

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 621.384.64

**СИСТЕМА ИНСПЕКЦИИ ГРУЗОВ НА ОСНОВЕ ДУАЛЬНОГО
ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ**

© 2011 г. А. А. Завадцев, Д. А. Завадцев, А. А. Краснов,
Н. П. Собенин, С. В. Куцаев, Д. В. Чуранов, М. О. Урбант

Филиал СКАНТЕК САЕНСИС, ЛЛС

111394, Россия, Москва, ул. Перовская, 61/2, стр. 1

E-mail: azavadtsev@yandex.ru

Поступила в редакцию 20.07.2010 г.

Системы рентгеновской инспекции контейнеров [1–3] с функцией Z-анализа являются одним из развивающихся направлений аппаратуры для инспекции грузов. Для такой системы создан линейный ускоритель электронов с быстрой перестройкой энергии, работающий в режиме чередования импульсов ускоренных электронов с низкой и высокой энергией. Выходная энергия электронов в этом ускорителе может управляться программно в диапазоне 3–15 МэВ. Рентгенографическое изображение контейнера получается в моноэнергетическом режиме с энергией 9 МэВ. Для определения материалов, содержащихся в контейнере (функция Z-анализа), используются импульсы с энергией 4 и 9 МэВ. Линейный ускоритель электронов со стоячей волной работает на частоте 2856 МГц; частота повторения импульсов с разными энергиями 240 Гц; длительность импульса 10 мкс; энергия пучка в каждом импульсе >10 Дж.

ВВЕДЕНИЕ

В рамках коммерческих разработок фирмой СКАНТЕК САЕНСИС, ЛЛС разработана система инспекции грузовых контейнеров [3], использующая импульсы с энергией 4 и 9 МэВ линейного ускорителя электронов.

Система инспекции предназначена для получения рентгенографического изображения инспектируемого объекта и определения материалов, содержащихся в нем. Особое внимание уделяется обнаружению элементов с большим атомным номером ($Z > 72$), к которым относятся такие делящиеся элементы, как плутоний, уран, а также некоторые элементы (например, свинец, вольфрам), которые могут служить защитой делящихся материалов, затрудняющей их обнаружение с помощью пассивного контроля γ -излучения.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Ускоряющий резонатор

Ускоряющий резонатор представляет собой одну секцию на основе бипериодической ускоряющей структуры [4], работающей в режиме стоячей волны. Секция состоит из Ω -образных ускоряющих ячеек и ячеек связи, расположенных на оси. На рис. 1 показано распределение напряженности поля в первых трех с половиной ячейках. Полная длина ускоряющей секции составляет 1 м.

Максимальное значение эффективного шунтового сопротивления структуры получено при отношении длины ускоряющего промежутка к

периоду ячейки 0.6. Тем не менее, в целях увеличения электрической прочности оно увеличено до 0.8. Для регулировки энергии от импульса к импульсу используются два параметра: величина инжектируемого тока и мощность клистрона.

На рис. 2 показаны распределения тока ускоренного пучка с энергиями 4 и 9 МэВ, а также энергетические спектры, полученные расчетом. Поскольку фокусировка электронов в структуре осуществляется с.в.ч.-полями, нет необходимости в использовании внешних магнитных полей.

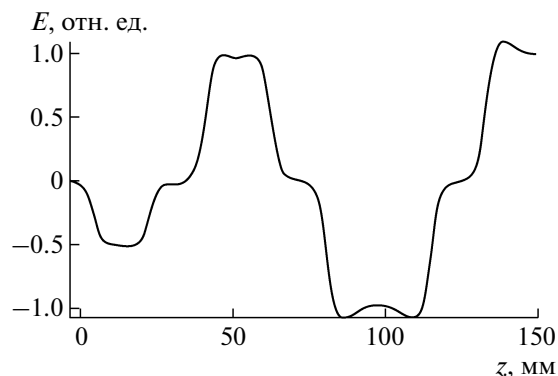


Рис. 1. Моделирование распределения электрического поля в структуре.

