

Выключатель для нейтронов

В. Е. АБЛЕСИМОВ, С. Б. ДЗЮБА, Ф. Г. ШАЛАТА

Коммутируемый изотопный источник нейтронов может включаться и выключаться подобно ускорительному генератору нейтронов, но не требует сопутствующего ускорителю источника высокого напряжения, вакуумной техники, контролирующей аппаратуры.

Немного истории. К моменту открытия нейтрона в атомной физике уже были известны альфа-, бета- и гамма-излучение. Нейтрон был открыт в 1932 г. сэром Джеймсом Чедвиком при изучении взаимодействия альфа-излучения с ядром бериллия – в реакции (α, n) на Ве. Очень близки были к открытию и фактически наблюдали нейтроны немецкие физики Вальтер Боте и Ханс Беккер, которые в 1930 г. обнаружили, что при бомбардировке некоторых легких элементов, в частности Ве, альфа-частицами возникает излучение, обладающее особой проникающей силой, которое они приняли за гамма-лучи. Французы Ирэн и Фредерик Жолио-Кюри в январе 1932 г. сообщили о том, что «бериллиевое» излучение выбивает протоны из водородсодержащих веществ, например, из парафина.

Заслуга Чедвика – объяснение экспериментов, исходя из гипотезы существования нейтральной частицы (нейтрона), и определение массы нейтрона с помощью законов сохранения энергии



Сэр Джеймс Чедвик (1891–1974) – английский физик, член Лондонского королевского общества (1927), лауреат Нобелевской премии по физике за 1935 г.

и импульса. Соблюдая некоторую осторожность, Джеймс Чедвик назвал свою статью: «Возможность существования нейтрона» (она была опубликована в журнале «Нэйче» 27 февраля 1932 г.). Обсуждая эксперименты, сделанные ранее и свои собственные, он утверждал: «...Все трудности исчезают, если предположить, что излучение состоит из частиц с массой 1 и зарядом 0, то есть из нейтронов». В 1935 г. ему была присуждена

Нобелевская премия по физике с краткой формулировкой: «За открытие нейтрона».

Сразу стало ясно, что нейтронное излучение является удобным средством изучения структуры атомных ядер. Исторически изотопные источники, в которых нейтроны испускаются ядрами легких элементов под действием альфа-частиц, были первыми источниками нейтронов и использовали ту же реакцию (α, n) на легких ядрах Ве, В и др., в которой и был открыт нейтрон.

Изотопные источники, постоянно излучающие нейтроны, получили широкое распространение в различных областях науки и техники, в частности в системах обнаружения делящихся материалов, взрывчатых и наркотических веществ, при определении критичности размножающих систем (метод сброса источника).

Их достоинства – небольшие размеры (сантиметры), стабильность выхода, сравнительная простота конструкции. Ресурс источников измеряется годами и определяется периодом полураспада α -излучателя. Для своей работы изотопный источник не требует какого-либо энергообеспечения. Часто применяемые в (α, n) источниках изотопы и их периоды полураспада: ^{238}Pu (87,7 лет), ^{241}Am (432,2 лет), ^{210}Po (0,38 лет). Спектр изотопных в (α, n) источников широкий – простирается до ~10–12 МэВ, средняя энергия около 4,5 МэВ. Источники со спектром деления ^{252}Cf также относятся к изотопным источникам нейтронов, но появились позже, в соответствии с общим прогрессом ядерной техники. Средняя энергия нейтронов здесь около 2,15 МэВ. Стоимость изотопного источника сравнительно невелика ~3000 \$.

Общий недостаток изотопных источников – все они постоянно излучают нейтроны, их нельзя выключить, и поэтому требуется громоздкая защита обслуживающего персонала при их транспортировке и хранении.

Источники нейтронов на основе ускорителей позволяют прервать поток нейтронов щелчком выключателя. Громоздкая защита в этом случае не требуется, хотя требования по радиационной безопасности при работе с источником остаются прежними.

