



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

97-158

P16-97-158

В.Е.Алейников, В.А.Архипов, Л.Г.Бескровная,
Г.Н.Тимошенко

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ДЕТЕКТОРОВ
НЕЙТРОНОВ ПРИ РАБОТЕ В ПОЛЯХ
С ВЫСОКИМИ УРОВНЯМИ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

Направлено в журнал «Приборы и техника эксперимента»

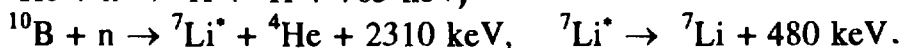
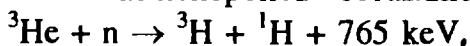
1997

1. ВВЕДЕНИЕ

Важнейшим условием обеспечения гарантий нераспространения ядерного оружия является непрерывный физический контроль за сохранностью делящихся радиоактивных веществ, их незарегистрированным перемещением и доступом к ним. Наиболее эффективно эти цели достигаются при использовании автоматизированных систем радиационного контроля в местах хранения делящихся веществ. Датчики систем должны регистрировать относительно слабые потоки нейтронов в присутствии мощного гамма-фона (до нескольких кР/час). Обычно для этих целей применяют газоразрядные счетчики нейтронов, которые просты в эксплуатации, дешевы и обладают достаточной чувствительностью к нейтронам. Однако создание систем контроля на их основе требует детальной оптимизации различных параметров.

2. ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ДЕТЕКТОРЫ НЕЙТРОНОВ

Газоразрядные пропорциональные счетчики для регистрации нейтронов используют в качестве наполнителя газовые смеси, содержащие 95-97% ^3He и Ar, CO_2 , CH_4 (гелиевые счетчики) или ^{10}B (борные счетчики), у которых сечение захвата тепловых нейтронов составляют, соответственно, 5330 и 3840 барн.



Борные счетчики изготавливаются в двух вариантах: с наполнением газообразным соединением бора (BF_3), либо с нанесением на внутреннюю поверхность счетчиков

тонкого слоя ($0,8 - 1 \text{ мг/см}^2$)

аморфного бора (естественного

или обогащенного до 80-85%

изотопом ^{10}B). Сечения обеих

реакций имеют близкую к $1/\sqrt{E}$

зависимость в широком интервале

энергий нейтронов E (рис.1).

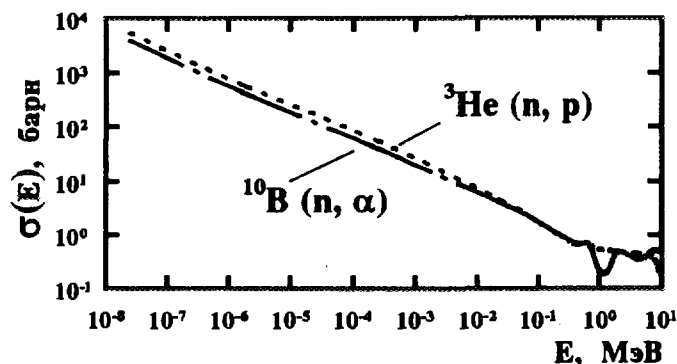
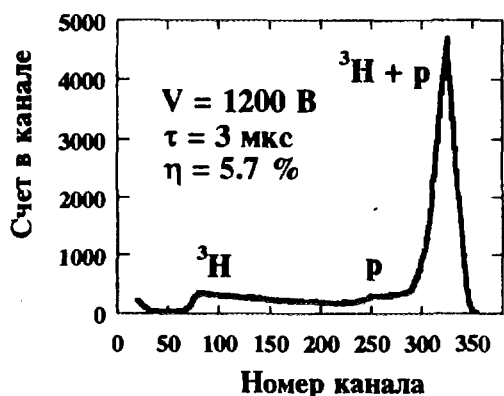


Рис.1. Энергетическая зависимость сечения реакций с ^3He и ^{10}B

Работа выполнена при поддержке МАГАТЭ. Контракт N 8507/RB/ТС.

В России производятся различные виды пропорциональных счетчиков на основе ^{10}B и ^3He , отличающихся радиатором, рабочим газом и давлением, конструкцией и чувствительностью к нейтронам. За рубежом большую известность получили газоразрядные счетчики производства фирмы Reuter-Stokes (США), выпускающей счетчики с давлением до 10 атмосфер для обеспечения высокой чувствительности при сравнительно небольших габаритах. На рис. 2 приведен аппаратурный спектр такого ^3He счетчика типа RS-P4-0810-204 при оптимальном для достижения наивысшего разрешения режиме работы. Подложка слева от пика полного энергосвечения (765 кэВ) обусловлена краевыми эффектами поглощения части энергии протона и трития в стенках счетчика. Аппаратурный спектр импульсов



счетчиков с покрытием аморфным бором имеет непрерывно спадающую форму из-за поглощения энергии ^7Li и ^4He в слое радиатора. При хорошем аппаратурном разрешении в спектре наблюдаются перегибы также соответствующие краевым эффектам на границе радиатор-газ.

