

3. ИОНИЗАЦИОННЫЕ КАМЕРЫ

Ионизационными камерами регистрируют и медленные, и быстрые нейтроны. Назначение ионизационной камеры определяется типом вещества, взаимодействующего с нейтронами, и электрической схемой включения. В зависимости от электрической схемы включения, ионизационные камеры работают в токовом или импульсном режимах.

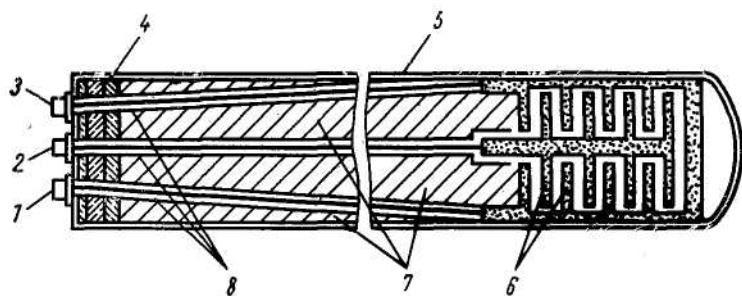


Рис. 1. Многоэлектродная ионизационная камера: 1 - высоковольтный вывод; 2 - вход азота и вывод сигнала; 3 - выход азота и высоковольтный вывод; 4 - изоляция; 5 - слой сплава Mg - Al; 6 - графитовые пластины, покрытые бором; 7 - графитовое наполнение; 8 - соединительные проводники из изолированного свинца.

Токовые камеры для регистрации медленных нейтронов наполняют воздухом. Внутреннюю поверхность цилиндрического катода покрывают слоем ^{10}B . Такую токовую камеру называют борной. Толщина бора δ не должна превышать пробега α -частицы с энергией 1,47 МэВ, образующейся в реакции $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$. При толщине $\delta > R_\alpha$ часть слоя, находящегося вблизи корпуса камеры, не участвует в регистрации нейтронов, так как α -частицы из него не попадают в рабочий объем камеры и не производят ионизации газа. Более того, эта часть слоя бора производит ненужное ослабление подающего на камеру потока нейтронов. Чувствительность камеры увеличивают путем разветвления поверхности, покрытой бором. Этого достигают конструированием многоэлектродной ионизационной камеры (**Рис. 1**), смежные электроды в которой разделены газовым промежутком, равным приблизительно пробегу α -частицы в газе. Конструктивные элементы камеры должны изготавливаться из материалов, которые слабо активируются нейтронным излучением. Это одно из условий выбора конструкционного материала для избежания высокой наведенной активности.

Оценим величину ионизационного тока в борной токовой камере. Пусть за 1 сек в боре поглощается один нейтрон и в рабочий объем камеры выходит α -частица с энергией 1,47 МэВ. Если α -частица полностью тормозится в газе, то образуется $N = \frac{1,47 \cdot 10^6}{\varepsilon}$ пар ионов. Учитывая, что энергия образования пары ионов в воздухе $\varepsilon = 32$ эВ, находим ионизационный ток в такой камере:

$$J_1 = eN = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,47 \cdot 10^6}{32} = 0,735 \cdot 10^{-14} \text{ а.} \quad (14)$$

Ток, образуемый в камере потоком медленных нейтронов Φ , равен

$$J = J_1 \Phi S p, \quad (15)$$

где S - поверхность камеры, покрытая бором; p — доля нейтронов, поглотившихся в боре. При $S = 1 \text{ см}^2$ и $p = 1$ атм для потоков $\Phi = 10^4 - 10^{10}$ нейтрон/(см²·сек) значение ионизационного тока J лежит в пределах $10^{-10} - 10^{-4}$ а. Такой ионизационный ток измеряют разнообразными электрометрами.

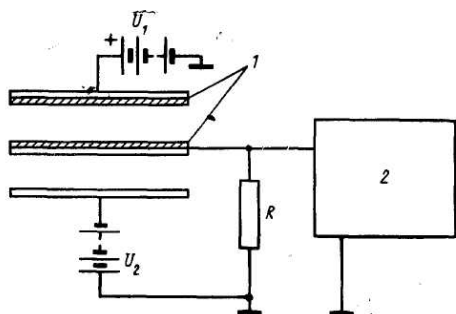


Рис. 2. Компенсационная ионизационная камера: 1 - покрытие бором; 2 - электрометр.