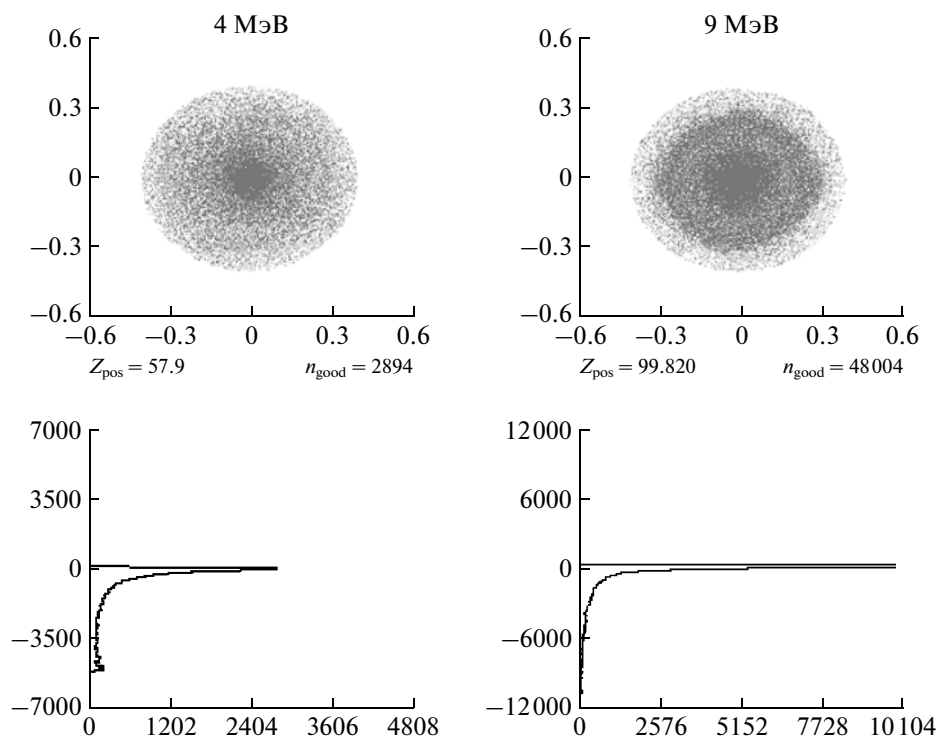


Рис. 2. Поперечные сечения (см) и энергетические спектры (горизонтальная ось – отн.ед., вертикальная ось – МэВ) пучков с энергиями 4 и 9 МэВ.

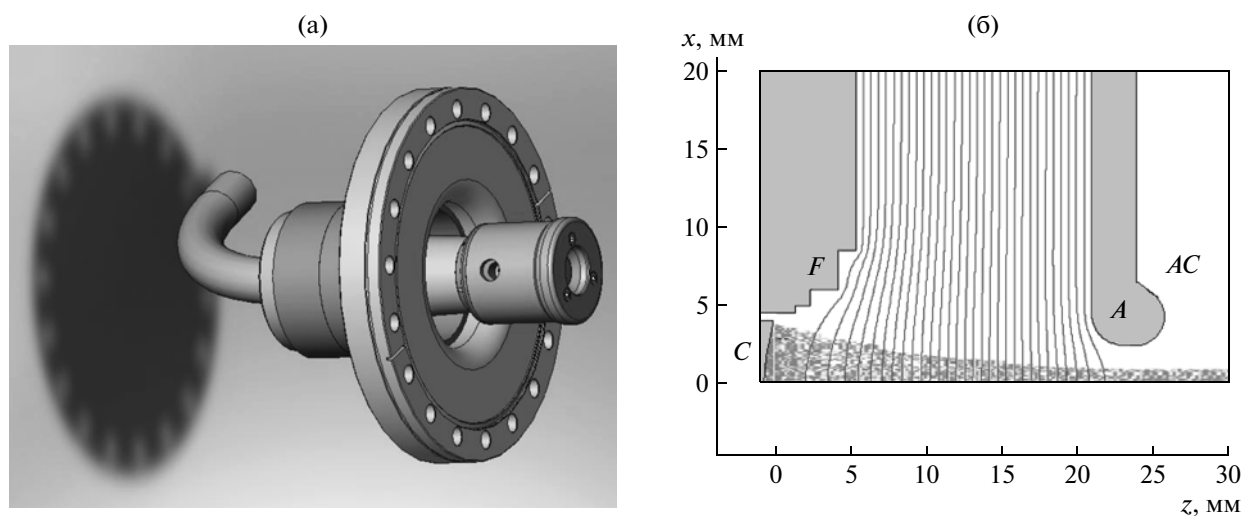


Рис. 3. Модель инжектора: а – внешний вид; б – эквипотенциальные линии и траектории инжектируемых электронов, С – катод, F – фокусирующий электрод, А – анод, АС – ускоряющая ячейка.

Инжектор

В качестве инжектора электронов используется трехэлектродная электронная пушка, управляемая сеткой. Пушка инжектирует электроны с энергией 40 кэВ при токе 1.5 А. На рис. 3 приведены: внешний вид инжектора (рис. 3а), соответствующие эквипотенциальные линии и траектории инжектируемых электронов (рис. 3б).

Конверсионная мишень

Мишень состоит из тонкого вольфрамового слоя и медного радиатора, охлаждаемого водой. График распределения температуры от времени показан на рис. 4. Пиковые температуры в вольфраме и меди составляют 1600°C и 700°C соответственно.

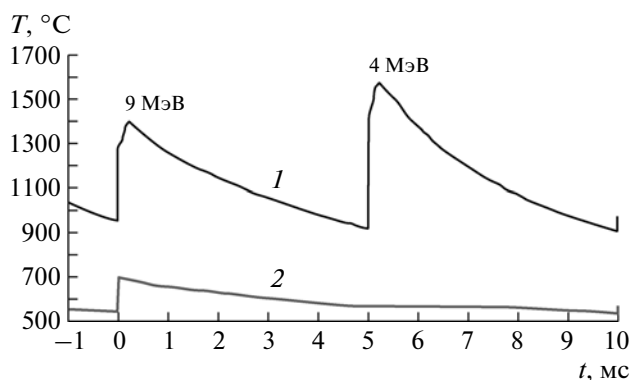


Рис. 4. График изменения во времени максимальной температуры в вольфраме (1) и температуры на поверхности спая вольфрама и меди (2).

