

## СТАТУС ЛИУ-2. ДВУХИМПУЛЬСНЫЙ РЕЖИМ

*Д. А. Старостенко<sup>a,1</sup>, А. В. Акимов<sup>a</sup>, П. А. Бак<sup>a</sup>, М. А. Батазова<sup>a</sup>,  
А. М. Батраков<sup>a</sup>, Ю. М. Боймельштейн<sup>a</sup>, Д. Ю. Болховитянов<sup>a</sup>,  
А. А. Елисеев<sup>a</sup>, А. А. Корепанов<sup>a</sup>, Г. И. Кузнецов<sup>a</sup>, Я. В. Куленко<sup>a</sup>,  
П. В. Логачев<sup>a</sup>, А. В. Оттмар<sup>a</sup>, А. В. Павленко<sup>a</sup>, О. А. Павлов<sup>a</sup>,  
А. Н. Панов<sup>a</sup>, А. А. Пачков<sup>a</sup>, Г. А. Фатькин<sup>a</sup>, А. Р. Ахметов<sup>b</sup>,  
П. А. Колесников<sup>b</sup>, О. А. Никитин<sup>b</sup>, Д. В. Петров<sup>b</sup>*

<sup>a</sup> Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>b</sup> Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики, Снежинск, Россия

Линейный индукционный ускоритель ЛИУ-2 разработан в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера как инжектор электронного пучка для перспективного индукционного ускорителя на энергию 20 МэВ, предназначенного для малоразмерной томографии. По результатам первых испытаний было принято решение использовать инжектор как самостоятельную рентгеновскую установку [1]. В 2014 г. была проведена модернизация и настройка системы высоковольтного питания ЛИУ-2. Ускоритель стабильно работает в одноимпульсном режиме на энергии до 1,7 МэВ, в двухимпульсном режиме — до 1,5 МэВ. Неоднородность по энергии в каждом импульсе не превышает  $\pm 0,5\%$ .

LIA-2 linear induction accelerator is designed in Budker Institute of Nuclear Physics as an injector for a perspective 20 MeV linear induction accelerator intended for X-ray flash radiography. By results of the first tests, it was decided to use the injector as an independent X-ray installation [1]. In 2014 the high-voltage power supply system was upgraded. Accelerator operates stably in one pulse mode at energies up to 1.7 MeV, in the double-pulse mode — up to 1.5 MeV. Energy stability in each pulse does not exceed  $\pm 0.5\%$ .

PACS: 29.20.Ej; 29.27.Ac

## УСТРОЙСТВО И ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЛИУ-2

Центральная часть состоит из корпуса катода с расположенными на нем магнито-разрядными насосами, способными обеспечивать вакуум на уровне  $3 \cdot 10^{-9}$  торр при разогретом катоде. Внутри корпуса размещен катодный узел. Катод закреплен на катодной ноге, проходящей через изолятор, на котором суммируется напряжение с индукторов (рис. 1). Индукторная система состоит из двух равных частей, примыкающих с двух сторон к корпусу катода. Первая половина индукторов формирует напряжение на диоде,

