

## УСКОРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС МОБИЛЬНОГО БАЗИРОВАНИЯ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ АЗОСОДЕРЖАЩИХ ВЕЩЕСТВ

Б. Ю. Богданович, Г. О. Буянов<sup>1</sup>, А. В. Нестерович

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

Описывается способ обнаружения скрытых азотосодержащих веществ. Приведено описание мобильного комплекса на основе линейного ускорителя электронов (ЛУЭ), способного решить задачи по обнаружению азотосодержащих веществ. Приведена структурная схема мобильного комплекса, и описана ускоряющая система, которая была использована для ускорения частиц. Поворот пучка электронов осуществляется с помощью специального электромагнита, располагаемого на траектории полета пучка. Приведен чертеж такого электромагнита. Линейный ускоритель размещен в контейнере длиной 6 м. Результаты данной работы представляют несомненный интерес в решении задач обнаружения азотосодержащих веществ.

This article describes a method for detecting hidden nitrogen-containing substances. A description is given of a mobile complex based on a linear electron accelerator (LAE), capable of solving problems of detecting nitrogen-containing substances. The block diagram of the mobile complex is given and the accelerating system, which was used for particle acceleration, is described. Rotation of the electron beam is carried out using a special electromagnet located on the beam flight path. A drawing of such an electromagnet is given. The linear accelerator is placed in a container 6 m long. The results of this work are of undoubted interest in solving the problems of detecting nitrogen-containing substances.

PACS: 29.20.Ej

### ВВЕДЕНИЕ

До настоящего времени эффективных средств обнаружения азотосодержащих веществ создано не было. Однако усилия в этом направлении предпринимаются. В частности, одним из наиболее перспективных средств является использование метода гамма-активационного анализа, реализуемого с помощью ускорителя электронов, рассчитанного на энергию 50–70 МэВ (она должна превышать пороговые значения энергий возбуждаемых фотоядерных реакций. Пороги реакций:  $E_\gamma > 30$  МэВ для  $^{14}\text{N}(\gamma, nn)^{12}\text{N}$ ,  $E_\gamma > 24$  МэВ для  $^{14}\text{N}(\gamma, pp)^{12}\text{B}$  и  $E_\gamma > 17$  МэВ для  $^{13}\text{C}(\gamma, p)^{12}\text{B}$ . Импульсный ток ускоренных электронов должен составлять 50 мА/имп. и определять интенсивность пучка  $\gamma$ -квантов ( $10^{12}$   $\gamma$ -квантов/имп.), достаточную для образования необходимого количества изотопов  $^{12}\text{B}$  и  $^{12}\text{N}$ ) [1–3]. Общая схема устройства показана на рис. 1 [2].

---

<sup>1</sup>E-mail: frontlines.07@gmail.com, gobuyanov@mephi.ru

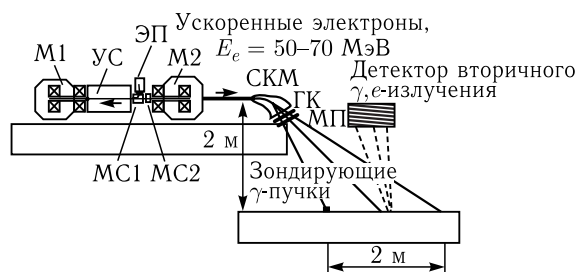


Рис. 1. Общая схема ускорительно-детектирующей системы обнаружения скрытых азотосодержащих веществ. Основные элементы ускорителя: М1, М2 — поворотные магниты; УС — ускоряющая структура; ЭП — электронная пушка; МС1, МС2 — магниты инжектора; СКМ — магнит сканирования; ГК — гамма-конвертер; МП — монитор пучка

Система сканирования, конвертера  $\gamma$ -квантов и контроля положения пучка объединяет в едином конструктивном узле устройства формирования  $\gamma$ -пучка и состоит из СКМ, конвертера  $\gamma$ -квантов (ГК) и монитора положения сканирующего  $\gamma$ -пучка (МП). Система окружается радиационной защитой.

