

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ ЛИУ-2 В РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

*Д. А. Старостенко*¹, *П. В. Логачев, А. В. Акимов,*
А. А. Корепанов, П. А. Бак, А. Н. Панов, А. А. Пачков,
А. А. Елисеев, А. В. Оттмар, Я. В. Куленко, Д. Ю. Болховитянов,
Г. А. Фатькин, О. А. Павлов, Г. И. Кузнецов, И. В. Николаев,
М. А. Батазова, А. М. Батраков, Ю. М. Боймельштейн, А. В. Павленко

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера, Новосибирск, Россия

Линейный индукционный ускоритель ЛИУ-2 разработан в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера как инжектор электронного пучка для строящегося индукционного ускорителя, рассчитанного на энергию 20 МэВ, на базе которого будет создан комплекс для импульсной радиографии. ЛИУ-2, запущенный в 2010 г., в настоящее время используется как самостоятельная рентгеновская установка для просвечивания объектов с оптической толщиной до 70 мм в свинцовом эквиваленте. Эффективный диаметр рентгеновского источника равен 0,6–0,7 мм.

Linear induction accelerator LIA-2 is designed and developed at the Budker Institute of Nuclear Physics as an injector for 20 MeV induction accelerator. LIA-2, commissioned in 2010, is currently used as independent radiographic X-ray source for testing objects with an optical thickness up to 70 mm lead equivalent. The effective diameter of the X-ray source is 0.6–0.7 mm.

PACS: 29.20.Ej

УСТРОЙСТВО И ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЛИУ-2

Основные технические характеристики ЛИУ-2 приведены в табл. 1.

Электронный пучок с током до 2 кА формируется в вакуумном диоде с напряжением до 1 МВ. Катод закреплен на катодной «ноге», проходящей через изолятор, на котором суммируется напряжение с индукторов. На выходе диода расположен второй изолятор, обеспечивающий ускорение пучка до энергии 2 МэВ.

Система импульсного высоковольтного питания состоит из 48 модуляторов и служит для формирования двух последовательных импульсов ускоряющего напряжения с регулируемым временным интервалом между ними [1]. Формирующие линии модуляторов заряжаются за 5 мс, таким образом, полное напряжение на линии появляется непосредственно перед «выстрелом». Стабильность высокого напряжения равна $2 \cdot 10^{-3}$.

¹E-mail: d.a.starostenko@gmail.com

Таблица 1. Основные параметры ЛИУ-2

Максимальная энергия электронного пучка, МэВ	2,0
Максимальный ток электронного пучка, кА	2,0
Количество последовательных импульсов	2
Временной интервал между импульсами, мкс	2–30
Мощность подогрева катода до, кВт	3,5
Длительность плоской вершины импульса $\pm 4\%$, нс	200
Максимальная частота, Гц	0,1

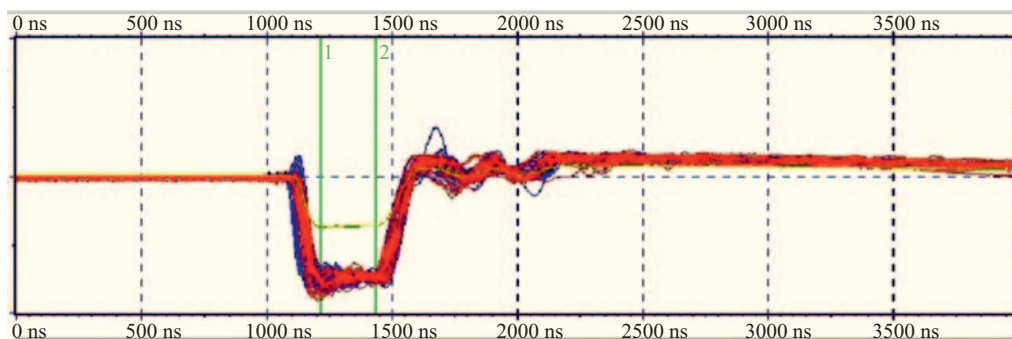


Рис. 1 (цветной в электронной версии). Синий цвет — сигналы напряжений с каждого индуктора до 1 МэВ; красный цвет — напряжения с каждого индуктора до 2 МэВ; зеленый цвет — напряжение на диоде; желтый цвет — напряжение на второй ускорительной трубке

Независимое управление зарядными устройствами позволяет отдельно регулировать ток и энергию электронного пучка.

