

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ МОБИЛЬНЫХ РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ НА БАЗЕ ЦИКЛИЧЕСКОГО УСКОРИТЕЛЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ РАБОТЕ ОБЫЧНЫХ ВООРУЖЕНИЙ

*Фомичёв Вадим Алексеевич (selemir@vniief.ru), Савченко Кирилл Валерьевич,
Чинин Айлан Альбертович, Шамро Олег Алексеевич*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Дан обзор существующих исследовательских комплексов, предназначенных для радиографирования динамических объектов с большими оптическими толщинами. Описаны мобильные рентгеновские установки на базе безжелезного импульсного малогабаритного бетатрона. Приведены их выходные характеристики. В рамках создания центра коллективного пользования предложен вариант схемы размещения оборудования мобильного рентгенографического комплекса для исследования работы обычных вооружений. Представлен план первоочередных мероприятий по созданию такого центра. Центр коллективного пользования позволит повысить информативность исследований работы обычных вооружений и элементов защиты от их воздействия.

Ключевые слова: бетатрон, радиографирование, γ -излучение, обычные вооружения, центр коллективного пользования.

PROPOSALS ON APPLICATION OF MOBILE RADIOGRAPHIC COMPLEXES BASED ON CYCLIC ACCELERATOR FOR INVESTIGATION OF DYNAMIC PROCESSES AT CONVENTIONAL ARMS OPERATION

*Fomichev Vadim Alexeyevich (selemir@vniief.ru), Savchenko Kirill Valeryevich,
Chinin Ailan Albertovich, Shamro Oleg Alexeyevich*

FSUE «RFNC-VNIIEF», Sarov Nizhny Novgorod region

The paper concerns existent research complexes that are aimed for the radiography of dynamic objects with a large optical thickness. Mobile X-ray facilities based on the ironless pulsed compact betatron are described. The output parameters of the facilities are provided. The equipment layout version of the mobile radiographic complex for the investigation of the conventional arms operation is proposed in the framework of the sharing radiographic center realization. The priority action list for the center realization is presented. The sharing radiographic center will allow increasing the information capability of the investigations of the conventional arms and protection elements operation.

Key words: betatron, radiography, γ -radiation, conventional arms, sharing radiographic center.

Введение

Радиографирование динамических процессов, протекающих в оптически плотных средах, в настоящее время является одним из основных методов исследований при отработке вооружений. Для данного метода необходимы мощные источники импульсного γ -излучения. Информативность подобных исследований определяется интенсивностью выходного излучения источника, его пространственным разрешением, количеством генерируемых импульсов в одном опыте, их длительностью, воспроизводи-

мостью параметров излучателя и рядом других факторов.

Генераторы излучения, реализованные на базе ускорителей частиц, в зависимости от способа ускорения можно условно разделить на линейные и циклические. Оба способа имеют свои преимущества и недостатки, а целесообразность их применения определяется конкретной решаемой задачей.

Существуют несколько действующих рентгенографических комплексов на основе линейных ускорителей, среди них – американские DARTH-I, DARTH-II, китайские DRAGON-I, DRAGON-II,

Характеристики рентгенографических комплексов на основе линейных ускорителей

Параметры	AIRIX, Франция	DARTH-I, США	DARTH-II, США	DRAGON-I, Китай	DRAGON-II, Китай	ЛИУ-20, Россия
Энергия электронов, МэВ	20,0	19,8	18,4	19,2	20,0	20,0
Ток пучка, кА	3,5	2,0	2,0	2,5	2,5	1,0
Количество импульсов и их длительность, нс	1 × 60	1 × 60	4 × (20-100)	1 × 70	3 × 60	1 × 100
Диаметр пучка, мм	1,6–2,0	1,9–2,1	1,9–2,1	1,0	1,0	1,5

Таблица 2

Характеристики рентгенографических комплексов на основе бетатронов

Параметры	РГКБ	РГКБ-1
Граничная энергия γ -квантов, МэВ	53	65
Экспозиционная доза в импульсе на 1 м, Р	30	35
Длительность импульса в одноимпульсном режиме, нс	120	150
Длительности импульсов в трехимпульсном режиме, нс	220, 160, 120	250, 180, 150
Размер фокусного пятна, мм ²	2 × 4	3 × 6
Количество импульсов, шт.	9	6



а



б

Рис. 1. Фотографии рентгенографических комплексов: а – РГКБ, б – РГКБ-1

французский AIRIX, российский ЛИУ-20 и другие [1]. Основные характеристики этих рентгенографических комплексов приведены ниже (см. табл. 1).

