

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ НА БАЗЕ БЕЗЖЕЛЕЗНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ БЕТАТРОНОВ PROSPECTIVE RADIOGRAPHIC FACILITIES BASED ON IRONLESS PULSED BETATRONS

*Д. И. Зенков, С. Г. Козлов, Ю. П. Куропаткин, В. И. Нижегородцев, И. Н. Романов,
К. В. Савченко В. Д. Селемир, Е. В. Урлин, О. А. Шамро*
*D. I. Zenkov, S. G. Kozlov, Yu. P. Kuropatkin, V. I. Nizhegorodtsev, I. N. Romanov, K. V. Savchenko,
V. D. Selemir, E. V. Urlin, O. A. Shamro*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»,
пр. Мира, 37, Саров, Нижегородская область, 607188, Россия
Federal Nuclear Center of Russia – All-Russian Research Institute of Experimental
Physics

Описан мобильный рентгенографический комплекс на базе безжелезных импульсных бетатронов, предназначенный для радиографии динамических объектов больших оптических толщин. Рассмотрена возможность создания многолучевого комплекса для малоракурсной квазитомографии.

This paper describes a mobile radiographic facility based on ironless pulsed betatrons. It is intended for radiography of dynamic objects having large optical thickness. Possibility of multi-beam facility design for small-angle quasi-tomography is considered.

Для радиографирования динамических объектов с большими оптическими толщинами требуются мощные источники излучения при оптимальном спектральном составе. Генераторами такого излучения являются либо линейные, либо циклические ускорители электронов, в частности, бетатроны.

Информативность рентгенографии может быть существенно повышена при просвечивании объекта тремя лучами с независимыми пространственными координатами. В этом случае можно приступить к решению задачи восстановления распределения материала в объекте исследования, не прибегая к предположениям о симметрии объекта. Реализация подобной геометрии эксперимента возможна либо при использовании нескольких ускорителей, либо разводкой электронного пучка, генерируемого, например, линейным ускорителем на необходимое число мишеней.

На наш взгляд реализация первой схемы эксперимента более предпочтительна, т.к. в отличие от многолучевого варианта с делением и разводкой пучка линейного ускорителя, здесь каждый луч независимо формируется своим ускорителем и общее число информационных квантов растёт пропорционально числу ускорителей.

В настоящее время в мире существует несколько действующих рентгенографических комплексов, реализующих первую схему эксперимента. В частности это американский комплекс DARHT [1], российские комплексы РГК-Б, РГК-Б1 [2,3].

Положительный опыт, накопленный при создании комплексов РГК-Б и РГК-Б1, позволил выдвинуть новую концепцию современных рентгенографических комплексов на базе безжелезных импульсных бетатронов [4]. Данная концепция состоит в следующем:

1) при проведении гидродинамических опытов с массой взрывчатых веществ свыше 25 кг – для размещения рентгенографических установок типа бетатронов использовать микроказематы;

2) при проведении гидродинамических опытов с массой взрывчатых веществ до 25 кг – использовать мобильные рентгенографические комплексы [5] в сочетании с взрывозащитной камерой (ВЗК). Частный вариант такого эксперимента, позволяющий получить до 9 кадров в одном опыте, представлен на рис. 1.

В реализации физического эксперимента рентгенографические установки и ВЗК(1) с объектом исследования размещаются на эксперимен-

тальной площадке. Перед опытом стенка фургона мобильного циклического ускорителя(2) откидывается в горизонтальное положение и устанавливается на регулируемые опоры. По этой горизонтальной поверхности перемещается платформа с размещенным на ней источником излучения на необходимое расстояние от ВЗК. В непосредственной близости от ВЗК размещаются системы коллиматоров и регистрации теневых изображений (3). Одну взрывозащитную камеру могут обслуживать несколько мобильных циклических ускорителей(МЦУ).

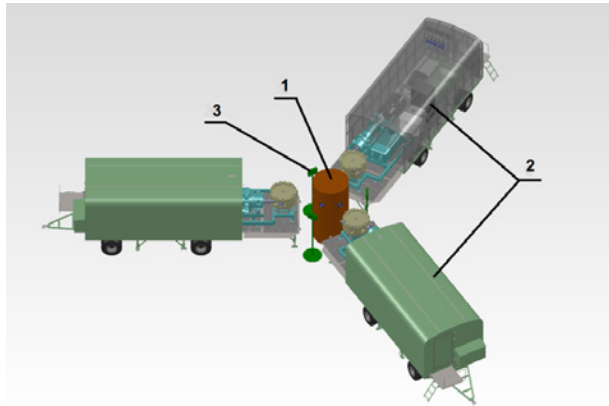


Рис. 1. Схема геометрии эксперимента с использованием мобильных рентгенографических комплексов в сочетании с ВЗК: 1 – взрывозащитная камера; 2 – мобильные циклические ускорители; 3 – система коллимации и регистрации теневых изображений