Полочка импульсного напряжения на каждом из индукторов имеет небольшую колебательность, однако в суммарном импульсе, определяющем полную энергию и ее разброс, эта колебательность выравняется путем точной подстройки момента запуска каждого из модуляторов (рис. 1).

УЗЕЛ МИШЕНИ-КОНВЕРТЕРА

Для проведения рентгеновских опытов важным параметром пучка электронов является его размер на мишени, применяемой для конверсии в рентгеновское излучение. Мишень взрывается в месте попадания пучка, и оценить размер рентгеновского источника можно по отпечатку пучка на мишени. Мишенный узел представляет собой колесо, помещенное в вакуумный объем, которое может поворачиваться при очередном опыте [2]. На внешнем диаметре колеса закреплены съемные мишени-пластины из тантала толщиной от 0,4 до 1,2 мм. Вращение колеса осуществляется шаговым двигателем через ввод вращения в вакуум с помощью магнитной муфты. Встроенное в мишенный узел вакуумное окно позволяет увидеть отпечаток пучка на мишени при помощи видеокамеры. Замена мишеней производится без напуска атмосферы в область катода.

На рис. 2 показана мишень с отверстиями, прожженными электронным пучком. Отверстия были получены при токе 1 кА и энергии пучка 1,3 МэВ. Диаметр отверстия

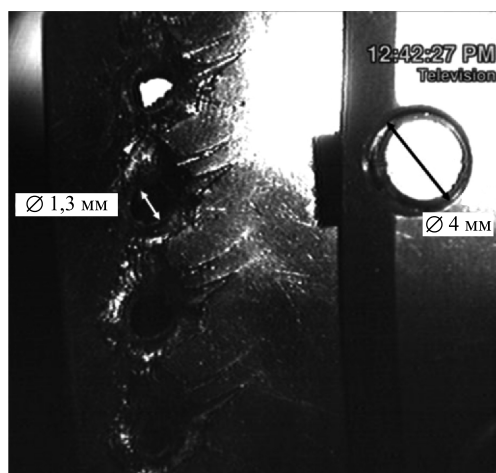


Рис. 2. Мишень — танталовая пластина толщиной 0,4 мм с отверстиями, прожженными электронным пучком

составляет 1,3 мм, площадь отверстия равна 1,3 мм². Плотность тока в фокусе на мишени достигает 200 кА/см². Плотность тока на краю отверстия оценивается в 2 кА/см² — это в сто раз ниже плотности тока в центре отверстия. В предположении гауссовской формы распределения плотности тока размер электронного пучка на половине амплитуды равен 0,6–0,7 мм.

Для оценки возможностей рентгеновского источника был проведен ряд экспериментов, описанных ниже.

ЭКСПЕРИМЕНТ № 1. КАЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА РАВНОМЕРНОСТИ ЗАСВЕТКИ РЕГИСТРАТОРА РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Схема эксперимента, в котором регистратор типа image plate установлен на расстоянии 2,5 м от рентгеновского источника, и полученные результаты показаны на рис. 3.