Угловое распределение тормозного излучения из вольфрамовой конверсионной мишени при различной энергии электронов приведено на рис. 5.

Тормозное излучение, образующееся в результате взаимодействия пучка ускоренных электронов с материалом конверсионной мишени, не является монохроматичным. Рассчитанные энергетические спектры тормозного излучения в осевом направлении при разных значениях энергии монохроматического пучка электронов E_e приведены на рис. 6.

Источник с.в.ч.-мощности

Система подачи с.в.ч.-мощности включает в себя следующие компоненты: клистрон с выходной пиковой мощностью 5 МВт и средней 10 кВт, ферритовый циркулятор для защиты клистрона от отраженной волны, две волноводные нагрузки для поглощения отраженной волны, волноводное вакуумное керамическое окно для разделения вакуумной и газонаполненной частей волновода, направленный ответвитель для контроля уровня выходной мощности клистрона и мощности, отраженной от ускоряющего резонатора, и волноводный узел вакуумной откачки, соединенный с ионным насосом. Система ввода мощности заполнена элегазом (SF_6) при давлении 2.5 бар от клистрона до вакуумного окна и высоким вакуумом от вакуумного окна до ускоряющей секции.

С.в.ч.-система малой мощности предназначена для возбуждения клистрона и для автоматического слежения частоты генерации за собственной частотой ускоряющего резонатора. Она включает кварцевый задающий генератор, вектор-модулятор для управления уровнем мощности возбуждения, с.в.ч.-ключ для формирования с.в.ч.-импульсов длительностью 10 мкс, предварительный усилитель, фазовый детектор для измерения теплового сдвига фазы коэффициента передачи S_{12}

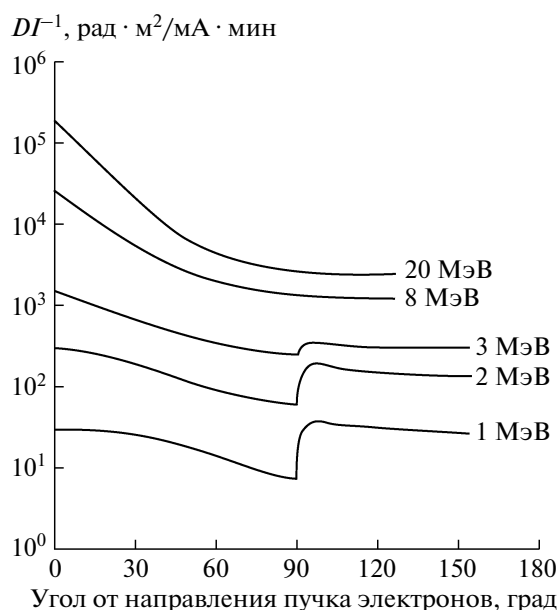


Рис. 5. Угловое распределение тормозного излучения из конверсионной мишени.

ускоряющего резонатора (соответствующего тепловому сдвигу собственной частоты ускоряющего резонатора) и автоматической подстройки частоты задающего генератора, мощный с.в.ч.-усилитель для получения номинального уровня мощности возбуждения клистрона, каналы детектирования измеренных сигналов выходной мощности клистрона, отраженной мощности, уровня поля в ускоряющем резонаторе. Все измеренные сигналы — цифровые.

Модулятор

Для питания клистрона и инжектора импульсным высоковольтным напряжением используется твердотельный модулятор. Он включает в себя модуль зарядки конденсатора, работающий в режиме переключения, высоковольтный конденсатор на 25 кВ, ключ IGBT, импульсный трансформатор, источник напряжения смещения, источник питания накала клистрона, источник накала инжектора, высоковольтный переключатель напряжения инжектора, источник питания напряжения сетки инжектора, масляный бак.

Модулятор обеспечивает: 130 кВ, 100 А, 0–10 мкс, 20 кВт для клистрона; 40 кВ, 2 А, 0–10 мкс для инжектора. Весь модулятор помещен в масляный бак.

Система откачки

Система откачки создает высокий вакуум в ускоряющем резонаторе, инжекторе и волноводе. В линейном ускорителе используется безмасля-