Магнит сканирования предназначен для динамического изменения направления горизонтального электронного пучка от ускорителя на горизонтальную поверхность, расположенную на расстоянии 2 м ниже пучка (см. рис. 1), в целях пошагового облучения исследуемой зоны. Магнитное поле СКМ задает полярное и азимутальное направления пучка электронов на  $\gamma$ -конвертер (ГК), где пучок электронов конвертируется в пучок тормозных  $\gamma$ -квантов, направленных вдоль оси отклоненного электронного пучка. Контроль положения сканирующего  $\gamma$ -пучка осуществляется по данным многопроволочной двухкоординатной ионизационной камеры, расположенной за мишенью-конвертером.

Система сканирования обеспечивает последовательное (построчное) перемещение пучка по обследуемой зоне с минимальным шагом 5 см при скорости смещения 1 шаг на импульс ускорителя (с частотой 50 Гц). Точность фиксации положения пучка на объекте  $\pm 1$  см при минимальном размере точки облучения на местности  $\pm 2,5$  см.

Детектор вторичного излучения предназначен для регистрации электронов (позитронов) — продуктов распада образованных изотопов  $^{12}\text{B}$  и  $^{12}\text{N}$ , если вещество находится на поверхности или близко к поверхности скрывающего вещества (например, почвы) либо  $\gamma$ -квантов, рождающихся в результате взаимодействия распадных электронов (позитронов) со скрывающим веществом при глубинной установке скрытых азотосодержащих веществ. Детектор состоит из набора сцинтилляторов — специальных оптических материалов, испускающих короткую световую вспышку при прохождении через них заряженной элементарной частицы. Световая вспышка преобразуется в короткий электрический сигнал фотоэлектронными умножителями, сканирующими чувствительный объем детектора.

## 1. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА УСКОРИТЕЛЯ

В радиационно-ускорительном центре НИЯУ МИФИ совместно с ООО «Нано Инвест» изготовлен и запущен мобильный комплекс на основе линейного ускорителя электронов (ЛУЭ) [4, 5], способный решить задачи в рамках проекта, предложенного в ФИАНе.

На рис. 2 показана структурная схема ускорителя.

