

Ускоритель дейтонов для таможенного комплекса обнаружения делящихся и взрывчатых веществ

Ю.В. Афанасьев, П.В. Богданов, М.Ф. Ворогушин, Ю.Н. Гавриш, В.П. Голубев,
В.Г. Мудролюбов, В.И. Петров, А.П. Строкач, Ю.А. Свистунов
*Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры
им. Д.В. Ефремова, Санкт-Петербург, Россия*

Обсуждаются вопросы создания ускорителя дейтонов для комплекса обнаружения ДВ и ВВ. Новый принцип построения системы детектирования ДВ и ВВ, предложенный в НПК ЛУЦ НИИЭФА, основан на использовании импульсного источника нейтронов и регистрации и исследовании свойств вторичного гамма излучения, возникающего при взаимодействии нейтронного потока с исследуемым объектом. Импульсный поток нейтронов создается при взаимодействии пучка ускоренных дейтонов со специальной мишенью. Рассматриваются четыре возможных схемы ускорения: ускоритель с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (ПОКФ) с выходной энергией дейтонов 1 МэВ, электростатический генератор нейтронов на ту же, энергию, высокочастотный ускоритель, состоящий из однозачерных резонаторов с выходной энергией дейтонов 0.8 МэВ, а также тандем – резонатор с ПОКФ плюс резонатор с переменнo-фазовой фокусировкой (ПФФ) с выходной энергией частиц 3.5 МэВ. Система инъекции должна обеспечивать специальную временную модуляцию ускоряемого пучка: макроимпульсы длительностью 100 мксек содержат последовательность импульсов длительностью 1 мкс.

Введение

В НПК ЛУЦ НИИЭФА им. Д.В. Ефремова разрабатывается технологический комплекс для обнаружения взрывчатых, делящихся веществ, а также, в будущем, возможно и наркотических веществ растительного происхождения. Обнаружение взрывчатых веществ (ВВ) – главная цель. Концептуальная схема технологического комплекса приведена на рис. 1. Комплекс содержит высокочастотный линейный ускоритель как излучатель ускоренных частиц (протонов или дейтонов); бериллиевую (или углеродную) мишень, в результате взаимодействия с которой ускоренные частицы производят поток нейтронов; исследуемый объект и быстродействующую систему измерения и обработки информации в виде гамма излучения от объекта при бомбардировке его нейтронами [1]. Идентификация взрывчатых веществ основана на регистрации:

- γ - излучения, возникающего при неупругом рассеянии быстрых нейтронов на ядрах N, O, C;
- γ - излучения, возникающего в результате реакций захвата медленных нейтронов ядрами азота;
- γ - излучения от короткоживущих изотопов при нейтронной активации.

Делящиеся вещества идентифицируются при измерении энергетических и временных спектров нейтронов и гамма частиц.

Сравнительный анализ схем ускорения

Поскольку метод детектирования, предложенный в НПК ЛУЦ [2] предполагает использование импульсного источника нейтронов, при выборе ускоряющей системы для комплекса рассматривались следующие *типы ускорителей*:

- 1) линейный ВЧ-ускоритель протонов;
- 2) линейный ВЧ-ускоритель дейтонов;
- 3) линейный ВЧ-ускоритель из независимых однозачерных резонаторов;
- 4) нейтронный генератор на основе перезарядного электростатического ускорителя, работающий в импульсном режиме.

Выбор был ограничен следующими условиями:

- рабочая частота ВЧ-ускорителей должна быть 433 МГц, поскольку НПК ЛУЦ имеет технологические наработки и источники ВЧ-мощности в этом частотном диапазоне;
- ускоритель должен иметь импульсный ток, который может обеспечить требуемый поток нейтронов;
- энергия инжектируемых в ускоритель частиц не должна быть выше 60 кэВ;
- габариты, энергопотребление, сложность изготовления и настройки должны быть, по возможности, минимизированы.

Математическое моделирование взаимодействия между ускоренными частицами и мишенью, а также оценка упомянутых выше четырех типов ускорителей привели к следующим ограничениям на выходные параметры ускоряющих систем:

минимальный требуемый поток нейтронов	10^8 1/сек
оптимальный материал мишени	Be
требуемый ток дейтронов	10 мА
требуемая энергия дейтронов	0.8 МэВ
требуемая энергия протонов	10 МэВ

Расчет основных физических и конструктивных характеристик рассматриваемых ускорителей, удовлетворяющих этим или близким к ним требованиям, дал следующие результаты.