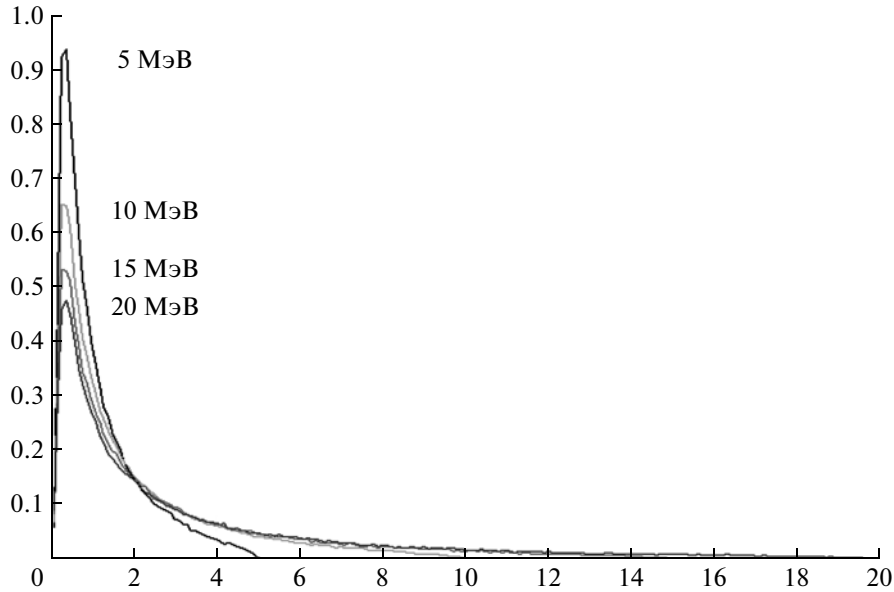


Рис. 6. Энергетический спектр тормозного излучения.

ная вакуумная система с несколькими насосами, чтобы поддерживать требуемые условия на разных этапах использования. Сухой спиральный насос со скоростью откачки 100 л/мин используется для получения безмасляного форвакуума $\sim 10^{-3}$ мбар, турбомолекулярный насос со скоростью откачки 70 л/с используется для выхода на уровень 10^{-6} мбар, а ионный насос со скоростью откачки 150 л/с используется для окончательной откачки до 10^{-8} мбар.

Система локальной защиты

Система защиты служит для предохранения оператора, персонала и оборудования системы инспекции грузов от ионизирующего излучения. Внутри локальной защиты расположены инжектор, ускоряющий резонатор, мишень, волноводный узел откачки, вакуумное окно и ионный насос. В этой полости имеется коллимационная щель для выхода тормозного излучения. Локальная защита сделана из свинцовых кирпичей, собранных внутри контейнера (рис. 7). Рассчитанное распределение дозы облучения внутри и снаружи защиты показано на рис. 8.

Прохождение тормозного излучения через вещество

Основными механизмами потери энергии тормозного излучения в веществе являются фотоэффект, эффект Комптона и образование электрон-позитронных пар [5]. Образование пар происходит при энергии пучка, превышающей удвоенную энергию покоя электрона, т.е. 1.022 МэВ. Фотоэф-

фект имеет место при небольшой энергии — до 200 кэВ, с увеличением энергии возрастает вклад эффекта Комптона. При энергиях пучка $>2-3$ МэВ рождение пар вносит основной вклад в потери энергии тормозного излучения. Соответствующие зависимости представлены на рис. 9. Линии раздела областей на рис. 9 определяют границу половинного вклада соседних эффектов.

Величина ослабления тормозного излучения в веществе зависит от энергии тормозного излучения E_γ и от атомного номера вещества Z и характеризуется сечением рассеяния $\delta_Z(E_\gamma)$.

Слой двукратного ослабления тормозного излучения в веществе равен

$$\rho h_Z(E_\gamma) = M_Z \lg 2 / N_A \delta_Z(E_\gamma), \text{ кг/м}^2,$$

где M_Z , кг/моль — молярная масса материала с атомным номером Z ; $N_A = 6.022 \cdot 10^{23}$ моль $^{-1}$ — число Авогадро; $\delta_Z(E_\gamma)$, барн — сечение рассеяния.

Значения величины сечения рассеяния для всех элементов и для диапазона энергии тормозного излучения от 0 до 20 МэВ приведены на рис. 10.

Поверхностная молярная плотность слоя двукратного ослабления материала с атомным номером Z соответствует уменьшению интенсивности тормозного излучения в 2 раза (см. рис. 11):

$$\rho h m_Z(E_\gamma) = \rho h_Z(E_\gamma) / M_Z = \lg 2 / N_A \delta_Z(E_\gamma), \text{ моль/м}^2.$$

Детекторная станция

Тормозное излучение из конверсионной мишени проходит через инспектируемый объект, ослабляется в нем и детектируется в детекторной