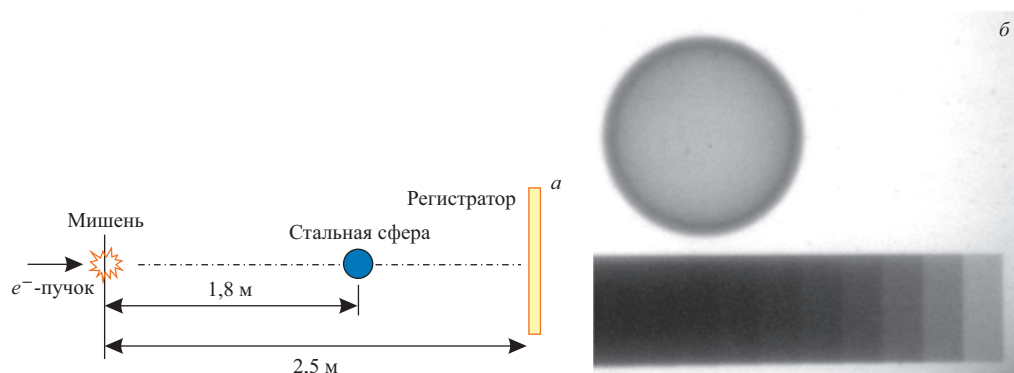


Рис. 3. а) Схема проведения эксперимента по определению равномерности поля. б) Изображение стальной сферы и ступенчатого клина, полученное на регистраторе типа image plate

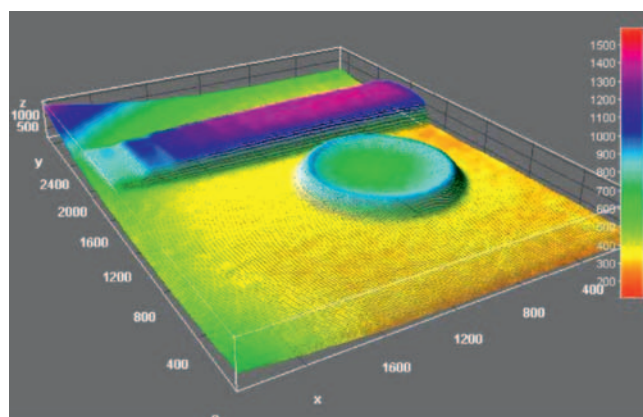


Рис. 4. Трехмерное изображение стальной полый сферы и стального ступенчатого клина. Для наглядности по высоте использовалась линейная цветовая шкала

Исследуемые объекты — стальная полая сфера и стальной ступенчатый клин — установлены на расстоянии 1,8 м от рентгеновского источника. Результаты обработки изображения представлены в виде трехмерной картинке на рис.4, где по вертикали дана линейная цветовая шкала полученного изображения. О равномерности поля можно судить по однородности желтого цвета и по симметрии изображения сферы.

ЭКСПЕРИМЕНТ № 2. РЕГИСТРАЦИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В ВОДЕ

Изображения на рис.5 соответствуют трем экспериментам с различной задержкой между взрывом проволочки и рентгеновским импульсом, составлявшей 100, 150 и 200 мкс.

В пластиковом стакане с водой между двумя медными электродами вертикально натянута нихромовая проволочка диаметром 50 мкм. На проволочку подается импульс высокого напряжения в несколько киловольт, который взрывает ее, что приводит к возникновению и распространению ударной волны в воде. Границу ударной волны в воде хорошо видно, несмотря на незначительный перепад плотности.