В показания борной камеры дают вклад и γ -кванты. Они образуют в конструктивных элементах камеры электроны и позитроны, которые, попадая в рабочий объем камеры, вызывают ионизацию газа. Отделить ионизационные эффекты от нейтронов и от γ -квантов в токовых камерах довольно трудно. Ионизационный эффект от γ -квантов снижается путем уменьшения газовых промежутков между электродами камеры до величины, равной пробегу α -частицы. В этом, случае пробеги электронов и позитронов не укладываются в них и доля энергии, поглощенная в газе, становится незначительной.

Ионизационный эффект от γ -квантов полностью устраняется в компенсационной камере (**Рис. 2**). Она состоит из двух одинаковых по размерам и конструкции токовых камер, одна из которых является борной. Обе камеры включаются в электрическую схему с общим нагрузочным сопротивлением R . Токи, возникающие в обычной и борной камерах, протекают через сопротивление R в противоположных направлениях. Так как ионизационные эффекты от γ -квантов в обеих камерах равны, то на сопротивлении

выделяется напряжение ΔU , соответствующее разностному эффекту токов в камерах. Напряжение ΔU измеряют ламповым вольтметром. Разностный эффект характеризуется поглощением нейтронов в боре и пропорционален потоку нейтронов Φ :

$$J = (J_n + J_\gamma) - J_\gamma = J_n. \quad (16)$$

где J_n и J_γ - токи в камере, обусловленные нейтронами и γ -квантами соответственно.

Борная токовая камера характеризуется малой чувствительностью к быстрым нейтронам, так как сечение (n, α) -реакции на боре в быстрой области энергии нейтронов уменьшается до 0,5-0,1 барн. Поэтому для регистрации потоков быстрых нейтронов используют реакцию упругого рассеяния нейтронов на ядрах водорода. Стенки ионизационной камеры изготавливают из материала с большим содержанием водорода. Протоны отдачи, образованные нейтронами, выходят из стенки в рабочий объем камеры и производят ионизацию. Водородсодержащий материал может быть расположен и внутри камеры в виде отдельного радиатора. Снижение тока от γ -квантов осуществляется теми же методами, что и в борной ионизационной камере.

Наряду с токовыми камерами нейтроны регистрируются и импульсными ионизационными камерами. В этих камерах удастся лучше разделить импульсы от нейтронов и γ -квантов. Кроме того, ни амплитуде импульса в некоторых случаях получают информацию об энергии нейтронов. Быстрые нейтроны регистрируются водородной импульсной камерой по протонам отдачи. Пробег протонов и электронов в газе при одинаковых условиях сильно различаются. Поэтому импульсы от электронов, пробег которых не укладывается в рабочем объеме камеры, невелики по амплитуде по сравнению с импульсами от протонов и легко могут быть дискриминированы. Таким путем снижается влияние γ -фона при измерении нейтронов импульсной ионизационной камерой.

Пробеги протонов при давлении газа, равном 1 атм, все же велики. Ионизационные камеры, наполненные водородом, должны иметь большие размеры, чтобы пробег протона полностью укладывался в рабочем объеме. Для уменьшения геометрических размеров камеру наполняют водородом под давлением несколько атмосфер. Тормозную способность газа камеры по отношению к протонам можно увеличить добавлением некоторого количества инертных газов (криптон, ксенон). Такие добавки уменьшают пробег протонов, не ухудшая импульсных характеристик камеры. Так, пробег протонов с энергией 2 МэВ в камере с парциальными давлениями криптона 5 атм и водорода 4 атм составляет всего 1 см.

Развитие атомной промышленности и атомной энергетики потребовало создания нейтронных ионизационных камер для регистрации больших плотностей потоков в системах управления и защиты ядерных энергетических установок и в исследовательских реакторах. Наибольшее применение в промышленности получили ионизационные камеры нейтронов с твердым борным радиатором и ионизационные камеры деления, содержащие в качестве радиатора делящиеся изотопы урана. Они обладают высокой стабильностью при регистрации больших нейтронных потоков.