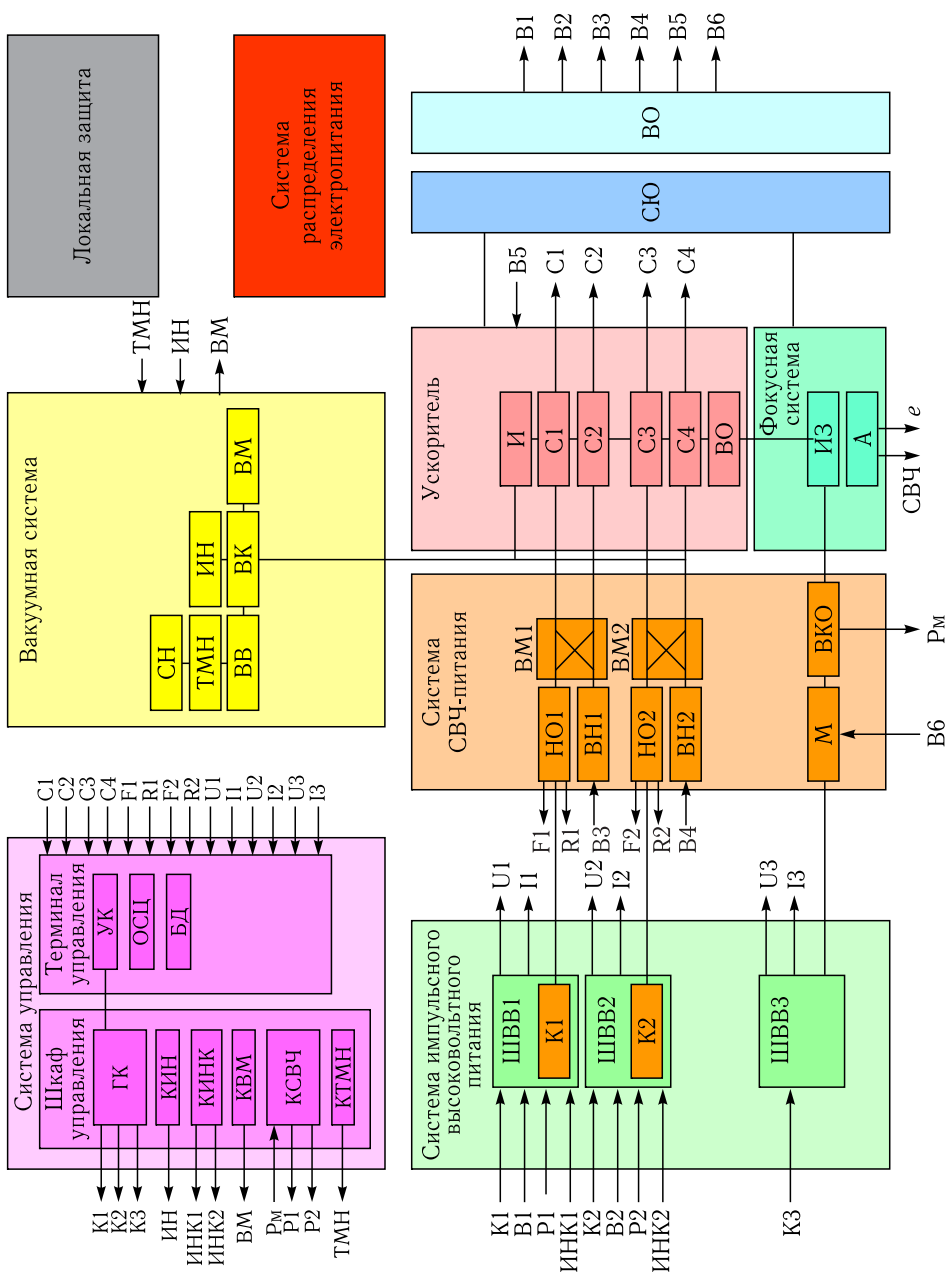


Рис. 2. Структурная схема ускорителя. Ускоритель электронов предназначен для создания и ускорения пучка электронов

Ускоритель электронов выполнен на базе бипериодической ускоряющей системы с питанием от системы СВЧ-питания.

Ускоряющая система состоит из инжектора И, четырех ускоряющих секций С1, С2, С3, С4 и фольгового выходного окна ВО. Первая секция С1 включает две группирующие и десять ускоряющих ячеек. Каждая из трех других секций включает двенадцать ускоряющих ячеек.

Все ускоряющие секции соединены друг с другом через сильфоны для обеспечения их юстировки.

Трехэлектродный инжектор электронов И с сеточным управлением присоединен к первой ускоряющей секции С1.

Все оборудование ускорителя электронов соединено с вакуумной системой и работает при высоком вакууме ( $P < 10^{-7}$  мбар).

Вывод пучка ускоренных электронов из вакуума в атмосферу осуществляется через фольговое выходное окно ВО.

Система СВЧ-питания включает два клистрона К1 и К2, магнетрон М, два направленных ответвителя НО1 и НО2, два волноводных моста ВМ1 и ВМ2, две волноводные нагрузки ВН1 и ВН2 и волноводно-коаксиальный ответвитель ВКО.

Вакуумная система включает ионный высоковакуумный насос ИН, турбомолекулярный насос ТМН, форвакуумный спиральный насос СН, вакуумный коллектор ВК, вакуумметр ВМ, сильфоны и вакуумный вентиль ВВ.

Система управления включает шкаф управления, расположенный в контейнере, и терминал управления, расположенный на рабочем месте оператора.