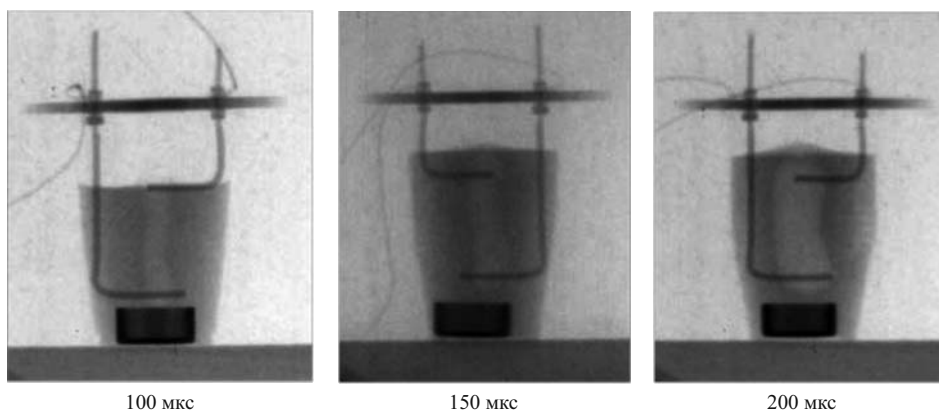


Рис. 5. Распространение ударной волны в воде

ЭКСПЕРИМЕНТ № 3. ПРОВЕРКА РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ

Для имитации реального взрывного опыта рентгеновский источник и регистратор защищены алюминиевыми экранами (рис. 6). Исследуемый объект — вольфрамовая мира — представляет собой набор чередующихся пластин вольфрама и оргстекла. В левой половине тестируемого объекта шаг между вольфрамовыми пластинами составляет 2,5 мм, а в правой половине — 1 мм. Согласно изображениям, полученным на регистраторе типа image plate, периодическую структуру миры отчетливо видно при просвечивании без защитных экранов. Более размытая картинка получается при установке защитных алюминиевых экранов, но периодическая структура различима без специальной обработки изображения. Снизу представлен график распределения яркости по горизонтали, на котором видна периодическая структура.

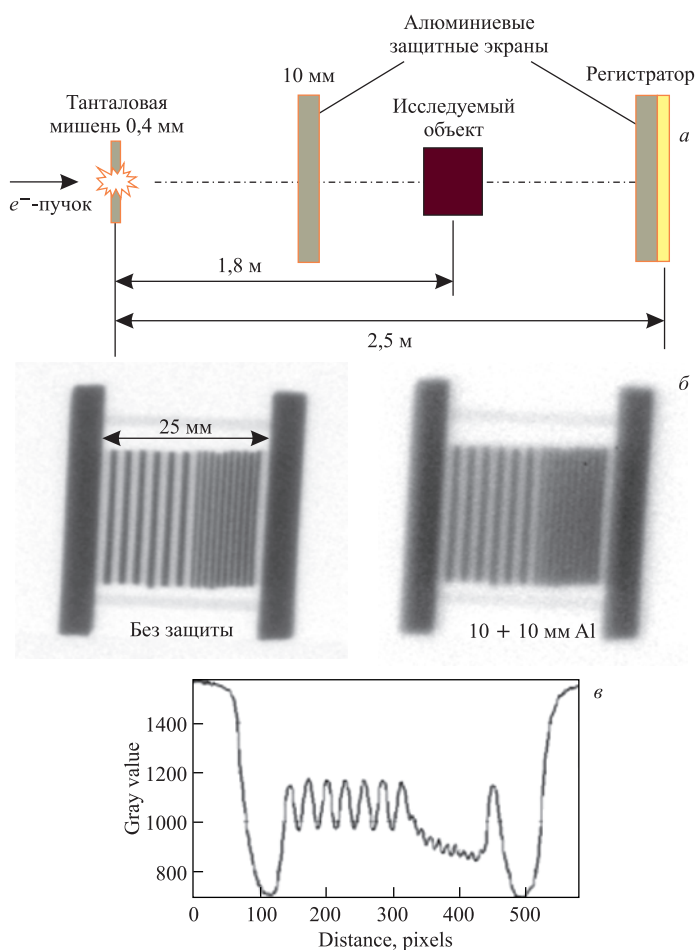


Рис. 6. а) Схема проведения эксперимента по проверке разрешающей способности ЛИУ-2. б) Изображение миры, полученное на регистраторе типа image plate. в) Распределение яркости, на котором видна периодическая структура

ЭКСПЕРИМЕНТ № 4. ИЗМЕРЕНИЕ ПРОСВЕЧИВАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ИСТОЧНИКА

Для измерения просвечивающей способности рентгеновского источника на базе ЛИУ-2 в качестве тестового объекта использовали свинцовый брусок толщиной 100 мм с просверленными в нем глухими отверстиями с шагом по глубине 10 мм. При энергии электронного пучка 1,7 МэВ и токе 1,35 кА просвечивающая способность источника составила 70 мм в свинцовом эквиваленте.

ЭКСПЕРИМЕНТ № 5. РЕГИСТРАЦИЯ ИМИТИРОВАННОЙ ГРАНИЦЫ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

На рис. 7, *а* показан пластиковый макет, имитирующий такой же перепад плотностей, как на границе ударной волны при взрывных опытах. На рис. 7, *б* — изображение макета, полученное с помощью рентгеновского источника. На графике распределения яркости видно подставку под пластиковый макет и границу ударной волны (рис. 7, *в*). Горизонтальная часть графика соответствует прямоугольной части макета.