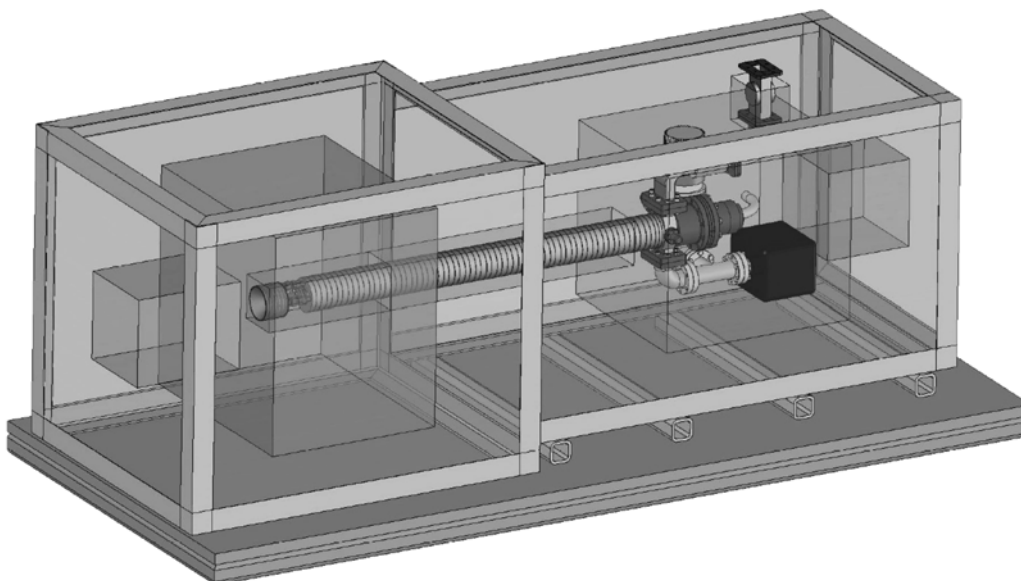
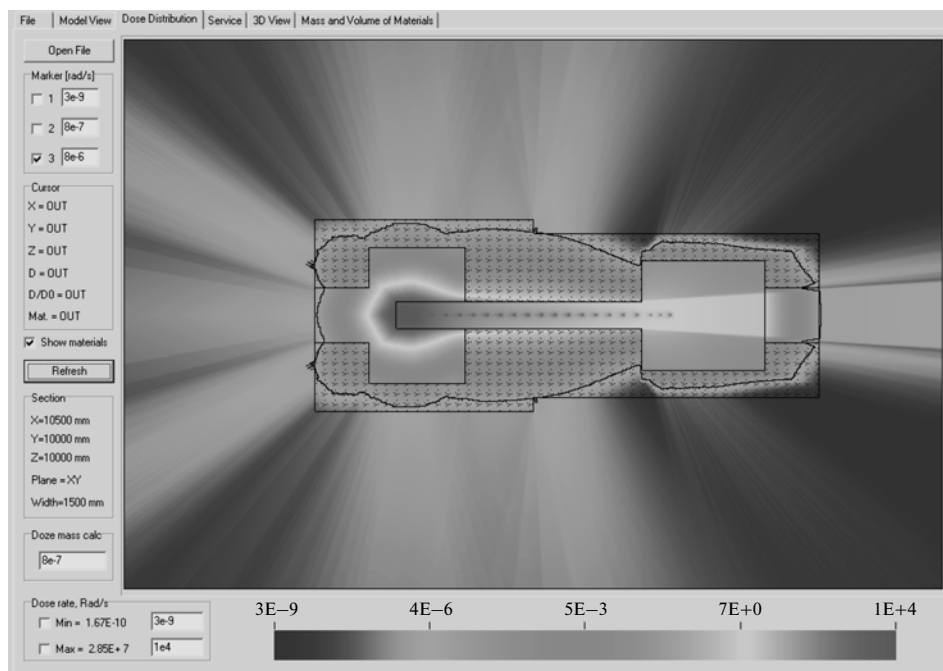


Рис. 7. Локальная защита.

Рис. 8. Рассчитанное распределение мощности дозы (черная линия внутри свинца соответствует изодозе 8×10^{-6} рад/с).

станции. Станция включает 1024 сцинтилляционных детектора (кристалл CdWO_4), расположенных на одной линии в вертикальной плоскости, проходящей через ось ускорителя.

Сигнал из каждого детектора интегрируется и оцифровывается и направляется в модуль управ-

ления для предварительной обработки и пересылки в компьютер системы управления для формирования рентгенографического изображения.

Для определения материала внутри инспектируемого контейнера в случае, если инспектируемый объект включает один материал, энергия, поглощенная в сцинтилляторе, равна:

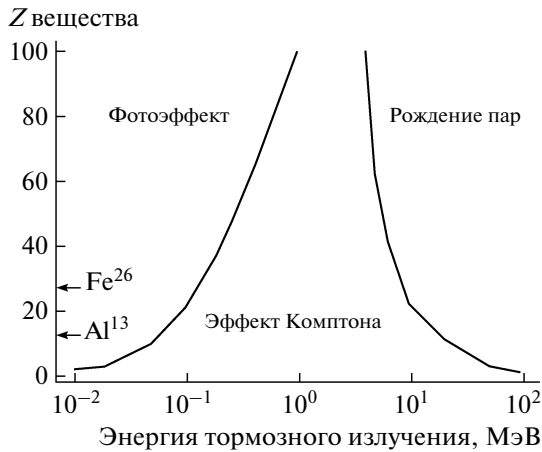


Рис. 9. Основные механизмы ослабления тормозного излучения в веществе.

$$W_Z(\rho m) = k \int D_Z(E_\gamma, \rho m) T(E_\gamma) dE_\gamma,$$

где k – коэффициент, зависящий от энергии импульса ускоренных электронов, расстояния от конверсионной мишени до детектора и размеров детектора;

$$D_Z(E_\gamma, \rho m) = S(E_\gamma) 2^{-\rho m / \rho h m} Z^{(E_\gamma)}$$

– энергетический спектр тормозного излучения на входе в сцинтиллятор; $S(E_\gamma)$ – спектральная функция для пучка ускоренных электронов с реальным энергетическим спектром; $T(E_\gamma)$ – коэф-

фициент спектрального поглощения детектора, ρm и Z – молярная поверхностная плотность и атомный номер материала.