Во ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» и ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академика Е. И. Забабахина» для проведения газодинамических исследований в рентгенографических комплексах в течение длительного времени применяются циклические ускорители на базе безжелезного импульсного малогабаритного бетатрона (бетатрона типа БИМ). Комплексы РГКБ и РГКБ-1 включают в себя три и два ускорителя БИМ 234.3000 [2] соответственно. Основные характеристики российских рентгенографических комплексов на основе бетатронов приведены ниже (см. табл. 2).

Общий вид рентгенографических комплексов РГКБ и РГКБ-1 показан на рис. 1.

Такие комплексы представляют собой стационарные сооружения, разработка, создание и эксплуатация которых требует значительных финансовых и временных ресурсов.

Мобильные рентгеновские установки на базе бетатрона типа БИМ

С целью повышения информативности, минимизации затрат и оптимизации процесса подготовки и проведения газодинамических опытов во ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» разработана и реализуется концепция применения мобильных рентгенографических комплексов (МРГК) [3]. Комплекс включает в себя один или несколько генераторов рентгеновского излучения, собранных на базе мобильных циклических ускорителей (МЦУ), взрывозащитную камеру (ВЗК) с объектом исследования, системы коллимации рентгеновского излучения и системы регистрации теневых изображений. С помощью нескольких МЦУ осуществляется просвечивание объекта исследования с разных направлений. Фотография одноракурсного трехимпульсного МРГК представлена на рис. 2.

Основной составляющей МРГК является МЦУ, состоящий из ускорительного модуля (УМ) и модуля импульсного питания электромагнита (МИПЭ) бета-



Рис. 2. Фотография одноракурсного трехимпульсного мобильного рентгенографического комплекса: 1 – модуль импульсного питания электромагнита бетатрона, 2 – ускорительный модуль, 3 – система коллимации рентгеновских лучей, 4 – ВЗК, 5 – система регистрации теневых изображений



Рис. 3. Фотографии одноракурсного трехимпульсного МЦУ: 1 – фургон модуля импульсного питания электромагнита бетатрона, 2 – фургон ускорительного модуля, 3 – бетатрон типа БИМ

трона. Связь между модулями и внешней автоматизированной системой управления и контроля осуществляется с помощью кабельных и волоконно-оптических линий. Общая потребляемая электрическая мощность МЦУ в рабочем цикле продолжительностью $t_{\text{раб}} \approx 2$ мин составляет 20 кВт. Интервал между рабочими циклами $t_{\text{мин}} \approx 5$ мин. Выходные параметры МЦУ БИМ следующие: граничная энергия γ -квантов ≈ 60 МэВ, просвечивающая способность на 4-х метрах от танталовой мишени ускорителя ≈ 140 мм по свинцу, размер фокусного пятна равен 2×4 мм. Длительность импульса тормозного излучения в одноимпульсном режиме составляет 150 нс.

В настоящее время разработаны и реализуются несколько вариантов размещения оборудования модулей МЦУ. Первый вариант – оборудование модулей располагаются в двух фургонах размерами $6 \times 2,5$ м (рис. 3) [4]. В фургоне ускорительного модуля 2 располагаются элементы рентгеновской установки, в другом фургоне 1 – система импульсного питания электромагнита бетатрона и технологическое оборудование. Вес ускорительного модуля ≈ 14 тонн, МИПЭ ≈ 11 тонн. Второй вариант – оборудование УМ расположено на юстировочной платформе размерами 7×2 м, вес модуля ≈ 7 тонн. Оборудование МИПЭ расположено на транспортировочной платформе размером 5×2 м, его вес ≈ 2 тонны (рис. 4). Третий вариант – оборудование УМ и МИПЭ располагаются в транспортировочных кон-

тейнерах размерами $12 \times 2,5 \times 4$ м и $6 \times 2,5 \times 4$ м соответственно. Еще один контейнер размером $12 \times 2,5 \times 4$ м предназначен для размещения оперативного персонала, осуществляющего управление и контроль установки. На рис. 5 приведены трехмерные модели данного варианта реализации МЦУ БИМ.