Рис. 2. Аппаратурный спектр ^3He счетчика RS-P4-0810-204

Однако гелиевые и борные счетчики нейтронов не обладают необходимой избирательностью для работы в смешанных полях с высокими уровнями гамма-излучения. В России для целей нейтронного мониторинга в таких условиях был разработан специальный тип газоразрядного счетчика /1-3/, работающий в режиме коронного разряда (стационарной формы самостоятельного разряда - рис.3).

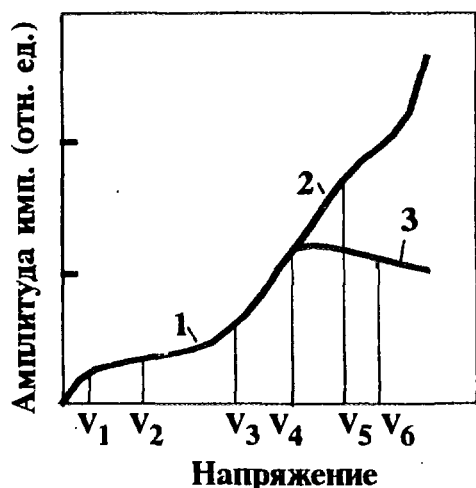


Рис. 3. Зависимость амплитуды импульса от напряжения питания газоразрядного детектора. Области работы: 1 - пропорционального счетчика ($V_2 - V_3$), 2 - ГМ-счетчика ($V_4 - V_5$), 3 - коронного счетчика ($V_4 - V_6$)

Характерной особенностью коронных счетчиков является падающая зависимость коэффициента газового усиления, а следовательно, и амплитуды импульсов от напряжения питания.

Отрицательный наклон счетной характеристики устраняется включением в цепь счетчика высокоомного сопротивления нагрузки (около 50 МОм).

Необходимо отметить, что коронные счетчики медленных нейтронов практически не известны за рубежом и не выпускаются западной промышленностью. В России коронные счетчики выпускаются как с твердым борным радиатором и наполнением смесями “негасящих” газов (гелий, неон, аргон), так и с наполнением ^3He . Напряжение зажигания короны для различных типов коронных счетчиков варьируется в пределах 500–2000 В, и плато счетной характеристики простирается на несколько сотен вольт. В рабочем режиме через счетчик протекает постоянный ток коронного разряда. Флуктуации тока создают шумы короны в аппаратурном распределении импульсов счетчика. Возникновение внутри чувствительного объема сильно ионизирующей частицы провоцирует развитие электронной лавины, амплитуда импульса тока от которой значительно превышает шумы короны и достигает значений в сотни милливольт. Коронные счетчики позволяют надежно дискриминировать гамма-кванты при существенно больших уровнях мощностей доз по сравнению с гелиевыми и борными счетчиками.

3. РЕГИСТРАЦИЯ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ И БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ

Для увеличения чувствительности детекторов с счетчиками, использующими реакции на ^3He и ^{10}B , к нейтронам широкого энергетического спектра обычно применяются водородсодержащие, как правило, полиэтиленовые замедлители. Так, для замедления в водороде нейтронов промежуточных энергий до тепловых необходимо в среднем от 10 до 15 столкновений. Энергетическая зависимость длины среднего свободного пробега нейтронов в полиэтилене показана на рис 4 /4/.