Таким образом, коэффициент передачи тормозного излучения через inspected объект равен

$$K_Z(\rho m) = W_Z(\rho m) / W = (k/W) \int D_Z(E_\gamma, \rho m) T(E_\gamma) dE_\gamma.$$

Теперь необходимо определить молярную поверхностную плотность ρm и атомный номер материала Z на основе коэффициентов передачи K^1 и K^2 , измеренных детектором при двух различных энергиях E_e^1 и E_e^2 . Следующие два уравнения позволяют нам определить две неизвестные величины ρm и Z :

$$K^1 = K_Z^1(\rho m),$$

$$K^2 = K_Z^2(\rho m),$$

где $K_Z^1(\rho m)$ и $K_Z^2(\rho m)$ – коэффициенты передачи тормозного излучения для каждой энергии.

Поскольку спектральная функция $S(E_\gamma)$ зависит от углового положения детектора φ , коэффициенты передачи тормозного излучения $K_Z^1(\rho m)$ и $K_Z^2(\rho m)$ уникальны для каждого детектора.

Тестирование ускорителя

Тестовая установка включает в себя линейный ускоритель с мишенью, огражденные местной за-

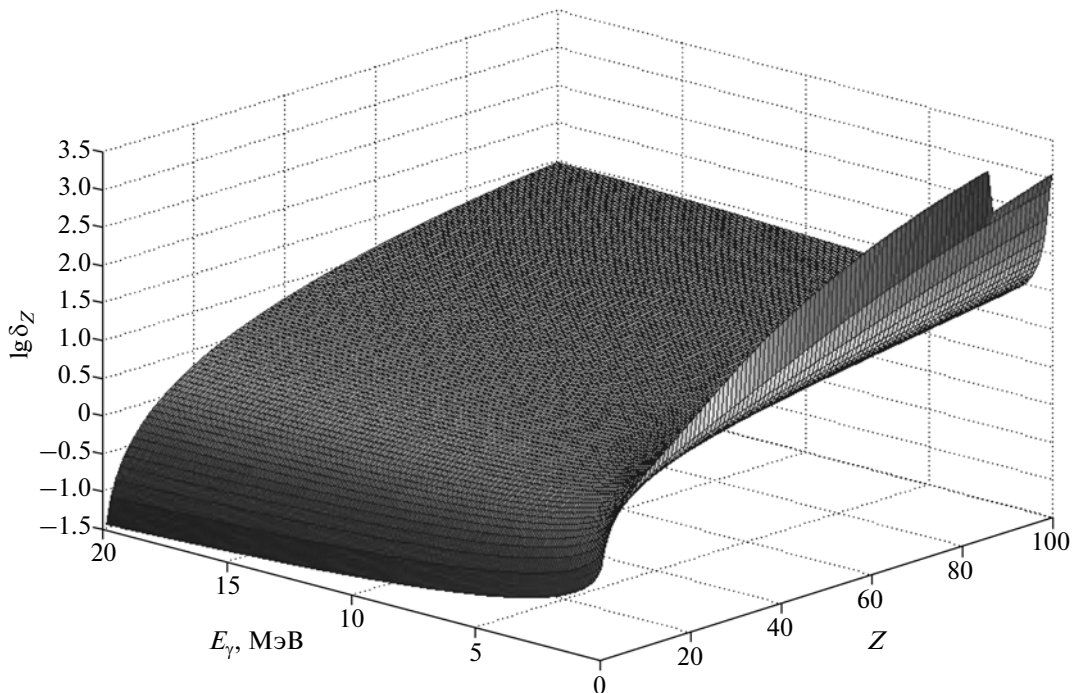


Рис. 10. Сечение рассеяния тормозного излучения.