Шкаф управления содержит главный контроллер ГК, контроллер ионного насоса КИН, контроллер ионных насосов клистронов КИНК, контроллер турбомолекулярного насоса КТМН, СВЧ-контроллер КСВЧ и контроллер вакуумметра КВМ.

Терминал управления включает управляющий компьютер УК, осциллограф ОСЦ и блок детекторов БД.

СВЧ-контроллер КСВЧ включает два коаксиальных фазосдвигающих Ф1 и Ф2, СВЧ-усилитель У1, коаксиальный разделитель РМ1, управляемый аттенюатор УАТ1 и набор коаксиальных аттенюаторов АТ.

Система юстировки СЮ предназначена для точной соосной установки ускоряющих секций и фокусирующей системы. Система юстировки включает раму в контейнере, силовую раму ускорителя с механизмами регулировки положения ускоряющих секций и механизм юстировки антенны.

Локальная защита предназначена для защиты электронного оборудования в контейнере от ионизирующего излучения ускорителя электронов. Локальная защита включает набор свинцовых блоков специальной формы.

Система распределения электропитания включает входной рубильник и комплект автоматических выключателей.

Система водяного охлаждения ВО предназначена для охлаждения двух клистронов К1 и К2, магнетрона М, четырех ускоряющих секций С1, С2, С3 и С4 и двух волноводных нагрузок ВН1 и ВН2.

Ускоряющие секции С1, С2, С3 и С4 имеют по два канала охлаждения, которые соединены последовательно в одну цепь, что обеспечивает их одинаковую температуру.

Система водяного охлаждения включает комплект трубопроводов и вентилялей для установки требуемого протока воды в каналах охлаждения.

Система водяного охлаждения имеет входной и выходной патрубки для присоединения к внешней водяной цепи.

## 2. УСКОРЯЮЩАЯ СИСТЕМА И ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПУЧКА

На рис. 3 показана в разрезе бипериодическая ускоряющая структура с инжектором электронов.

На рис. 4 показан общий вид сверху начальной части ускорителя.

Рис. 3. Бипериодическая ускоряющая система с инжектором электронов: 1 — ячейка связи; 2 — ускоряющая ячейка; 3 — пролетный канал; 4 — инжектор электронов

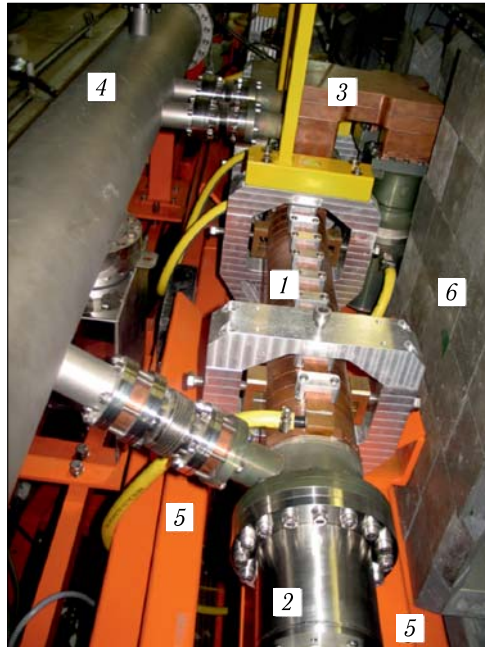
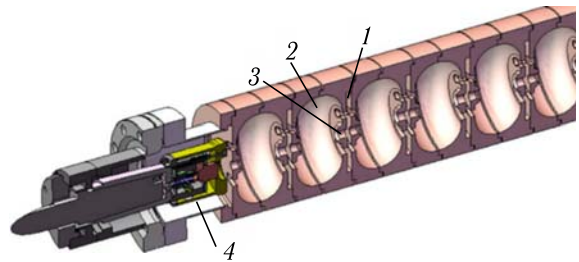


Рис. 4. Вид сверху на начальную часть ускорителя МО ЛУЭ: 1 — ускоряющая секция 1 (группирующая); 2 — инжектор электронов; 3 — волноводный мост (3-дБ напр.отв.); 4 — общий вакуумный коллектор ускоряющей системы; 5 — несущая рама ускорителя; 6 — радиационная защита

Измерения энергии и тока электронного пучка проводились по методике, описанной ниже.