Ускорители заряженных частиц появились примерно в те же годы, когда был открыт нейтрон. Некоторые из них размещаются на площади 50–100 м² и обладают мощностью ~10¹²–10¹³ нейтронов в секунду (н/с) (энергию можно варьировать от 10⁵ до 10⁷ эВ). Существуют и миниатюрные ускорительные трубки (диаметр ~2,5–3 см и длиной около 50 см), испускающие 10⁷–10⁸ н/с, которые используются в геофизических исследованиях. Заряженные частицы ускоряются (протоны, дейтоны) при прохождении через вакуумную камеру, в которой создается ускоряющее электрическое поле до нескольких миллионов вольт, а затем падают на специальную мишень, в которой рождаются нейтроны. При выключении ускоряющего напряжения образование нейтронов прекращается (источник выключается). Ускоритель заряженных частиц – сложная электрофизическая установка, включает: источник высокого напряжения, источник ускоряемых ионов, мишенное устройство, и требует применения вакуумной техники, мощного источника электропитания, высокой квалификации обслуживающего персонала.

Ускорители со сравнительно невысокой энергией ускоренных дейтонов 0,1–0,2 МэВ, используемые для получения нейтронов (d, t) реакцию (энергия нейтронов $E_n = 14,1$ МэВ) или (d, d) реакцию (энергия $E_n = 2,5$ МэВ), часто называют генераторами нейтронов. Мишенью генератора нейтронов служит гидрид металла (обычно Zr или Ti) с дейтерием или тритием. Такие нейтронные генераторы разнообразны по размерам и характеристикам. Как правило, это стационарные установки, размещаемые в отдельном помещении, оборудованном всеми коммуникациями (вода, электричество, блокировочная автомати-

ка) и, соответственно такие установки в сотни и тысячи раз дороже изотопных источников нейтронов. Ресурс мишенных устройств измеряется несколькими неделями, а стоимость их в десятки раз выше, чем изотопных источников.

Существуют и портативные ускорительные источники, например, импульсный нейтронный генератор ИНГ-17 (разработка ВНИИА, Москва). Однако ресурс портативных ускорительных генераторов нейтронов всего лишь 300–1000 часов (10–30 дней)! А стоимость портативного источника в десятки раз выше, чем изотопного. Основные технические характеристики ИНГ-17: поток нейтронов – $5 \cdot 10^8$ н/с, ресурс – 500 ч. Габаритные размеры блока ускорительной трубки – диаметр 70 мм, длина 410 мм.

Коммутируемый изотопный источник нейтронов. Вариант, совмещающий достоинства тех и других источников и свободный от недостатков – коммутируемый изотопный источник нейтронов (КИИН), обладающий всеми достоинствами обычных изотопных источников и позволяющий выключать его, подобно генератору нейтронов, когда источник не используется. Коммутируемый изотопный нейтронный источник отличается от обычных изотопных источников нейтронов возможностью регулировать выход нейтронов в широких пределах (в 100–1000 раз) от своего максимального значения ~10⁶–10⁷ н/с.

Интерес к таким источникам заметно возрос в последнее десятилетие. Работы по их созданию ведутся в США, Китае, России. В качестве примера можно привести выключаемый источник на изотопе ²¹⁰Po, описанный в обзоре «Полвека радиоизотопным источникам в Китае» (2009 г.), демонстрационный источник ²³⁸PuBe, разработанный в Аргонне (США, 1998 г.) с выходом ~10³ н/с и миниатюрный нейтрон-альфа-активационный спектрометр с коммутируемым AmBe источником, изготовленный там же для посадочного марсианского модуля (2002 г.). В Сандийской лаборатории создана портативная активная поисковая система делящихся материалов, использующая коммутируемый AmBe нейтронный источник (2005 г.).