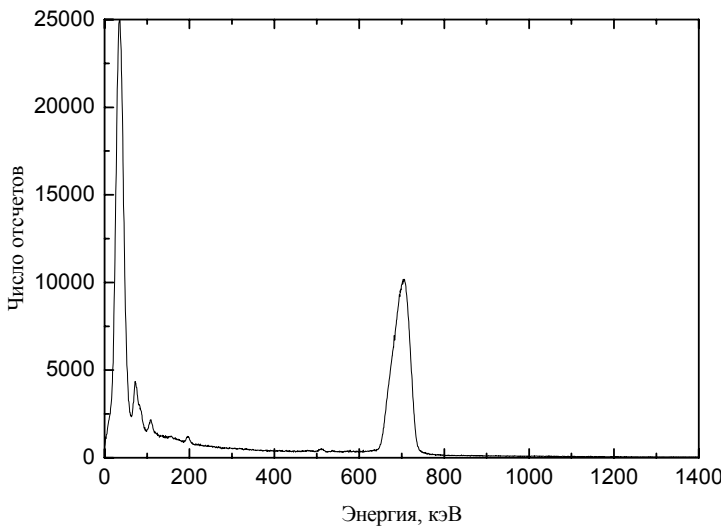
Хорошие характеристики имеет импульсная ионизационная камера для медленных нейтронов, наполненная изотопом гелия ^3He . Большое сечение реакции $^3\text{He}(n, p)\text{T}$, хорошие свойства гелия как газонаполнителя позволяют получить камеру с отличными характеристиками. Импульсную камеру наполняют ^3He до давления 10 атм. Сферическая камера диаметром 100 мм имеет эффективность около 100% для тепловых нейтронов. Сферическая форма камеры наиболее удобна для наполнения газом под большим давлением. Разработаны также и цилиндрические конструкции камер с газом ^3He . Импульсы, вызванные γ -квантами, в камере с ^3He значительно меньше импульсов от нейтронов. Выделение импульсов от нейтронов осуществляется с помощью амплитудных дискриминаторов.

При регистрации нейтронов обычно стремятся уменьшить чувствительность нейтронного детектора к

гамма-излучению. Но иногда возникают ситуации (например, в космофизике, когда необходимо одним детектором регистрировать и γ -излучение и нейтроны.

Рис. 3. Спектр, измеренный ксеноновым детектором от Pu-Be источника нейтронов.

Гамма-спектрометр на основе цилиндрической ионизационной камеры (объем 200 см³), наполненной сжатым ксеноном (плотность 0,4 г/см³, ксенон под большим давлением резко увеличивает тормозную способность к протонам – атомам отдачи, возникающим при реакции тепловых нейтронов с ¹³¹Xe и ³He, добавленному к ксенону), обладающий хорошим энергетическим разрешением и высокой стойкостью к радиационным



и температурным воздействиям, может быть использован для одновременной регистрации потоков тепловых нейтронов и γ -квантов. При облучении спектрометра тепловыми нейтронами наблюдается гамма-линия с энергией 668 кэВ, возникающая в результате взаимодействия нейтронов с изотопом ксенона ¹³¹Xe. Для значительного увеличения чувствительности ксенонового детектора к нейтронам в его рабочее вещество вводят ³He, взаимодействие которой с нейтронами протекает по реакции (17):

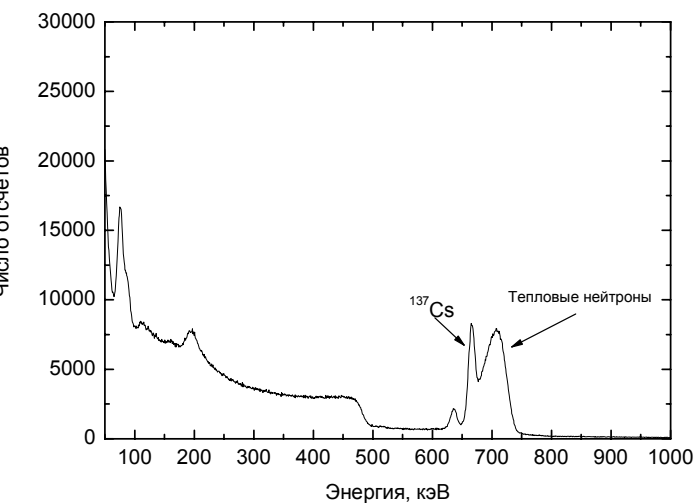


Энергетический выход данной реакции составляет 765 кэВ, а сечение захвата тепловых нейтронов атомами ³He равно 5327 барн. На спектре (Рис. 1) видна линия, которая является результатом реакции (1) с энергетическим разрешением 7%.

Этот же детектор может быть использован для регистрации γ -излучения. γ -Спектр от ¹³⁷Cs зарегистрированный детектором, приведен на Рис. 4. Линии от гамма-квантов и нейтронов можно разделить, что говорит о способности ксенонового детектора регистрировать как гамма-кванты, так и нейтроны.

Рис. 4. Спектр, измеренный ксеноновым детектором от источника гамма-квантов ¹³⁷Cs и Pu-Be источника нейтронов.