Реализация данной концепции позволяет:

1) Оптимизировать геометрию опыта за счет возможности изменения положения источника излучения и регистратора относительно объекта исследования, размещенного в ВЗК, что, в свою очередь, позволит повысить интенсивность рентгеновского излучения в плоскости регистратора как минимум в 2 раза по сравнению с действующими Российскими комплексами.

2) Существенно снизить стоимость комплексов за счет отказа от строительства массивных защитных казематов, следовательно, сократить затраты на содержание их инфраструктуры. Возможно применение дешевых быстровозводимых сооружений.

3) Создать эффективную систему защиты окружающей среды за счет локализации опасных продуктов взрыва и ударной волны, с ним связанной.

4) За счет повышения пожаробезопасности при проведении опытов, увеличить календарное время гидродинамических испытаний (в настоя-

щее время из-за высокой пожароопасности в летний период опыты не проводятся).

Базовой установкой мобильного рентгенографического комплекса является импульсный безжелезный бетатрон нового поколения. С 2002 года его узлы обрабатывались на экспериментальном стенде и параметры излучения оптимизировались.

На рис. 2 изображен эскиз однолучевого трехкадрового мобильного рентгенографического комплекса. Он включает ускорительный модуль (1), модуль импульсного питания электромагнита бетатрона (2), ВЗК (3), системы коллимации (4) и регистрации (5) теневых изображений. В фургоне ускорительного модуля, условно изображены элементы собственно рентгенографической установки, в другом, система импульсного питания электромагнита бетатрона и технологическое оборудование комплекса. Связь между модулями и внешней системой управления осуществляется с помощью кабельных и волоконной оптических линий (на эскизе мобильного рентгенографического комплекса (рис. 2) данные связи не показаны).

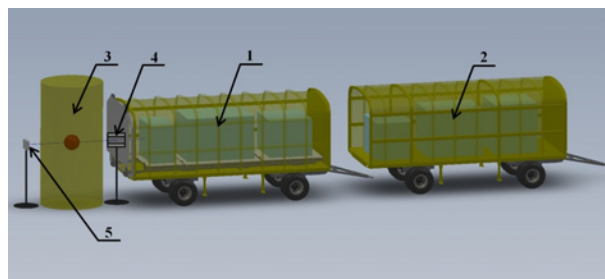


Рис. 2. Эскиз мобильного рентгенографического комплекса: 1 – ускорительный модуль; 2 – модуль импульсного питания электромагнита бетатрона; 3 – ВЗК; 4 – система коллимации рентгеновских лучей; 5 – система регистрации теневых изображений

Одним из основных узлов установки является инжектор, созданный на базе малогабаритного умножителя напряжения [6] и двойной формирующей линии. Использование данного инжектора позволило существенно уменьшить (в 2,5 раза) массогабаритные характеристики источника излучения по сравнению с источниками излучения действующих Российских комплексов [7]. Размеры установки – 4500×2000×1800, общий вес – около 5 тонн. Основные узлы и системы излучателя аналогичны узлам и системам излучателей ранее разработанных комплексов. На рис. 3 приведена фотография МЦУ с открытой передней панелью ускорительного модуля.

В настоящее время ускорительный модуль и его оборудование смонтированы. Произведен фи-

зический пуск излучателя с запиткой от системы импульсного питания электромагнита, расположенной на экспериментальном стенде. Проведены его тестовые испытания. При граничной энергии электронного пучка $E_{gr} \sim 12 \text{ МэВ}$, (определяется величиной емкостного накопителя системы импульсного питания электромагнита) толщина просвеченного свинцового теста на 1 м от мишени составила $\sim 110\text{--}115 \text{ мм}$.



Рис. 3. Мобильный циклический ускоритель: 1 – ускорительный модуль; 2 – модуль импульсного питания электромагнита

На рис. 4 приведены осциллограммы сигналов срабатываний подсистем МЦУ, зарегистрированных во время тестовых испытаний.