В РФЯЦ-ВНИИЭФ был разработан нейтронный источник на изотопе ²¹⁰Po с переменным дистанционно-управляемым потоком. Выход нейтронов (с источника) составлял $3 \cdot 10^7$ н/с, габаритные размеры: диаметр 5 см, длина 30 см. Отношение максимального потока к минимальному – 800, гарантийный срок службы



Импульсный нейтронный генератор ИНГ-17



Схема нейтронного источника с электромагнитным приводом: 1 – титановый цилиндр с полонием-210; 2 – бериллиевая мишень; 3 – электромагнит; 4 – герметичный корпус

не менее 1,5 года. Были изготовлены источники двух модификаций: 1) так называемые «перевертыши» – коаксиальное смещение мишени относительно альфа-излучающей подложки происходит под действием силы тяжести, при повороте источника на 180° вокруг поперечной оси; 2) коаксиальное смещение альфа-излучающей подложки относительно мишени осуществлялось с помощью электромагнитного привода, установленного на источнике. При включенном электромагните поток нейтронов от источника максимальный, при отключенном – минимальный. Конструкция второго типа была доведена до промышленного образца, который был реализован в количестве нескольких штук и тщательно изучен.

Источник на основе изотопа ^{210}Po характеризуется высоким удельным выходом и простотой утилизации – через 10 лет в нем вместо полония остается только свинец, и он не считается радиоактивными отходами.

Был также исследован демонстрационный образец выключаемого источника на изотопе ^{238}Pu с плоской геометрией. Максимальный выход нейтронов из макета составил $\sim 3 \cdot 10^3$ н/с для массы ^{238}Pu примерно 0,3 мг. Отношение максимального потока к минимальному – 200. Полученные в эксперименте данные (выход нейтронов, влияние воздушного промежутка, фоновые условия) хорошо описываются проведенными расчетами. Выход такого источника достаточно стабилен благодаря сравнительно длинному периоду полураспада – 87,7 года. Возможно создание источников с выходом 10^6 н/с, удовлетворяющим большинству практических приложений. Было показано, что во ВНИИЭФ имеются все практические возможности для создания такого коммутируемого нейтронного источника. По результатам последней разработки был получен патент РФ на полезную модель № 52651 (2005 г.).

Преимущества коммутируемого изотопного источника нейтронов: низкая стоимость, большой ресурс, отсутствие энергопитания, стабиль-

ность выхода нейтронов, портативность, упрощение транспортировки, простота эксплуатации, снижение дозовой нагрузки на персонал.

Возможные области применения такого источника:

- при проверке содержания делящихся материалов по вынужденному нейтронному излучению, в том числе по запаздывающим нейтронам;
- при обнаружении взрывчатых и делящихся материалов в багаже пассажиров, на таможенных КПП;
- в портативных приборах для поиска мин;
- при контроле дозиметрической аппаратуры в полевых условиях;
- при исследовании кинетики активных зон ядерных реакторов – метод «сброса» источника.

Применение источников нейтронов в проблеме нераспространения ядерного оружия. В проблеме нераспространения ядерного оружия важную роль занимает предотвращение несанкционированного перемещения делящихся материалов (ДМ) через таможенные пункты, границы, терминалы. Для контроля багажа, содержимого транспортных контейнеров успешно используются приборы, основанные на воздействии нейтронного излучения на содержимое исследуемых объектов и регистрации специфического излучения (нейтроны, гамма-излучение), возникающего, если нейтроны взаимодействуют с ДМ.

Изотопные источники широко используются в системах обнаружения ДМ (по гамма-излучению, по нейтронам спонтанного деления, по запаздывающим нейтронам), в системах измерения содержания ДМ, в системах обнаружения ВВ, наркотиков (по захватному гамма-излучению на азоте, водородная аномалия по замедленным и рассеянным нейтронам). При этом используются разнообразные методики регистрации специфических характеристик излучения, возникающего при взаимодействии нейтронов с этими веществами.

Характерным представителем портативных нейтронных приборов, предназначенных для обнаружения контрабандных тайников за преградами, является детектор «CINDI» (Compact Integrated Narcotics Detection Instrument), разработанный американской фирмой NOVA R&D, Inc. Он использует источник быстрых нейтронов

с активностью около 50 микрокюри ($\sim 5 \cdot 10^6$ н/с). В качестве примера отечественных аппаратов такого класса можно привести нейтронный поисковый прибор «Сверчок» (Томск). Он предназначен для обнаружения водородсодержащих закладок (ВВ, наркотиков и др.) за преградами из металла, кирпича, бетона и т. п. Источником нейтронов служит изотоп с потоком порядка 10^6 н/с. Вес прибора в снаряженном состоянии не превышает 5 кг при весе пульта 3,5 кг и выносного измерительного блока со штангой 1,5 кг. В этих приборах источником нейтронов служит изотоп ^{252}Cf . Среди недостатков калифорния – ограничения по порогу реакции взаимодействия; радиационная опасность в эксплуатации (постоянно действующий излучатель) и необходимость мер радиационной защиты при хранении. Кроме того ^{252}Cf принадлежит к ядерным материалам, которые являются федеральной собственностью, стратегически значимы в проблеме ядерного нераспространения и следовательно требуют особых мер государственного учета, контроля и физической защиты.