Параметры ВЧ-ускорителя протонов, состоящего из резонатора с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (ПОКФ) с выходной энергией 2МэВ и резонатора с переменнo-фазовой фокусировкой (ПФФ):

энергия протонов	10 МэВ
число резонаторов	2
импульсный ток на выходе	не более 30 мА
длина ускорителя	4.5 м
мощность, рассеиваемая в резонаторах	не более 700 кВт

Параметры ВЧ-ускорителя дейтронов с резонатором с ПОКФ:

энергия дейтронов	1 МэВ
число резонаторов	1
импульсный ток на выходе	22 мА
длина ускорителя	не более 3 м
мощность, рассеиваемая в резонаторе	не более 350 кВт

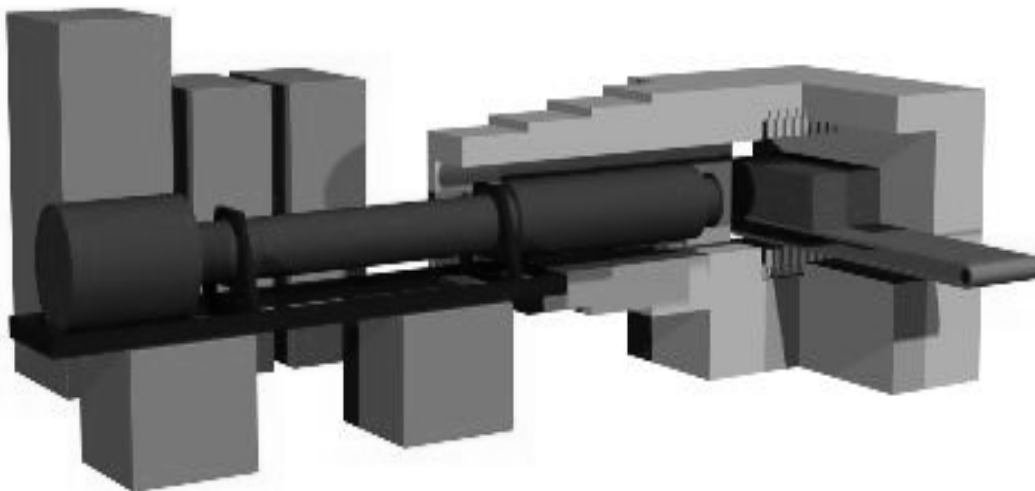


Рис. 1. Концептуальная схема комплекса обнаружения контрабандных товаров.

На рис. 2 показаны некоторые параметры ускоряющих ячеек резонатора с ПОКФ для ускорения дейтронов (Θ – эффективность ускорения, β – относительная скорость синхронной частицы, φ – синхронная фаза, a – апертура канала).

Параметры ВЧ-ускорителя, состоящего из независимых однозорных резонаторов:

энергия дейтонов		0.8 МэВ
минимально возможное количество резонаторов		8
импульсный ток на выходе (без предварительной банчировки)	не более	3 мА
импульсный ток на выходе (с предварительной банчировкой)	не более	10 мА
мощность, рассеиваемая в резонаторах		100 кВт

Недостатки: сложная система ВЧ-питания (трудности разводки мощности и фазирования напряжения в резонаторах), малый выходной ток пучка, большой эмиттанс в сравнении с ускорителями с ПОКФ, необходимость в магнитных фокусирующих устройствах, сложная вакуумная система. Ускоритель такого типа нужно делать на частоте 150 МГц и с энергией инжекции 100–150 кэВ. Согласно перечисленным недостаткам, ускоритель такого типа не может быть лучше ускорителя с ПОКФ.

Параметры электростатического перезарядного ускорителя в импульсном режиме:

ускоряемые частицы		D^-, D^+
энергия дейтонов		1 МэВ
импульсный ток на выходе	не более	20 мА
габаритные размеры ускорителя (включая инжектор)		$2 \times 2 \text{ м}^2$

В таком ускорителе ускорительная трубка, газовая перезарядная мишень и источник ускоряющего напряжения располагаются в заземленном сосуде, заполненном изолирующим газом под давлением в несколько атмосфер. Размер сосуда зависит от величины ускоряющего напряжения [3].