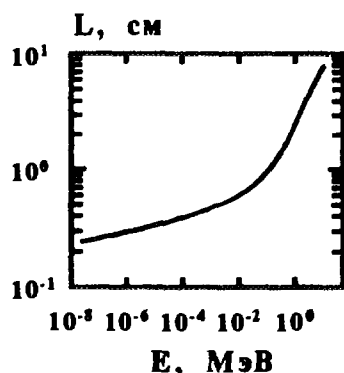
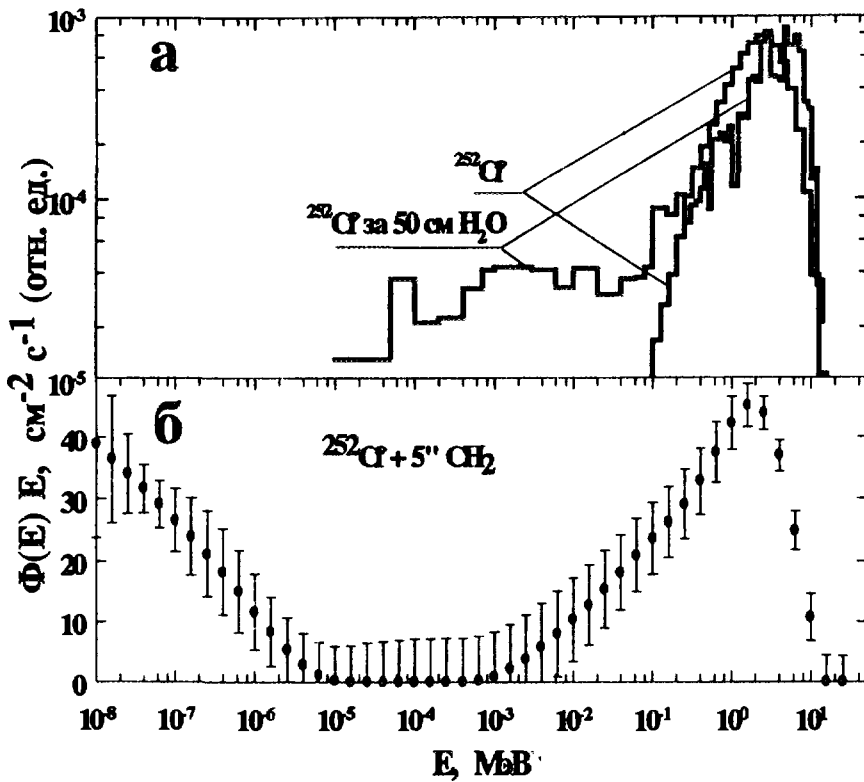


Рис. 4. Энергетическая зависимость среднего свободного пробега нейтронов в полиэтилене.

Выбор толщины слоя замедляющего материала и оптимизация канала регистрации нейтронов зависит от спектрального и компонентного состава регистрируемого излучения. Подлежащие контролю отработанные топливные элементы реакторов хранятся, как правило, в водных бассейнах. Спектр нейтронов спонтанного деления источника ^{252}Cf и реакторный спектр нейтронов деления за слоем воды толщиной 50 см /5/ приведены на рис. 5а. Для экспериментального определения оптимальной толщины полиэтиленового замедлителя, при которой достигается максимальная чувствительность нейтронного датчика, описанное выше поле нейтронов имитировалось полем источника ^{252}Cf внутри полиэтиленового замедлителя

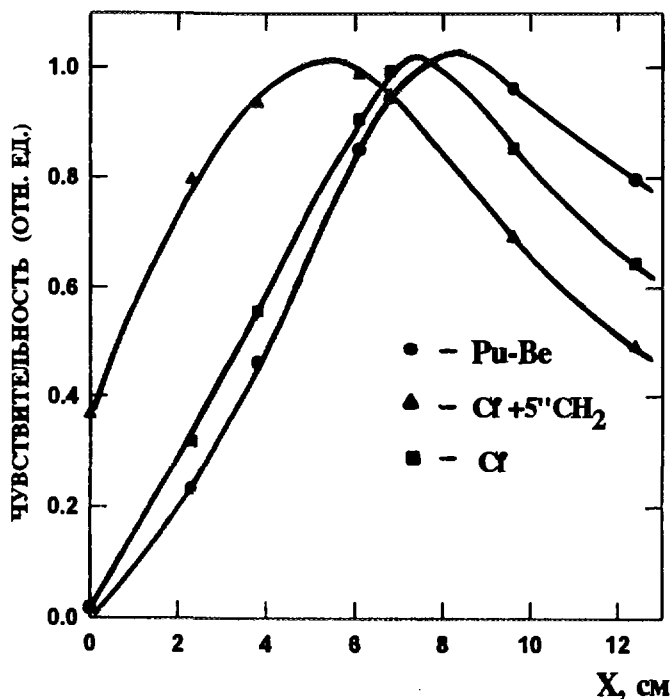


диаметром 12,7 см (5'') (см. рис.5б), входящим в состав набора опорных полей нейтронов /6/, и полями источников ^{252}Cf и $^{239}\text{Pu-Be}$.

Рис. 5.