Центр коллективного пользования

Применение МРГК возможно и в исследованиях работы боевых частей (БЧ) обычных вооружений. Комплекс позволит исследовать такие вопросы как формирование детонационного режима и распространение ударных волн, разлет осколков металлической оболочки заряда, динамика взрыва заряда ВВ на поверхности грунта, поведение струи кумулятивного заряда, сжатие объекта под действием взрыва ВВ [5].

В последние десятилетия в многочисленных зарубежных научных публикациях [6-10] и диссертациях (см., например, [11]) наблюдается большой интерес к изучению динамики проникновения снарядов в подвижную броню при помощи импульсной рентгенографии, сопровождающейся численными экспериментами. Такие исследования позволяют подбирать оптимальные материалы для изготовления защитной брони, исследовать зависимость разрушительного эффекта от угла между направле-

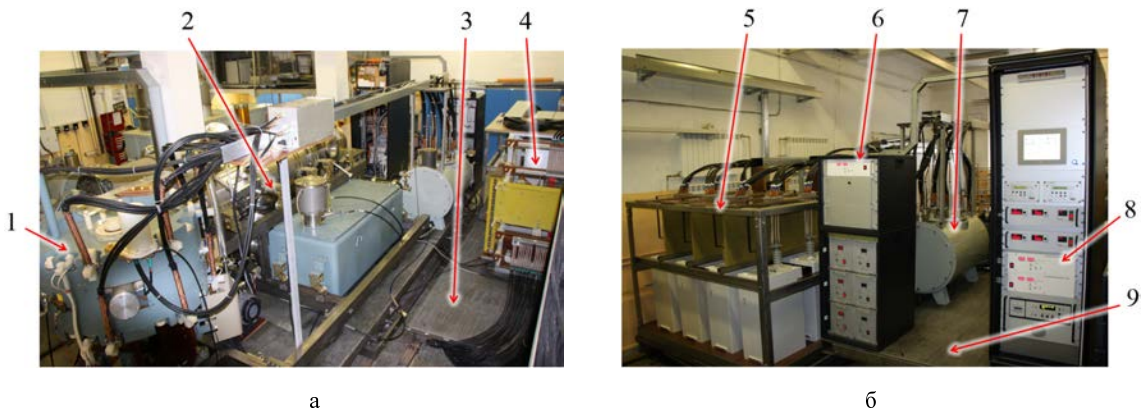


Рис. 4. Фотографии МЦУ БИМ: а – вид спереди, б – вид сзади: 1 – бетатрон, 2 – инжектор, 3 – транспортировочная платформа, 4 – стойка коммутации, 5 – емкостный накопитель энергии, 6 – стойка высоковольтной синхронизации, 7 – генератор быстрого сброса, 8 – автоматизированная система управления и контроля, 9 – юстировочная платформа