Параметры пучка ускоренных электронов (ток и среднюю энергию) целесообразно измерять многопластинчатым цилиндром Фарадея. К сожалению, нельзя воспользоваться промышленными аттестованными приборами такого типа в связи с их отсутствием.

В процессе прохождения электронов в материале поглотителя происходит их поглощение и, соответственно, накопление заряда в теле поглотителя. Таким образом, соединив токопроводящий поглотитель с токоизмерительным прибором, обладающим большим входным сопротивлением, получим величину тока электронов на выходе ускорителя. Для того чтобы уменьшить альбедо электронов, влияющее на точность измерения, в качестве поглощающего тела выбирают материал с малым атомным номером (обычно алюминий). При этом толщина поглотителя должна быть такой, чтобы поглощались все попадающие в него электроны. Эта толщина будет зависеть от энергии электронов.

Из результатов, представленных на рис. 5, следует, что для измерения тока электронов с энергией 50 МэВ алюминиевый поглотитель должен иметь толщину не менее 120 мм.

На практике для определения энергии электронов по параметрам кривой прохождения используют величину экстраполированного пробега. На рис. 6 дана кривая прохождения электронов с энергией 50 МэВ в алюминии. Прямой участок на кривой экстраполируют до пересечения с осью абсцисс. Толщина, соответствующая точке пересечения, и будет экстраполированным пробегом электронов с энергией 50 МэВ в алюминии.

На рис. 7 представлена зависимость энергии электронов  $E_0$  от величины их экстраполированного пробега  $R_{\text{экс}}$  в алюминии. Таким образом, определив из измеренной кривой прохождения величину экстраполированного пробега, из зависимости рис. 6 получим энергию ускоренных электронов.

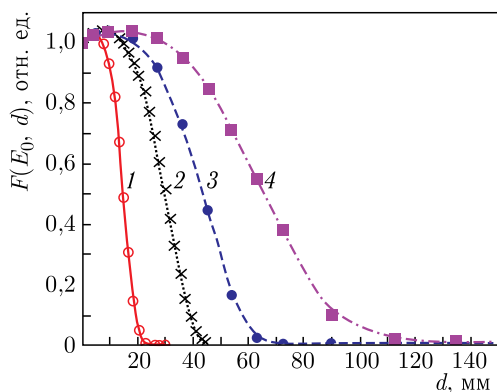


Рис. 5. Кривые прохождения электронов с энергией 10–50 МэВ в алюминиевом поглотителе: 1 — 10 МэВ; 2 — 20 МэВ; 3 — 30 МэВ; 4 — 50 МэВ

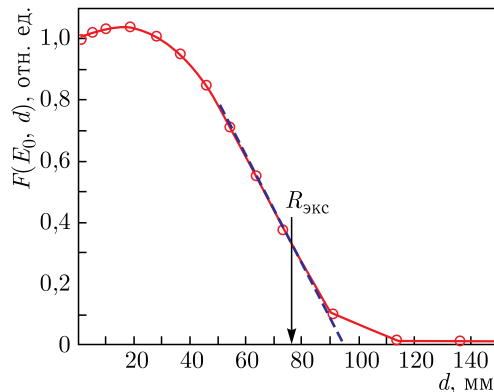


Рис. 6. Кривая прохождения электронов с энергией 50 МэВ в алюминиевом поглотителе