а- спектр нейтронов ^{252}Cf источника и спектр нейтронов деления за слоем воды 50 см толщиной;
 б - спектр нейтронов опорного поля

В фиксированной точке опорного поля на градуировочной линейке при неизменном режиме работы счетчика тепловых нейтронов измерялась зависимость чувствительности датчика от толщины замедляющего слоя цилиндрического поли-



этиленового замедлителя при боковом падении нейтронов на замедлитель. Фон многократно рассеянных в помещении нейтронов учитывался путем проведения разностных измерений с полиэтиленовым конусом толщиной 40 см. Для корректного определения потока нейтронов, падающих на датчик, измерялся и учитывался эффективный радиус облучения с каждым замедлителем. Было изготовлено 6 замедлителей с толщиной стенок 2.3, 3.8, 6.1, 6.9, 9.6, 12.4 см.

Рис.6. Зависимость чувствительности нейтронного датчика с детектором медленных нейтронов от толщины замедляющего слоя полиэтилена

На рис. 6 приведена зависимость чувствительности датчика от толщины стенки замедлителя в поле источника $^{252}\text{Cf} + 5'' \text{CH}_2$ (средняя энергия нейтронов 0,93 МэВ), а также в полях ^{252}Cf и $^{239}\text{Pu}-\text{Be}$ источников нейтронов с несколько большей средней энергией (2,1 и 4,2 МэВ соответственно). Видно, что с ростом "жесткости" поля положение максимума функции чувствительности датчика смещается в сторону увеличения толщины замедляющего слоя. Так как спектры нейтронов мягкого опорного поля и ^{252}Cf источника являются, по-существу, крайними оценками реальных спектров, оптимальная толщина замедлителя составляет 6 – 6,5 см.

4. ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СЧЕТЧИКА

Оптимизация постоянной времени формирования импульса τ газоразрядного счетчика зависит от области его применения и уровня сопутствующего гамма-фона. Изменение постоянной времени меняет форму аппаратурных спектров счетчиков от нейтронов (особенно для ^3He счетчиков, см рис.7). Если примесь гамма-квантов невелика, а потоки нейтронов значительны, то для улучшения временных характеристик измерительной системы целесообразно выбирать $\tau \approx 0,2-0,5$ мкс, несмотря на ухудшение аппаратурного разрешения. Следует отметить, что с ростом габаритов счетчика и давления газа растет минимально возможное значение τ . Давление газа и размеры счетчика определяют чувствительность счетчика к нейтронам и аппаратурное разрешение ^3He счетчика по пику 765 кэВ.

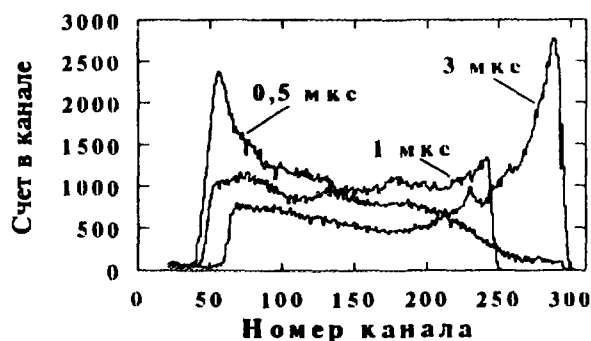


Рис.7. Зависимость аппаратурного спектра импульсов счетчика СНМ-18 (пропорциональный режим) от постоянной времени формирования τ

Эффективность регистрации тепловых нейтронов промышленно выпускаемыми ^3He счетчиками составляет 50 – 96% в зависимости от их конструкции. Отклик ^3He счетчика к гамма-квантам обусловлен выходом из стенок счетчика электронов комптоновского рассеяния, причем при высоких энергиях гамма-квантов пробег электронов в газе может превышать диаметр счетчика. Общий счет от гамма-квантов пропорционален общей площади внутренней поверхности счетчика, а амплитуды импульсов от гамма-квантов примерно пропорциональны произведению диаметра счетчика на давление газа. Импульсы тока ^3He счетчика - экспоненциально спадающие с $\tau \approx 0,6$ мкс. Аппаратурная линия от гамма-квантов обусловлена многократным наложением импульсов от них и зависит от уровня мощности дозы гамма-квантов.