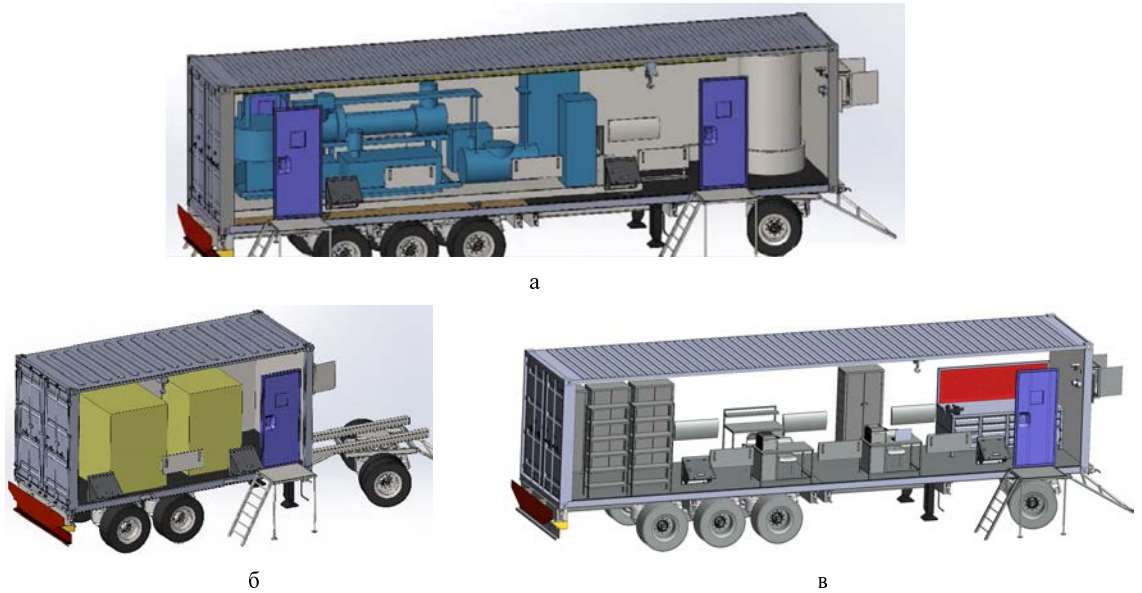


Рис. 5. Трехмерные модели МЦУ БИМ с размещением оборудования модулей в транспортировочных контейнерах: а – ускорительный модуль, б – МИПЭ, в – модуль управления и контроля

ниями скорости снаряда и брони и от величины скорости в момент контакта, изучать динамику процесса, подбирать геометрические параметры снаряда (например, отношение L/D , где L и D – длина и диаметр налетающего снаряда).

На рис. 6 представлен вариант схемы проведения эксперимента по исследованию работы БЧ обычных вооружений с использованием рентгенографического комплекса (РГК).

Для реализации подобной схемы проведения экспериментов необходимо разработать и создать РГК, который может стать частью центра коллективного пользования (ЦКП). Поскольку информативность рентгенографирования динамических процессов существенно повышается при просвечивании объекта исследования несколькими лучами с независимыми пространственными координатами, комплекс должен включать в себя несколько (как минимум два) МЦУ. В этом случае, используя рентгеновские снимки, можно найти, как распределен

материал в объекте исследования, не прибегая к предположениям о его симметрии. Комплекс позволит изучать работу, как самой боевой части, так и работу элементов защиты от ее воздействия.

Заключение

Для принятия решения о создании РГК ЦКП необходимо выполнить следующие мероприятия:

1. Определить конкретный перечень задач по исследованию работы БЧ обычных вооружений с применением РГК ЦКП с ведущими организациями, занимающимися исследованиями и разработками боевых оснащений различных типов.

2. Провести анализ поставленных задач и разработать техническое предложение по созданию ЦКП с оптимальным вариантом компоновки оборудования РГК для их решения.

3. Провести пробные включения стационарного циклического ускорителя (СЦУ БИМ) для того, что-

