствительности детекторов-дозиметров практического применения ДТС (СО ПД(ДТС)-0.05/10), ИС-7 (методика ИКС), КГК-2 и ВЭД-2 на вариативность дозовых откликов при одновременном использовании указанных разнотипных детекторов позволяют акцентировать внимание на следующих практически значимых положениях:

- при калибровке детекторов вышеперечисленных типов в СГИ БР-К1 и последующем их

использовании в варианте без корректирующего фильтра из свинца толщиной 0,15 мм в полях интенсивного радиационного нагружения реакторных установок с АЗ из металлического урана всех спектральных γ -конфигураций можно ожидать практически приемлемой согласованности их дозовых показаний как биодозиметрической, так и техnodозиметрической направленности;

- для рассмотренного множества спектров, охватывающего практически все возможные варианты γ -композиций, реализуемые в облучениях исследовательского и прикладного назначения на реакторных установках с металлической АЗ, не выявлены явные аргументы необходимости (или

хотя бы целесообразности) использования корректирующего свинцового фильтра.

Безусловно, полученные результаты следует рассматривать как достаточно надежный расчетный прогноз (в рамках константного обеспечения метода С-007), в интересах повышения качества γ -диагностики в полях излучений реакторных установок ВНИИЭФ требующий соответствующего экспериментального подтверждения.

Список литературы

1. Брикман Б. А., Генералова В. В., Крамер-Агеев Е. А., Трошин В. С. Внутрореакторная дозиметрия. Практическое руководство. – М.: Энергоатомиздат, 1985.

2. Чуляев С. В., Грудский М. Я., Артемьев В. А. Вторично-эмиссионные детекторы ионизирующих излучений. – М.: Энергоатомиздат, 1995.

3. Генералова В. В., Жанжора А. П., Кошелев А. С., Нарожный А. Т. Специализированный источник гамма-излучения, пространственно совмещенный с моделирующим опорным полем нейтронов МОП-К2 // Измерительная техника, 2010, № 1, с. 24–27.

4. Кошелев А. С., Хоружий В. Х. Пространственные, спектральные и временные характери-

сти специализированного гамма-источника реактора БР-К1 // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов, 2010, вып. 2, с. 61–68.

5. Колесов В. Ф., Кувшинов М. И., Воронцов С. В. и др. Критические стенды и импульсные реакторы РФЯЦ-ВНИИЭФ // 65 лет ВНИИЭФ. Физика и техника высоких плотностей энергий: В 2-х выпусках. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2011, вып. 1. С. 136–164.

6. Житник А. К., Донской Е. Н., Огнев С. П. и др. Методика С-007 решения методом Монте-Карло связанных линейных уравнений переноса нейтронов, гамма-квантов, электронов и позитронов // ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов, 2011, вып. 1, с. 17–24.

7. Бочвар И. А., Гимадова Т. Н., Кеирим-Маркус И. Б. и др. Метод дозиметрии ИКС. – М.: Энергоатомиздат, 1977.

Контактная информация –

Кошелев Александр Сергеевич,
ведущий научный сотрудник ИЯРФ,
РФЯЦ-ВНИИЭФ,
тел. (831 30) 3-06-87

Статья поступила в редакцию 31.08.2012.

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2012, вып. 3, с. 31–42.