С увеличением их количества растет кратность возможных наложений импульсов и спектр от гамма-квантов накладывается на спектр импульсов от нейтронов. По этой причине уменьшение τ до 0,2–0,5 мкс не даст желаемого эффекта при регистрации нейтронов в мощных полях гамма-излучения. Максимальная чувствительность системы к нейтронам в условиях высокого гамма-фона достигается при наименьшем значении порога дискриминации гамма-квантов, сопровождающейся потерей доли событий от нейтронов. Поэтому для обеспечения максимальной чувствительности нейтронных датчиков, слабо зависящей от уровня мощности дозы гамма-квантов в диапазоне от нескольких сотен до нескольких тысяч Р/час, необходим в первую очередь правильный выбор типа газоразрядного счетчика и оптимизация защиты датчика от гамма-квантов с учетом ослабления потоков нейтронов в защите.

Исследование влияния гамма-фона на работу датчиков проводилось на терапевтической гамма-установке "РОКУС-М" клиничко-физического комплекса ЛЯП с активностью гамма-источника ^{60}Co 3,5 кКи. Исследовались два счетчика производства фирмы Reuter-Stokes: счетчик типа RS-P4-0810-204 длиной 30,5 см и диаметром 2,5 см, наполненный ^3He под давлением 10 атм., и счетчик типа RS-P7-0812-117 длиной 35 см и диаметром 2,5 см, наполненный газовой смесью Ar-CO_2 под давлением 20 см Hg и с твердым покрытием ^{10}B (92%). Из выпускаемых в России нейтронных счетчиков были выбраны два типа ^3He коронных счетчика - СММ-32 с давлением 0,5 атм., диаметром 1,8 см и длиной 32,3 см и счетчик СММ-18 ($^3\text{He} + 3\% \text{Ar}$) с давлением 4 атм., диаметром 3,2 см и длиной 32 см. Счетчик СММ-18 допускает работу как в пропорциональном, так и в коронном режимах. Счетчики помещались внутрь цилиндрического полиэтиленового замедлителя с толщиной стенки 6,4 см и длиной 39 см. Импульсы со счетчиков RS транслировались через размещенный непосредственно у счетчика зарядо-чувствительный предусилитель на

базовый усилитель и далее на дифференциальный дискриминатор (ORTEC). Для коронных счетчиков в подключении предусилителя необходимости нет. Постоянные времени формирования импульсов усилителем выбраны для RS-P4-0810-204 ^3He счетчика - 2 мкс, для RS-P7-0812-117 ^{10}B -счетчика и коронных счетчиков - 1 мкс. Для подбора режима питания измерялись счетные характеристики счетчиков (см. рис. 8).

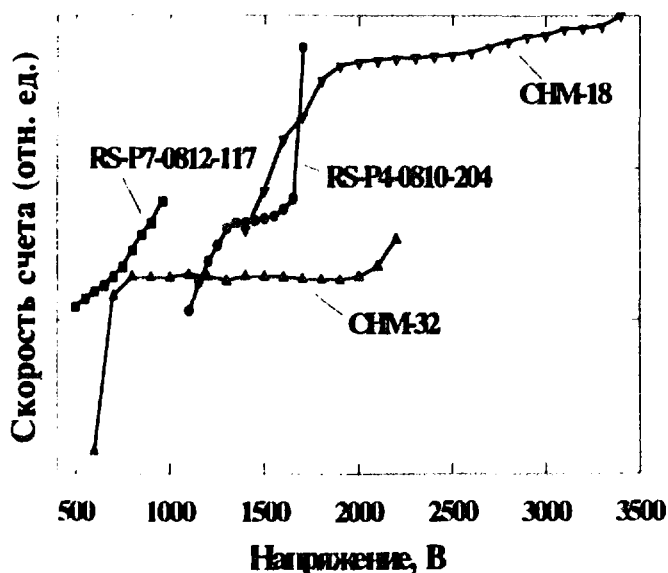
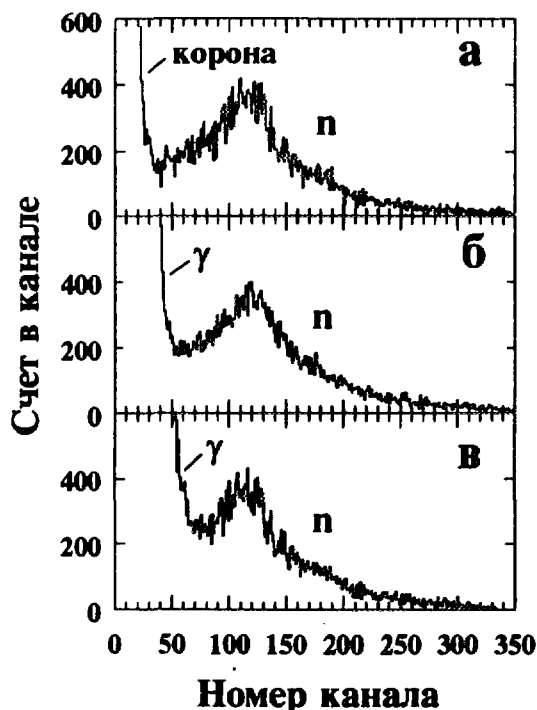