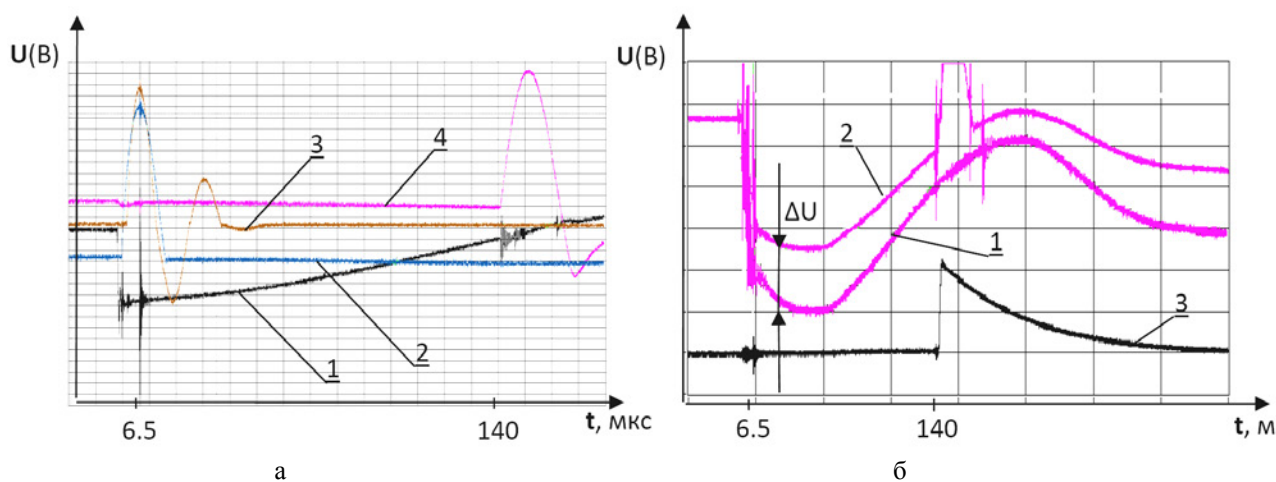


Рис. 4. Осциллограммы сигналов срабатывания подсистем МЦУ зарегистрированные во время тестовых испытаний: (а) – сигналы срабатывания подсистем МЦУ: 1 график – сигнала 0-поля; 2 график – импульс заряда соленоида; 3 график – импульс заряда магнитной линзы; 4 график – сигнал с блока медленного сброса; (б) – сигналы с датчиков бетатрона: 1 график – сигнал с пояса Роговского при наличии тока в камере; 2 график – сигнал с пояса Роговского при отсутствии тока в камере; 3 график – уровень интенсивности рентгеновского излучения

На рис. 4 (а) изображены осциллограммы сигналов при срабатывании подсистем ускорителя по заданному временному алгоритму. Отсчет времени включения отдельных подсистем установки начинается с приходом сигнала 0-поля (график 1) – момент срабатывания электромагнита. Инжектор бетатрона срабатывает на $t = 6,5 \text{ мкс}$ относительно 0-поля в момент максимального тока в обмотках соленоида и магнитной линзы тракта проводки [8]. В нашем случае импульсы заряда соленоида (график 2) и магнитной линзы (график 3) приходят соответственно на 0,5-й и 2-й микросекунде. На 140-й микросекунде для сброса на мишень циркулирующего в камере бетатрона электронного пучка приходит сигнал с блока медленного сброса. (график 4).

На рис. 4(б) представлены осциллограммы сигналов с датчиков бетатрона. Ток пучка электронов, циркулирующих на орбите бетатрона, оценивается с помощью пояса Роговского, охватывающего тороид ускорительной камеры. Измеряется разность сигналов ΔU полученных при наличии тока в камере (график 1) и при его отсутствии в ней (график 2). По специально разработанной методике осуществляется перерасчет этой разности сигналов в ток электронного пучка камеры бетатрона. На приведенной осциллограмме зарегистрированный ток пучка электронов составил $\sim 60 \text{ А}$. Уровень интенсивности рентгеновского излучения с танталовой мишени (график 3) контролируется датчиком типа СППД.

Продолжаются сборочно-монтажные и пусконаладочные работы по модулю импульсного пита-

ния электромагнита. В модуле размещен емкостной накопитель системы питания электромагнита на энергию $\sim 0,5$ МДж (6 конденсаторов по 300 мкФ, 24 кВ), высоковольтный источник питания; стойка коммутации. Необходимо изготовить и разместить часть технологического оборудования (система маслоподготовки). В 2016 г. с использованием данного комплекса планируется проведение полномасштабных гидродинамических экспериментов.