Недостатки: наличие сосуда высокого давления с системой газообеспечения, трудности откачки газа из перезарядной мишени.

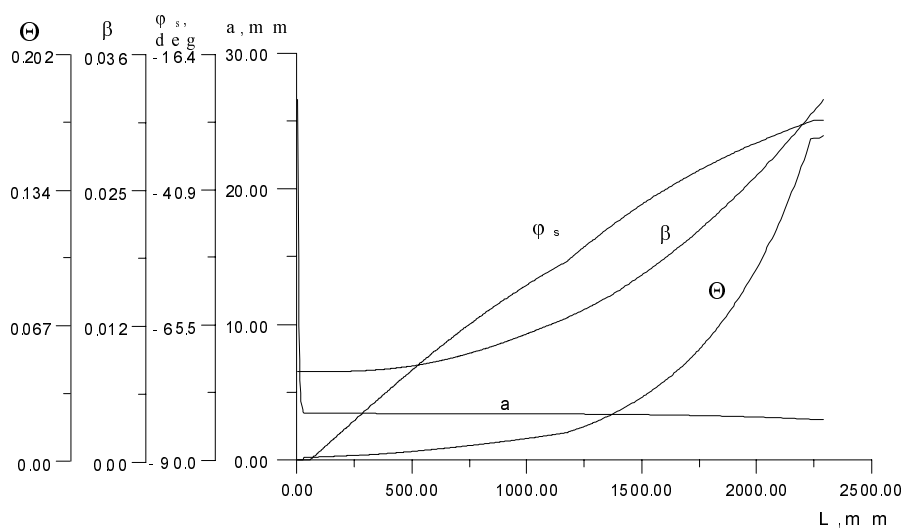


Рис. 2. Параметры ускоряющих ячеек.

Выводы

Таким образом, при минимальных требованиях к выходным току и энергии конкурирующими системами могут быть ВЧ-линейный ускоритель дейтонов и нейтронный генератор с перезарядкой D^- на D^+ . Однако, если оптимизация системы детектирования и процессинга потребует увеличить число нейтронов, взаимодействующих с контролируемым объектом, т.е. увеличения энергии ускоренных частиц, то выбор должен быть сделан в пользу в.ч. линейного ускорителя, поскольку увеличение энергии дейтонов на 2–3 МэВ может быть достигнуто здесь добавлением в ускоряющий тракт резонатора с ПФФ длиной не более 1м. Как было показано З.А. Андреевой и Ю.В. Зуевым, пучок D^+ с током до 20 мА возможно ускорить в таком резонаторе до 3–3.5 МэВ без потерь частиц. В то же время увеличение выходной энергии в электростатическом ускорителе даже на 1 МэВ приводит к существенному увеличению его габаритов, снижению надежности.

В настоящее время ускорительная часть технологического таможенного комплекса, который изготавливается в НПК ЛУЦ и в кооперации с другими предприятиями Санкт-Петербурга, включает в себя систему инжекции ионов D^+ , резонатор с ПОКФ, ускоряющий ионы от 60 кэВ до 3.5 МэВ, причем система инжекции осуществляет двойную модуляцию импульсов тока в соответствии с требованиями системы детектирования. Макроимпульс тока длительностью 100 мксек с резким передним фронтом разбивается на микроимпульсы длительностью 1 мксек. Соотношение между длительностью микроимпульсов и интервалом между ними определяется компромиссом между возможностью детекторов обрабатывать максимальное количество информации и необходимостью регистрировать запаздывающие нейтроны в промежутках между импульсами.

Литература

- [1] Yu.A. Svistunov et al. NPK LUTS Project of contraband detection system. Proceedings of LINAC 2000 conference, Monterey, USA, August 2000 (to be published).
- [2] М.Ф. Ворогушин, Ю.Н. Гавриш, А.В. Сидоров, А.М. Фиалковский. Метод обнаружения взрывчатых и делящихся веществ. Патент РФ N 2150105, приоритет от 26 мая 1999.
- [3] V.P. Golubev et al. Design Features and Operational parameters of Change – Exchange Heavy Ion Accelerator UKP-2-1. Proceedings of EPAC 1990, Nice, France, V2, p. 1427- 1429, 1990.