Рис. 8. Счетные характеристики газоразрядных счетчиков

Абсолютные значения чувствительности счетчиков без замедлителя и с замедлителем оптимальных размеров измерялись на градуировочной линейке в поле аттестованного источника ^{252}Cf второго разряда с выходом нейтронов $0.87 \cdot 10^7 \pm 6\%$ н/с и в опорном поле, созданном на базе этого источника. Измерения проводились при минимальных значениях порогов дискриминации импульсов счетчиков, соответствующих уровням режески собственных и аппаратурных шумов. В таблице 1 приведены максимально достижимые чувствительности счетчиков к нейтронам различных спектров в отсутствие гамма-фона¹.

Таблица 1. Чувствительности (имп·см²/н) исследуемых счетчиков в различных полях нейтронов

| Тип счетчика \ Поле | Cf | Cf+CH ₂ (5") | Cf+CH ₂ (5") счетчик в замедлителе |
|---------------------|------|-------------------------|--|
| RS-P4-0810-204 | 3,92 | 11,9 | 15,90 |
| СНМ-18 | 3,23 | 9,69 | 15,27 |
| RS-P7-0812-117 | 0,48 | 1,40 | 3,67 |
| СНМ-32 | 0,23 | 0,63 | 1,72 |

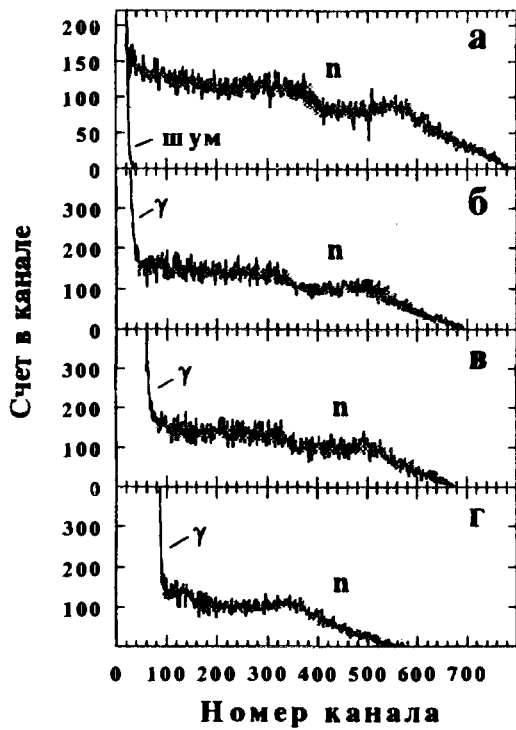


Облучение на установке "РОКУС-М" проводилось при четырех значениях мощности экспозиционной дозы гамма-квантов 1740, 363.6, 22.4, 3.5 Р/час. Две последних экспозиции проводились при экранировании нейтронного датчика свинцовыми поглотителями толщиной 5 и 10 см. Неравномерность поля облучения по длине датчиков не превышала 6%. Измерения мощности экспозиционной дозы проводились с помощью малогабаритной ионизационной камеры с точностью калибровки не хуже 0,8%. Нейтрон-

Рис. 9. Спектр импульсов коронного счетчика СНМ-32. Время экспозиции - 200 с, напряжение - 1000 В, $\tau = 1$ мкс.

а - при естественном гамма-фоне; б - при мощности дозы гамма-квантов $363,6 \pm 5,4$ Р/ч; в - при мощности дозы гамма-квантов 1740 ± 26 Р/ч.

¹ При естественном уровне гамма-фона 10 мкР/час.