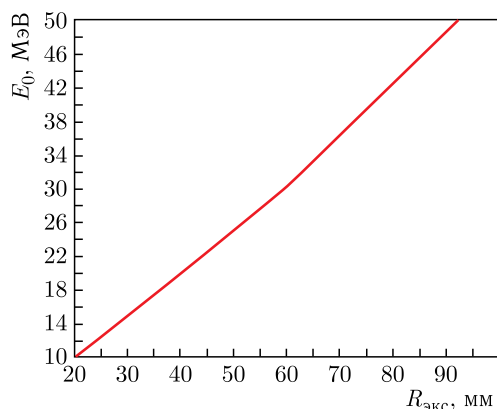


Рис. 7. Зависимость энергии электронов  $E_0$  от величины их экстраполированного пробега  $R_{\text{экс}}$  в алюминии

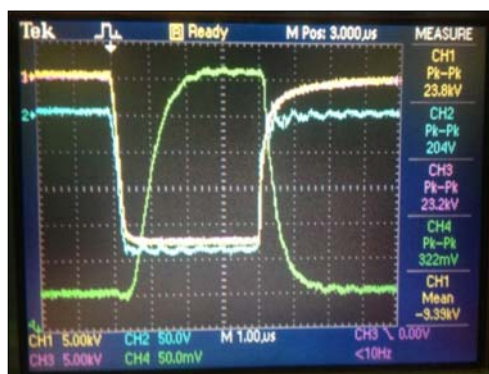


Рис. 8. Оциллограммы напряжений на клистронах и огибающая СВЧ-сигнала с измерительного выхода УС

Для получения кривой прохождения был изготовлен многопластинчатый цилиндр Фарадея. Пластины цилиндра изготовлены из алюминия. Толщина первой и второй пластины 10 мм; следующие восемь пластин — толщиной 5 мм. Пластины помещаются в заземленный стальной корпус.

Измерение кривой прохождения осуществляется токоизмерительным прибором путем последовательного заземления пластин, начиная с первой относительно влета пучка электронов. Экстраполируя прямой участок этой кривой до пересечения с осью абсцисс, как показано на рис. 5, получаем величину экстраполированного пробега электронов в алюминии. Используя кривую на рис. 6, находим значение наиболее вероятной энергии ускоренных электронов. Ток, измеряемый при одновременном подключении всех пластин цилиндра к измерительному прибору, даст величину среднего тока электронов на выходе ускорителя.

На рис. 8 показаны оциллограммы напряжения на клистронах и огибающая сигнала с измерительного выхода УС.

### 3. СИСТЕМА ПОВОРОТА ПУЧКА И РАЗМЕЩЕНИЕ УСКОРИТЕЛЯ

На рис. 9 представлена схема поворотного магнита, осуществляющего вращение пучка в плоскости развертки.

Поворот пучка электронов осуществляется с помощью специального электромагнита, располагаемого на траектории полета пучка. Устройство этого магнита ясно из трехмерной модели, приведенной на рис. 9. Здесь электронный пучок пролетает между полюсными наконечниками, отклоняясь вправо или влево в зависимости от направления тока в обмотках  $I$ .

На рис. 10 показан вид поворотного колеса с магнитом, осуществляющего сканирование пучка в горизонтальной плоскости перпендикулярно оси ЛУЭ.

Линейный ускоритель размещен в контейнере длиной 6 м (рис. 11). Контейнер имеет открываемый проем для вноса оборудования и дверь для персонала.

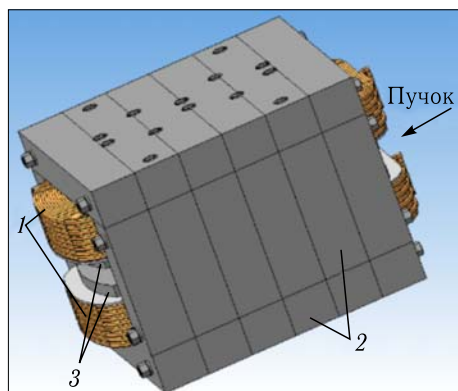


Рис. 9. Поворотный магнит: 1 — секционированные обмотки (медная шина); 2 — ярмо магнита (магнитопровод, сталь АРМКО); 3 — полюсные наконечники (плоские, сталь АРМКО)