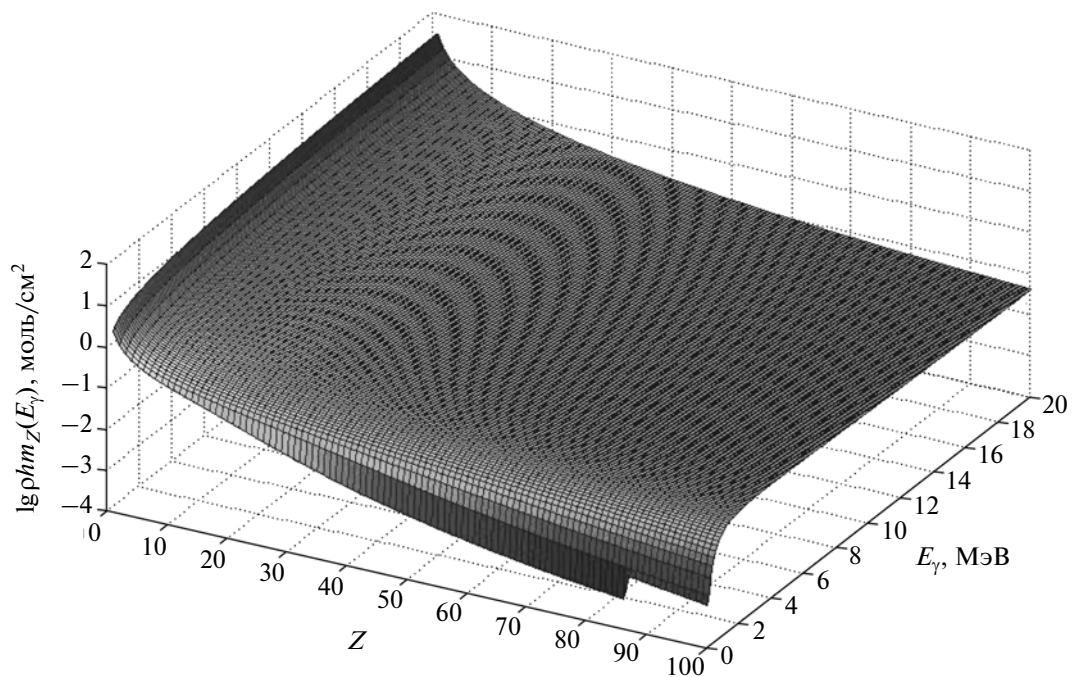


Рис. 11. Поверхностная молярная плотность слоя двукратного ослабления.

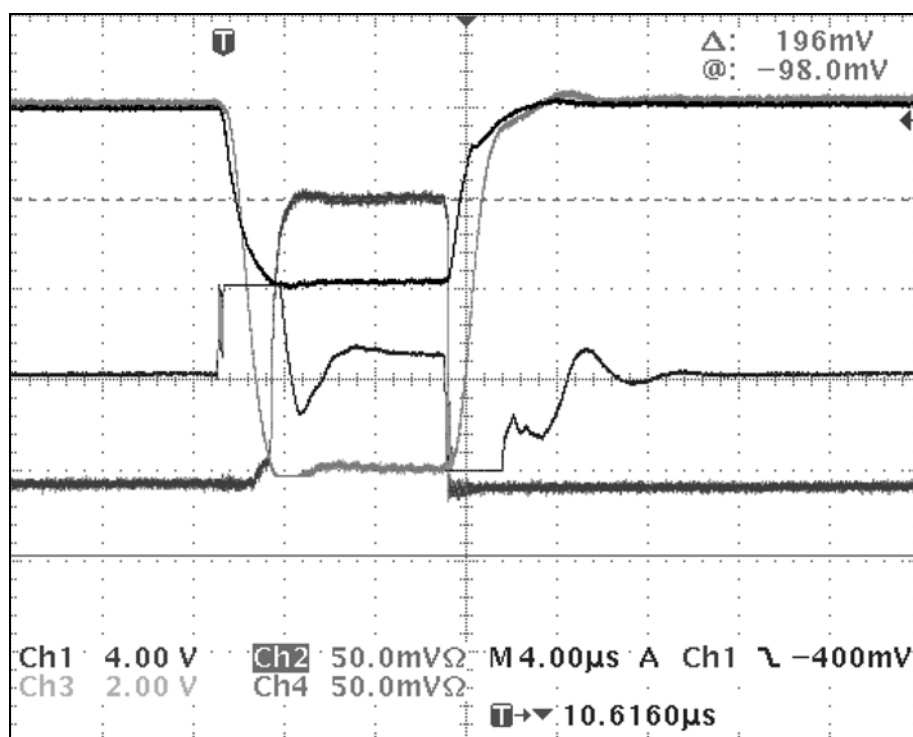


Рис. 12. Рабочая осциллограмма. Сверху вниз: напряжение питания клистрона, сигнал из ускоряющего резонатора, сигнал из трансформатора тока инжектора, сигнал из трансформатора тока ускоренного пучка.

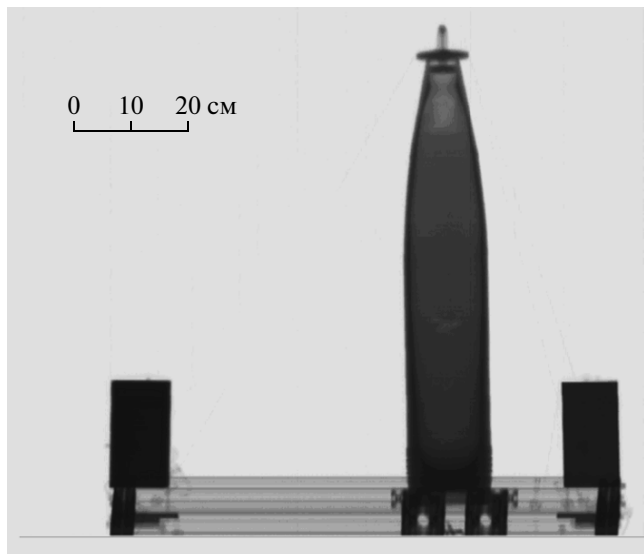


Рис. 13. Рентгеновское изображение тестового объекта инспекции.

щитой, детекторную станцию и систему управления.