Для тех же целей используются и стационарные установки на основе ускорительной техники – нейтронные генераторы. В ОИЯИ (Дубна) разработаны и созданы опытные образцы установок ДВиН-1 и ДВиН-2, предназначенные для идентификации делящихся, взрывчатых и наркотических веществ, скрытых в различных контейнерах, чемоданах, сейфах и почтовых отправлениях. Аналогичная установка УВП-5101 предназначена для контроля ручной клади и багажа. Масса устройства 2200 кг. Установка разработана в «НТЦ Ратэк» (С.-Петербург). В настоящее время установка находится в опытной эксплуатации в аэропорте «Пулково». Инвесторами разработок в России выступают ФСБ, Роснано, Федеральное агентство по науке и инновациям в рамках проекта «Антитеррор».

К недостаткам нейтронных генераторов (НГ) относятся высокая стоимость (в сотни и тысячи раз больше, чем изотопных источников); ограниченный ресурс работы (~ 500 часов); большие габариты (до 2000 кг); значительное энергопотребление (от 200 Вт и выше); ограниченное время непрерывной работы (требуется периодическое отключение для охлаждения мишени); нестабильность выхода нейтронов от импульса к импульсу (до 50 %) и невозможность рассматривать НГ как точечный источник в задачах обнаружения ВВ.

Следует прибавить сюда необходимость дорогостоящей утилизации быстро вырабатывающих

свой ресурс трубок с тритием – до 10–15 шт. в год только для одной установки. Высокая стоимость основного компонента этих устройств – генератора нейтронов, вкуче с необходимостью его ежемесячной замены и проблемами утилизации содержащих тритий мишеней, а также необходимость привлечения для их обслуживания высококвалифицированного персонала, возможно, являются основными причинами того, что эти системы не нашли пока широкого применения. Внедрены в практику лишь единичные образцы.

Существенно упростить и удешевить эксплуатацию подобных устройств возможно при замене ускорительного генератора нейтронов на коммутируемый изотопный источник нейтронов (КИИН). Модернизация таких устройств в плане замены дорогих генераторов с малым сроком службы на коммутируемый изотопный источник существенно упростит эксплуатацию систем обнаружения. Возможно сокращение эксплуатационных расходов в сотни раз на каждой подобной установке.

Применение нейтронных источников для поиска мин. Большой областью возможного применения коммутируемых источников нейтронов является их применение в портативных приборах для поиска мин. Задача обнаружения скрытых закладок взрывчатых веществ в настоящее время носит глобальный международный характер и требует скорейшего решения. Каждые 20 минут кто-нибудь либо погибает,

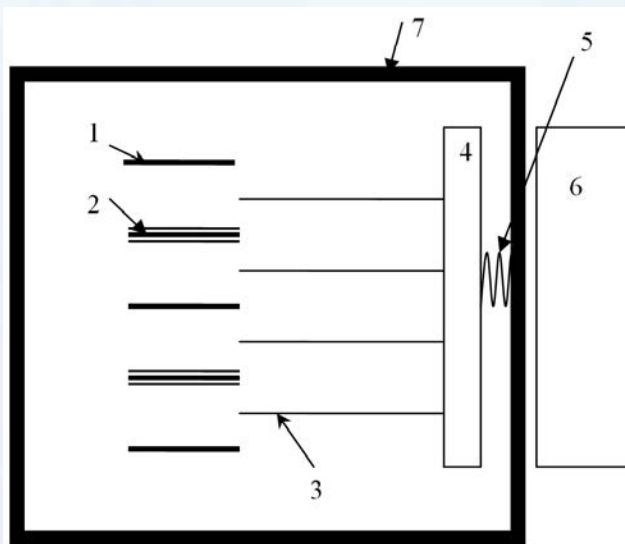


Схема коммутируемого изотопного нейтронного источника (в положении включено): 1 – мишень из бериллия (Be); 2 – альфа-излучатель (Pu, Po, Am); 3 – затвор-поглотитель (Fe); 4 – магнитомягкий материал; 5 – упругий элемент; 6 – электромагнит; 7 – корпус источника