Данная аппаратура предназначена для оперативного обнаружения и идентификации гамма-нейтронного излучения от различных объектов, используемых в ядерно-физических исследованиях и атомной энергетике. Её используют для технологического контроля при переработке ядерного топлива, для



реакторной диагностики, таможенного и других видов контроля источников нейтронного и гамма-излучения, в частности, делящихся материалов. Аппаратура обладает высоким энергетическим разрешением и обеспечивает возможность регистрации гамма-излучения в широком энергетическом диапазоне (50-5000 кэВ). Именно благодаря высокому энергетическому разрешению детектор эффективно применяют для идентификации радионуклидов и оценки их количественного состава. Наряду с регистрацией γ -излучения измерение потоков нейтронов, испускаемых делящимися материалами, позволяет надежно обнаруживать и идентифицировать их.

На базе счётчиков наполненных ³He (реакция 1) строятся большие детекторы нейтронов, используемые при исследовании взаимодействия высокоэнергетичных элементарных частиц с веществом. В качестве примера можно привести детектор нейтронов LD, изготовленный на базе промышленного ³He счетчика LND2517 с толстым двухслойным замедлителем из полиэтилена с внутренним кадмиевым экраном. Наибольшая чувствительность LD приходится на интервал энергий 1,0 кэВ – 1,0 МэВ. Время накопления детектора меняться по цифровой команде от 12 сек до 1 часа.

Напомним, что в настоящее время имеются различные типы γ -детекторов. Среди них наиболее распространенными являются полупроводниковые на основе сверхчистого германия и сцинтилляционные гамма-детекторы. Первые обеспечивают рекордное энергетическое разрешение (2 кэВ для гамма-линии 662

кэВ), но они могут функционировать лишь при криогенных температурах. Это обстоятельство существенно ограничивает область применения этих гамма-детекторов. Кроме того, стоимость германиевых детекторов очень высока, что связано с дорогостоящим процессом выращивания сверхчистых кристаллов германия. Что касается сцинтилляционных детекторов, то, обладая высокой эффективностью регистрации γ -квантов, они обеспечивают энергетическое разрешение 60-80 кэВ. Это означает, что их спектрометрические возможности не позволяют надежно идентифицировать большинство радионуклидов. Существует еще один класс гамма-детекторов, в которых в качестве рабочего вещества используется сжатый ксенон. С точки зрения энергетического разрешения они занимают промежуточное положение между германиевыми и NaI детекторами и обеспечивают разрешение 13-16 кэВ. Современные нейтронные детекторы (^3He – счетчики, пластиковые сцинтилляторы, камеры деления и т.д.) способны регистрировать нейтронное излучение в различных энергетических диапазонах. Для определения энергетического спектра нейтронного излучения применяются комбинированные нейтронные детекторы. Для измерения спектра в нем используется эффект поглощения нейтронов в различных средах, который зависит от энергий нейтронов.

Все упомянутые выше детекторы предназначены для регистрации либо γ -квантов, либо нейтронов. Лишь гамма-нейтронный детектор, у которого в качестве рабочего вещества используется смесь сжатого ксенона и изотопа гелия ^3He . Он объединяет в себе спектрометрические свойства ксеноновых детекторов и нейтронных счетчиков на основе ^3He , что обеспечивает регистрацию гамма-излучения с высоким энергетическим разрешением (13-16 кэВ) и, в тоже время, эффективное измерение нейтронных потоков.

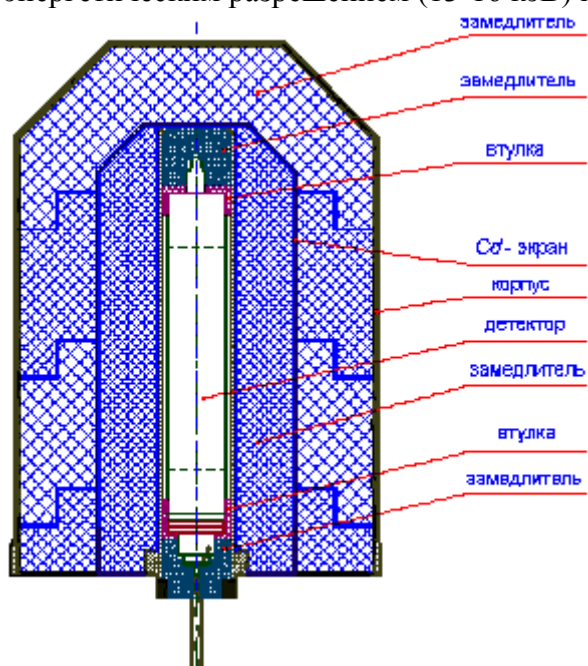


Рис. 5. Большой детектор быстрых нейтронов на базе ^3He - счётчика