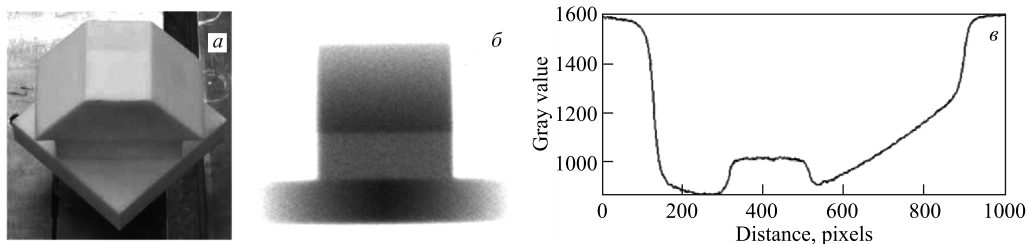


Рис. 7. *а*) Пластиковый макет; *б*) изображение макета, полученное при просвечивании рентгеновским источником; *в*) распределение яркости изображения по вертикали снизу вверх

На рис. 8 показан двухимпульсный режим работы ускорителя при средних параметрах. Ток электронного пучка 900 А, энергия 1,1 МэВ, временной интервал между импульсами 2 мкс.

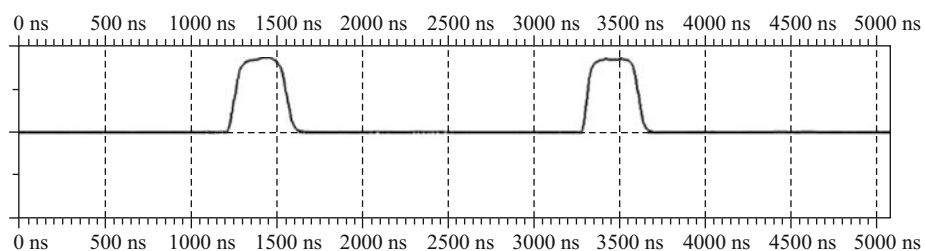


Рис. 8. Демонстрация двухимпульсного режима с временным интервалом задержки 2 мкс. Осциллограмма получена с трансформатора тока, установленного в конце транспортного канала перед мишенным узлом

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рентгеновская установка позволяет при энергии 1,7 МэВ и токе 1,4 кА просвечивать объекты до 70 мм в свинцовом эквиваленте. Эффективный диаметр рентгеновского источника равен 0,6–0,7 мм. Оценка нормализованного эмиттанса из эффективного размера рентгеновского источника не превышает $200 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$. Полученное значение нормализованного эмиттанса [3] в сравнении с другими инжекторами индукционного типа [4] приведено в табл. 2.

Таблица 2. Сравнительные характеристики инжекторов

Параметр	Инжектор					
	FXRU	ATA	DARHT-I	AIRIX	Dragon-I	ЛИУ-2
Ток пучка, кА	2,3–3,4	10	1,7–4	1,9–3,5	2,8	0,5–2
Энергия пучка, МэВ	2,5	2,5	2,5–3,75	3,8	3,5	0,8–2
Нормализованный эмиттанс, $\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$	3213	2500	1200	1165	1040	200

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Акимов А. В. и др.* Система импульсного питания линейного индукционного ускорителя ЛИУ-2 // ПТЭ. 2012. Вып. 2. С. 77–83.
2. *Логачев П. В. и др.* Линейный индукционный ускоритель ЛИУ-2 // ПТЭ. 2013. Вып. 6. С. 42–50.
3. *Logachev P. V. et al.* Performance of 2 MeV, 2 kA, 200 ns Linear Induction Accelerator with Ultra Low Beam Emittance for X-Ray Flash Radiography // IPAC 2011, San Sebastian, Spain, Sept. 4–9, 2011.
4. *Zhang Kaizhi, Wen Long.* Dragon-I Injector Based on the Induction Voltage Adder Technique // Phys. Rev. Special Topics — Accelerators and Beams. 15 Aug. 2006.