Поиск мин в полевых условиях

либо получает увечья от разрыва наземной мины. Около 80 % пострадавших – гражданское население. Мина стоит всего 3 доллара, а обезвреживание одной мины стоит 1000 долларов. Наиболее остро проблема наземных мин стоит в Анголе, Афганистане, Боснии и Герцеговине, Вьетнаме, Ираке, Камбодже, Мозамбике, Судане, Хорватии и Эритрее. Сегодня, по разным оценкам, в горах, лесах, сельхозугодьях наших кавказских республик остается до миллиона различных взрывоопасных предметов. Карты минных полей отсутствуют (либо не составлялись, либо утрачены).

По оценкам экспертов ООН, в ходе локальных войн, вооруженных конфликтов и террористических актов последних двух десятилетий противоборствующими сторонами на территории 62 стран мира было установлено свыше 100 миллионов скрытых закладок ВВ (мины, фугасы, различного типа взрывные устройства). Среди этого количества около 75 % закладок имеют корпус из пластмассы или не имеют такового и содержат минимальное количество металлических деталей. Характерная глубина закладки мин – пехотные – до 5 см, танковые – до 15–20 см.

Обнаружение таких закладок ВВ современными миноискателями крайне затруднено. Для их обнаружения перспективно использование нейтронного зондирования – нейтронные миноискатели. В них используется регистрация захватного гамма-излучения на азоте, регистрация водородной аномалии по замедленным и рассеянным нейтронам.

Во многих странах мира разрабатываются портативные приборы поиска мин для применения в полевых условиях. Ключевая пробле-

ма при их разработке – отсутствие малогабаритного ~10 см, легкого ~1 кг, простого в обслуживании, относительно безопасного источника нейтронов с выходом 10^7 – 10^8 н/с.

Перечень стран, занимающихся такими разработками, весьма обширен: США, Канада, Россия, Италия, Хорватия, Дания, Нидерланды, Иран, Венгрия, Южная Африка и Австрия. В основном, в таких разработках используются изотопные источники непрерывного действия.

Здесь в полной мере можно использовать достоинства коммутируемых источников нейтронов – дешевый, большой временной ресурс, малогабаритный (~10 см), легкий (~1 кг), простой в обслуживании,

относительно безопасный источник нейтронов. Безопасные портативные миноискатели на основе коммутируемых источников нейтронов найдут применение при обследовании громадных территорий, выведенных из хозяйственного оборота, обследовании перспективных строительных площадок и т. п.

Перспективы применения коммутируемого изотопного источника. Основное достоинство коммутируемого изотопного источника нейтронов – то, что он может включаться и выключаться подобно ускорителю, но не требует сопутствующего ускорителю источника высокого напряжения, вакуумной техники, контролирующей аппаратуры. При этом требования к защите коммутируемого источника – минимальны, стоимость – минимальна, ресурс – максимален.

РФЯЦ-ВНИИЭФ имеет все возможности для разработки и поставки коммутируемых источников нейтронов для приборов обнаружения, и может не только поставлять источники, но и создать на их основе соответствующие приборы как для стационарного (в аэропортах, вокзалах, таможенных терминалах), так и для полевого контроля.

АБЛЕСИМОВ Владимир Евгеньевич –
ведущий научный сотрудник ИЛФИ
РФЯЦ-ВНИИЭФ, кандидат физ.-мат. наук

ДЗЮБА Сергей Борисович –
начальник участка опытного цеха
ЭМЗ «Авангард»

ШАЛАТА Федор Григорьевич –
начальник опытного цеха ЭМЗ «Авангард»,
кандидат физ.-мат. наук