При измерении параметров пучка получены значения, совпадающие с расчетными. Осциллограммы, соответствующие импульсу тока 300 мА при уровне выходной энергии 9 МэВ, показаны на рис. 12. На рис. 13 показано рентгенографическое изображение тестового объекта, полученное с помощью инспекционного комплекса. Тестовый объект включал платформу, приводимую в движение с помощью шагового двигателя, и авиационную бомбу $\varnothing 12$ см, установленную и зафиксированную на ней с помощью ременных растяжек. Стенка корпуса бомбы изготовлена из стали так, что поверхностная плотность в различных сечениях варьируется от 20 до 100 г/см². Разрешение изображения 960 × 760 пикселей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Конкретная конфигурация комплекса зависит непосредственно от ее коммерческого применения. В общем случае ускоритель должен быть компактным, надежным и безопасным. Ускори-

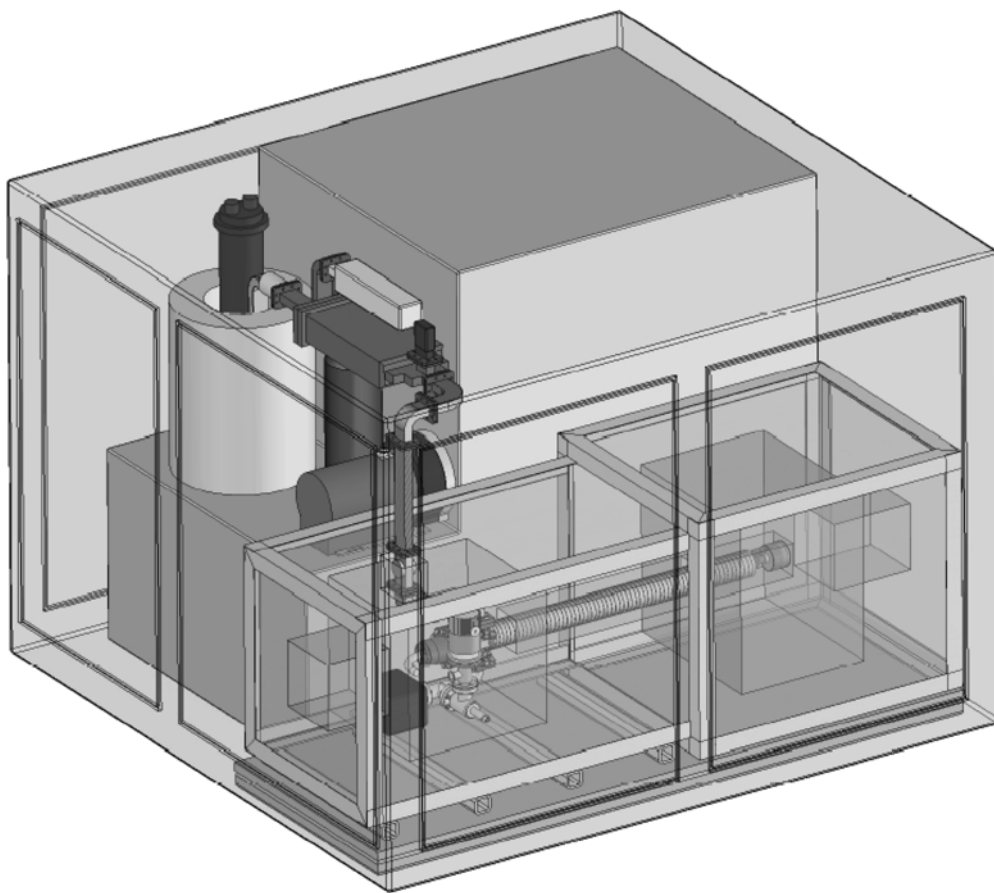


Рис. 14. Ускорительный комплекс.

тельный комплекс состоит из ускоряющей системы, инжектора, мишени и системы откачки, расположенных внутри локальной защиты, а также клистрона, циркулятора и модулятора в одной общей стойке (рис. 14). Источник мощности и система контроля находятся в отдельной комнате.

В качестве рабочих выбраны энергии номиналом 4 и 9 МэВ для работы в режиме получения Z -изображения. Для работы ускорителя в моноэнергетическом режиме для получения рентгеновского радиографического изображения используется энергия 9 МэВ. Возможность работы в режиме 15 МэВ включена для дальнейшего усовершенствования методов определения атомного номера радиоактивных материалов с возможностью нейтронной регистрации.

Работающий в S -частотном диапазоне ускоритель рассчитан, создан, протестирован и готов к коммерческому использованию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ogorodnikov S., Petrunin V.* // Processing of interlaced images in 4–10 MeV dual energy customs system for material recognition. *Physical Review Special Topics – Accelerators and Beams*. 2002. V. 5. P. 104701.
2. *Auditore L., Barna R.C., Loria D., Morgana E. et al.* // Proc. XXIII Particle Accelerator Conf. PAC'09, 4–8 May 2009, Vancouver, British Columbia, Canada, TU6PFP039.
3. *Ferderer M.A., Zavadtsev A.A., Zavadtsev D.A., Krasnov A.A. et al.* // Proc. XXIII Particle Accelerator Conf. PAC'09, 4–8 May 2009. Vancouver, British Columbia, Canada, TU6PFP042.
4. *Каминский В.И., Лалаян М.В., Собенин Н.П.* Ускоряющие структуры. М.: МИФИ, 2005.
5. *Богданович Б.Ю., Нестерович А.В., Шуканов А.Е. и др.* Дистанционный радиационный контроль с линейными ускорителями. Том 1. Линейный ускоритель для генерации тормозного излучения и нейтронов. М.: Энергоатомиздат, 2009.