Существующие комплексы обеспечивают регистрацию теневых проекций исследуемого объекта с разных ракурсов в плоскости, а для увеличения информативности рентгенографии необходимо обеспечивать её с разных ракурсов в пространстве. Для решения этой задачи разработана концепция многолучевого рентгенографического комплекса малоракурсной томографии [9]. Эскиз варианта компоновки такого комплекса с горизонтальным расположением ВЗК представлен на рис. 5.

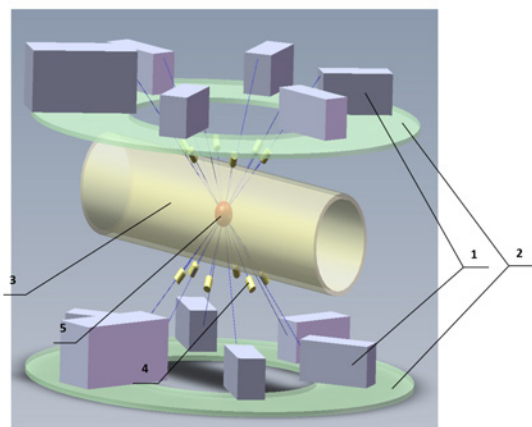


Рис. 5. Эскиз компоновки многолучевого рентгенографического комплекса. 1 – малогабаритные установки; 2 – плоскости размещения установок; 3 – ВЗК; 4 – система коллимации и регистрации теневых изображений объекта; 5 – объект исследования

В данной геометрии эксперимента предполагается использовать 12 малогабаритных установок нового поколения (1), расположенных в двух горизонтальных плоскостях (2) по 6 установок в каждой. При такой компоновке комплекса расстояние от источника излучения до объекта исследования (5) составляет 3 м. Комплекс достаточно компактен, его диаметр с зоной обслуживания составит порядка 20 м. С учетом возможности трехкадровой регистрации от каждого излучателя комплекс позволит получать до 36 снимков, что существенно увеличит информативность рентгенографических исследований.

С учетом накопленного практического опыта, в настоящее время, существует реальная возможность создания мобильных рентгенографических комплексов и многолучевого рентгенографического комплекса малоракурсной томографии на базе безжелезных импульсных бетатронов для радиогграфии динамических объектов большой оптической толщины. Это позволит сохранить и укрепить лидирующие международные позиции России в области импульсной радиогграфии.

Список литературы

1. Дэвис Гарольд. «Проект DARHT» // Брошюра, Los Alamos USA, 2008г.
2. Научно-информационный сборник «Основные достижения РФЯЦ-ВНИИЭФ 2006» // г. Саров, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2007, стр. 17.
3. Научно-информационный сборник «Основные достижения РФЯЦ-ВНИИЭФ 2011» // г. Саров, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2012, стр. 24.
4. Научно-информационный сборник «Основные достижения РФЯЦ-ВНИИЭФ 2013» // г. Саров, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2014, стр. 34.
5. Пат. 2548585 С1 RU МПК G03В 42/02. Мобильный радиогграфический комплекс и источник излучения бетатронного типа для радиогграфического комплекса / Д. И. Зенков, Ю. П. Куропаткин, В. И. Нижегородцев, В. Д. Селемир, О. А. Шапро // БИ. 2015. № 11.
6. Пат. 2317637 С1 RU МПК H03К 3/53. Генератор импульсного напряжения / Д. И. Зенков, Ю. П. Куропаткин, В. И. Нижегородцев, А. А. Ткачук, О. А. Шапро // БИ. 2008. № 5.
7. Kurapatkin Yu. P., Mironenko V. D., Suvorov V. N., Zenkov D. I., Tkachenko V.F. Uncored betatron B1M-M a source of bremsstrahlung for flash radiography // 11th IEEE International Pulsed Power Conf., Baltimore, 1997, T.2. pg.1669-1673 11th Pulsed Power Conf., pg. 1669.
8. Пат. 2356193 С1 RU МПК H05H 11/00. Устройство проводки пучка заряженных частиц / Ю. П. Куропаткин, Д. И. Зенков, А. А. Ткачук, О. А. Шапро, В. И. Нижегородцев // БИ. 2009. № 14.
9. Пат. 2515053 С1 RU МПК G03В 42/02. Способ получения радиогграфического изображения быстропротекающих процессов в неоднородном объекте исследования и радиогграфический комплекс для его осуществления / Ю. П. Куропаткин, В. И. Нижегородцев, В. Д. Селемир, О. А. Шапро // БИ. 2014. № 13.