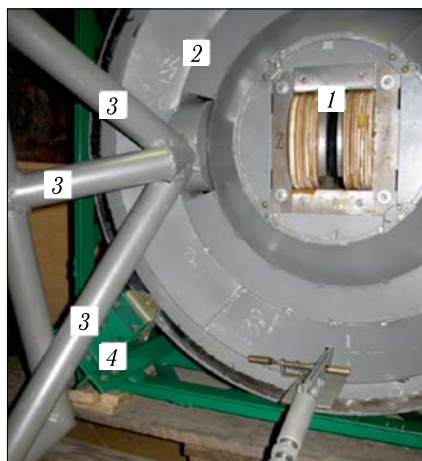


Рис. 10. Внешний вид поворотного колеса с магнитом: 1 — поворотный магнит; 2 — поворотное колесо (алюминий, сталь); 3 — штанги, несущие подвижную платформу; 4 — роликовый держатель колеса внутри рамы



Рис. 11. Примеры внешнего вида контейнеров и внутреннего размещения электрофизического оборудования

Все оборудование ускорителя в контейнере размещено на несущей раме, сваренной из стальных профилей (швеллер, двутавр). Несущая рама закреплена на дне контейнера.

Все стены, пол и потолок контейнера покрыты изнутри слоем теплоизоляции и внутренней отделкой. При этом контактные поверхности несущей рамы находятся выше уровня пола.

В результате измерений на местности получены следующие параметры пучка ЛУЭ:  $W_{\max} \approx 40$  МэВ;  $I_{\text{имп}} = 100$  мА.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, был изготовлен и запущен ускорительный комплекс мобильного базирования для обнаружения азотосодержащих веществ со следующими характеристиками:  $W_{\max} \approx 40$  МэВ;  $I_{\text{имп}} = 100$  мА. Результаты достигнутой работы показывают перспективность и реальную возможность создания таких ускорителей, которые в дальнейшем помогут довольно безопасно детектировать и обезвреживать азотосодержащие вещества.

Авторы благодарны помогавшим в данной работе на различных стадиях А. А. Завадцеву, Д. А. Завадцеву, А. П. Игнатьеву, В. В. Кудинову, А. П. Клачкову, А. Г. Пономаренко, В. Ю. Свирину, Ю. М. Путкину, В. В. Яненко.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Богданович Б. Ю., Нестерович А. В., Ворогушин М. Ф., Свистунов Ю. А.* Дистанционный радиационный контроль с линейными ускорителями. Т. 2. Комплексы радиационного контроля. М.: Машиностроение, 2012. 284 с.
2. *Белоусов А. С., Карев А. И., Малиновский Е. И., Граевский В. Г., Тамм Е. И., Коняев Ю. А., Кочегаров Ю. М., Милованов В. П., Румянцев А. С., Илющенко Р. Р., Майструк Р. Г., Ханюченко Н. И., Орлов А. А., Твердохлебов С. В.* Высокоэффективная система обнаружения скрытых взрывчатых веществ // Наука — производству. 2000. Т. 6, № 31. С. 33.
3. *Богданович Б. Ю., Буянов Г. О., Нестерович А. В.* Повышение эффективности систем дистанционного радиационного контроля на базе линейного ускорителя электронов // Журн. техн. физики. 2021. Вып. 7. С. 1174.
4. *Завадцев А. А., Завадцев Д. А., Никольский К. И., Савин Е. А., Смирнов А. Ю., Собенин Н. П.* Высокочастотный тракт линейного ускорителя электронов на 40 МэВ // Вестн. нац. исслед. ядерн. ун-та «МИФИ». 2014. Т. 3, № 1. С. 71.
5. *Завадцев А. А., Завадцев Д. А., Никольский К. И., Савин Е. А., Собенин Н. П.* Расчет и настройка линейного ускорителя электронов на энергию 40 МэВ // ПТЭ. 2013. № 5. С. 14.

Получено 26 мая 2022 г.