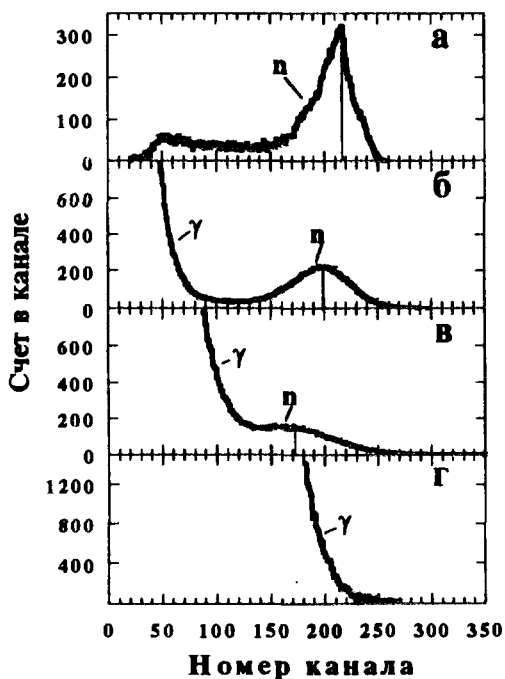


ное поле создавалось источником $^{239}\text{Pu-Be}$. На рис. 9 – 11 приведены аппаратные спектры счетчиков при различных уровнях мощности экспозиционной дозы гамма-квантов.

Рис. 10. Спектр импульсов борного счетчика RS-P7-0812-117. Время экспозиции – 300 с, напряжение – 730 В, $\tau = 2$ мкс.

а - при естественном гамма-фоне; б - при мощности дозы гамма-квантов 3.5 ± 0.1 Р/час; в - при мощности дозы гамма-квантов 22.4 ± 0.7 Р/час; г - при мощности дозы гамма-квантов 363.6 ± 5.4 Р/час

Видно, что коронный счетчик СММ-32, обладающий сравнительно низкой абсолютной чувствительностью к нейтронам, демонстрирует высокую избирательность при работе в полях гамма-квантов с мощностью экспозиционной дозы около 2 кР/час. Уровень надежной режекции гамма-квантов при этом примерно в два раза превышает уровень режекции шумов короны.

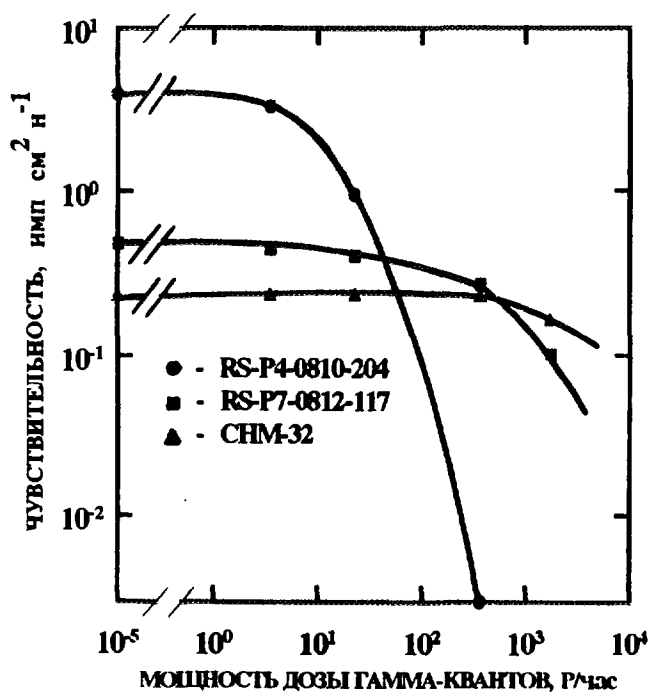


Борные пропорциональные счетчики можно использовать при мощностях экспозиционной дозы гамма-квантов до нескольких сотен Р/час. При мощности дозы 1740 ± 26 Р/час спектр наложенных импульсов от гамма-квантов перекрывает большую часть аппаратного распределения импульсов от нейтронов, что приводит к существенному снижению чувствительности счетчика и не-

Рис. 11. Спектр импульсов He^3 счетчика RS-P4-0810-204. Время экспозиции – 200 с, напряжение – 1450 В, $\tau = 2$ мкс. а - при естественном гамма-фоне; б - при мощности дозы гамма-квантов 3.5 ± 0.1 Р/час; в - при мощности дозы гамма-квантов 22.4 ± 0.7 Р/час; г - при мощности дозы гамма-квантов 1740 ± 26 Р/час.

стабильности его работы. Чувствительность пропорциональных счетчиков на основе ^3He в значительной степени зависит от уровня гамма-фона и предельное значение мощности дозы гамма-квантов составляет не более 10-20 Р/час. Снижение чувствительности счетчиков, обусловленное наложением спектрального распределения импульсов от гамма-квантов на спектр импульсов от нейтронов усугубляется также эффектом снижения коэффициента газового усиления счетчиков из-за протекания добавочного тока и искажения электрического поля. Это приводит к уменьшению амплитуд импульсов, вызванных нейтронами. Наиболее отчетливо этот эффект заметен у He^3 счетчика на рис.11, где отмечены положения центров тяжести распределений импульсов от нейтронов при разных значениях мощностей доз гамма-квантов. У коронных счетчиков данный эффект проявляется сильнее при малых токах короны.