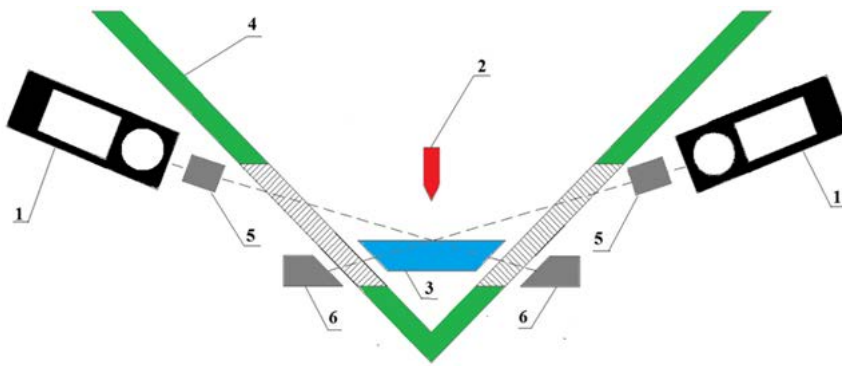


Рис. 6. Схема проведения экспериментов по исследованию работы боевых частей обычных вооружений с использованием РГК: 1 – МЦУ, 2 – боевая часть, 3 – объект воздействия, 4 – броневая противоосколочная защита с «окнами прозрачности», 5 – система коллимации рентгеновских лучей, 6 – система регистрации теневых изображений

бы отработать временную диаграмму срабатывания систем СЦУ БИМ с учетом работы динамических БЧ малого калибра и систему регистрации теневых изображений объектов исследования.

4. Осуществить модернизацию МЦУ БИМ и провести зачетный динамический опыт на внутреннем полигоне.

5. Разработать необходимую документацию согласно регламенту проведения ОКР.

6. Подготовить группу квалифицированных специалистов для эксплуатации РГК ЦКП.

Создание рентгенографического центра коллективного пользования для повышения информативности исследований работы боевых частей обычных вооружений с учетом накопленного в РФЯЦ-ВНИИЭФ опыта по созданию и оптимизации МРГК является решаемой задачей.

Список литературы

1. Reviews of accelerators science and technology: Accelerators for high intensity beams. Ed. by Chao A. W. and Chou W. Singapore: World Scientific, 2013. P. 126.

2. Ахметов А. Р., Каргин А. А., Колесников П. А. и др. Установка БИМ234.3000М и ЛИУ-2 в составе рентгенографического комплекса РГК-Б1 / XII международная конференция «Забабахинские научные чтения» // Сборник материалов. Снежинск: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ», 2014. С. 50–52.

3. Пат. 2548585, РФ, МПК G03B 42/02 Мобильный радиографический комплекс и источник излучения бетатронного типа для радиографического комплекса / Зенков Д. И., Куропаткин Ю. П., Нижегородцев В. И. и др. // Бюллетень изобретений. 2015. № 11.

4. Fomichev V. A., Chinin A. A., Kozlov S. G. et al. Mobile accelerator based on ironless pulsed betatron

for dynamic objects radiographing / 10th Particle Accelerator Conference // JACOW conference proceedings. Melbourne, Australia, 2019. DOI:10.18429/JACoW-IPAC2019-THPMP026.

5. Экспериментальные методы в физике ударных волн и детонации. Монография под ред. д-ра физ.-мат. наук, проф. Жерноклетова М.В. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2020. С. 145.

6. Anderson C.E., Burkins M.S., Walker J.D. et al. Time-Resolved Penetration of B₄C Tiles by the APM2 Bullet / CMES. 2005. Vol. 8, N 2. P. 91–104.

7. Pawlowski P., Frasn T. Numerical and experimental investigation of asymmetrical contact between a steel plate and armour-piercing projectiles / 11th European LS-DYNA Conference // Proceedings. Salzburg, Austria, 2017.

8. Thoma K., Helberg P., Strassburger E. Real time-resolved flash X-ray cinematographic investigation of interface defeat and numerical simulation validation / 23rd International Symposium on Ballistics // Proceedings. Tarragona, Spain, 2007. P. 1065–1072.

9. Lenihan D., Ronan W., O'Donoghue P. E. A review of the integrity of metallic vehicle armour to projectile attack / Journal of Materials: Design and Applications. 2018. DOI: 10.1177/1464420718759704.

10. Anderson C. E., Jr. and Gooch W. A. Numerical simulation of dynamic X-ray imaging experiments of 7.62 mm APM2 projectiles penetrating B₄C / 19th International Symposium on Ballistics // Proceedings. Interlaken, Switzerland, 2001. P. 1423–1429.

11. Liden E. Interaction between high-velocity penetrators and moving armour components / Degree of Doctor of Philosophy // Acta Universitatis Upsaliensis: Digital Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology 714, Uppsala, 2010.