Результаты испытаний показали, что если условия работы счетчиков в составе измерительной системы таковы, что необходимо регистрировать относительно слабое нейтронное излучение на фоне гамма-излучения в несколько тысяч Р/час, то коронные счетчики конкурентов не имеют. Несмотря на более высокую чувствительность пропорциональных счетчиков по сравнению с коронными в отсутствие гамма-фона, скорость снижения чувствительности с ростом мощности дозы гамма-квантов у них существенно выше и не может быть компенсирована

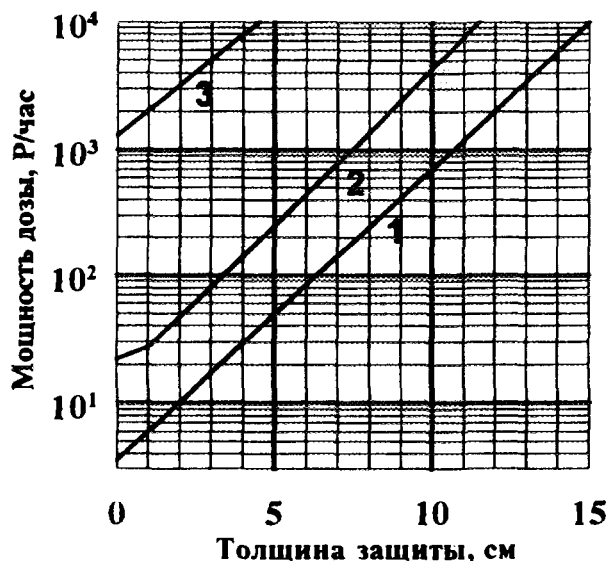


оптимизацией параметров измерительной системы. При уровнях мощности дозы несколько сотен Р/час выгодно использовать коронный счетчик СНМ-18, чувствитель-

Рис.12. Зависимость чувствительностей счетчиков к нейтронам от экспозиционной дозы гамма-квантов ^{60}Co .

ность которого к нейтронам примерно в 5 раз выше, чем у СНМ-32. Другим существенным преимуществом коронных счетчиков является большая амплитуда импульсов, что позволяет передавать сигналы с них без пред-

варительного усиления. Радиационная стойкость же предусилителя намного ниже, чем радиационная стойкость счетчиков.



5. ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАЩИТЫ

Дополнительный ресурс по мощности дозы гамма-квантов может быть получен при использовании свинцовой защиты счетчиков. Толщина свинцовой

Рис.13. Номограмма для расчета толщины свинцовой защиты счетчиков, при которой чувствительность снижается в 1,2 раза.

1 - счетчик RS-P4-0810-204:

2 - счетчик RS-P7-0812-117:

3 - счетчик СНМ-32

защиты должна быть оптимизирована таким образом, чтобы ослабление потока нейтронов в защите компенсировалось увеличением чувствительности счетчика за счет подавления фона гамма-квантов. На рис. 13 приведены номограммы для оценки необходимой толщины свинцовой защиты счетчиков в зависимости от мощности экспозиционной дозы гамма-квантов. Номограмма рассчитана таким образом, что при использовании свинцовой защиты чувствительность счетчиков к нейтронам составит примерно 80% от ее максимально возможного значения в отсутствие гамма-фона. Видно, что толщина защиты 5 см обеспечит надежную работу коронного счетчика в полях гамма-квантов до 10 кР/час, ^{10}B счетчика RS-P7-0812-117 – до 0,3 кР/час, ^3He счетчика RS-P4-0810-204 – до 50 Р/час.

ЛИТЕРАТУРА.

1. Ю.М.Толченов, В.Г.Чайковский. ПТЭ, 1963, N6, стр. 5-12.
2. Ю.М.Толченов. ПТЭ, 1967, N3, стр. 52-55.
3. Е.К.Малышев и др. "Газоразрядные детекторы для контроля ядерных реакторов", Москва, Энергоатомиздат, 1991, стр. 75-101.
4. Л.С.Горн, Б.И.Хазанов. Избирательные радиометры. Москва, Атомиздат, 1975.
5. Griffith R.V., Palfalvi J., Madhvanath U. Compendium of Neutron Spectra and Detector Responses for Radiation Protection Purposes. Technical reports series N 318, IAEA, Vienna. 1990.
6. Aleinikov V.E. et al., Rad. Prot. Dosim., 1994, Vol. 54, N 1, p.57-59.