---

<sup>1</sup>E-mail: d.a.starostenko@inp.nsk.su

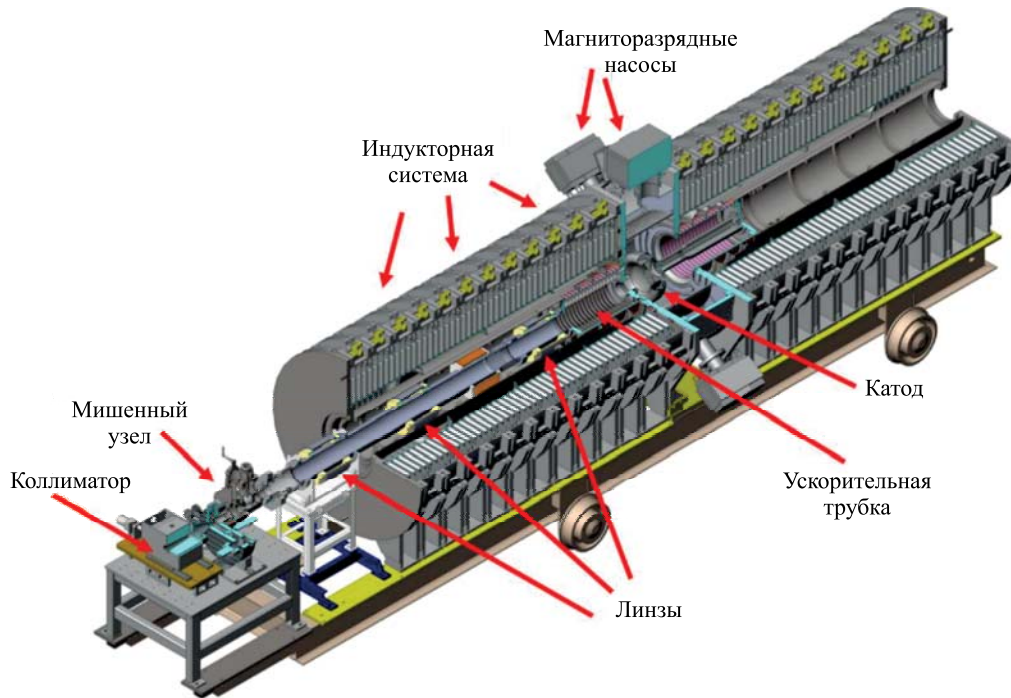


Рис. 1. Модель ЛИУ-2 в разрезе

вторая половина индукторов формирует напряжение на ускорительной трубке, расположенной сразу за анодным отверстием. К выходному фланцу ускорительной трубки пристыкован канал транспортировки с расположенными на нем линзами, корректорами и системой диагностики пучка. Далее располагаются цилиндр Фарадея, второй трансформатор тока, проходной шибер, мишенный узел, выпускное окно и коллиimator [2].

Оптическая система рассчитана так, чтобы электронный пучок, формирующийся на относительно большом катоде диаметром 180 мм, можно было сжать до 1 мм в диаметре [3].

Основные технические характеристики ЛИУ-2 приведены в таблице.

#### 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	2–100
Размер электронного пучка на мишени во всех режимах, мм, не более	2
Разброс по энергии в каждом импульсе, %, не более	± 0,5
Среднее количество рабочих выстрелов по пластинам мишени до замены	150

### КОРРЕКЦИЯ НАПРЯЖЕНИЯ НА ДИОДЕ И УСКОРИТЕЛЬНОЙ ТРУБКЕ

В 2014 г. была проведена работа по настройке формирующих линий для коррекции формы полного напряжения на диоде и ускорительной трубке [4].

В результате настройки неравномерность плоской части на обоих импульсах снижена до уровня  $\pm 0,5\%$  (рис. 2).

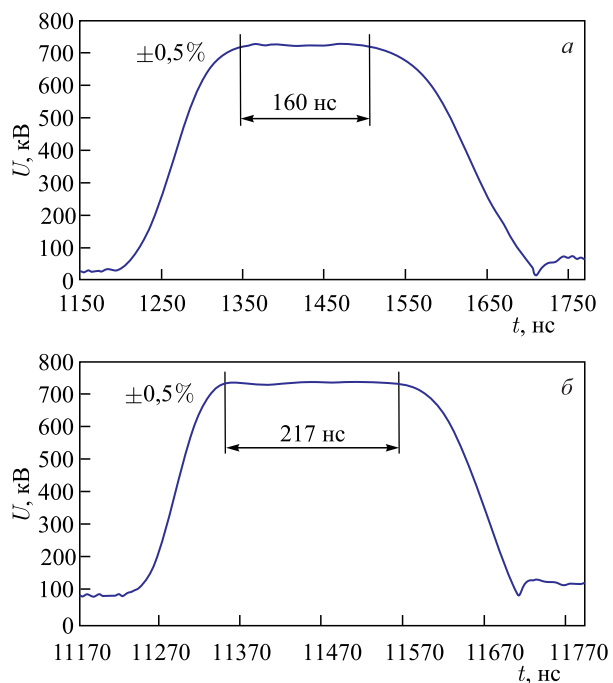


Рис. 2. Форма напряжения на диоде первого (а) и второго (б) импульсов

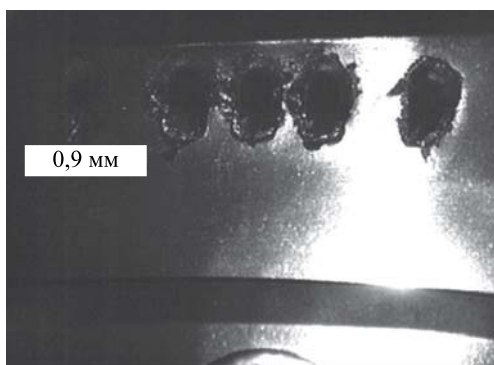


Рис. 3. Сквозные отверстия — отпечатки электронного пучка на 0,5-мм танталовой пластине. В левой части рисунка диаметр отверстия 0,9 мм

Это позволило отказаться от использования корректоров и добиться более качественной фокусировки. Отпечатки пучка на мишени повторяются в серии выстрелов и имеют симметричную форму (рис. 3). На рисунке диаметр левого отверстия 0,9 мм.

### ИЗМЕНЕНИЕ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ГАММА-ИМПУЛЬСА

Для проведения некоторых экспериментов ставится задача сокращения длительности гамма-импульса и допускается снижение дозы. В связи с этим была изучена возможность изменения длительности гамма-импульса без замены формирующих линий. Длительность гамма-импульса можно изменять с помощью сдвига запуска ускорительной трубки на

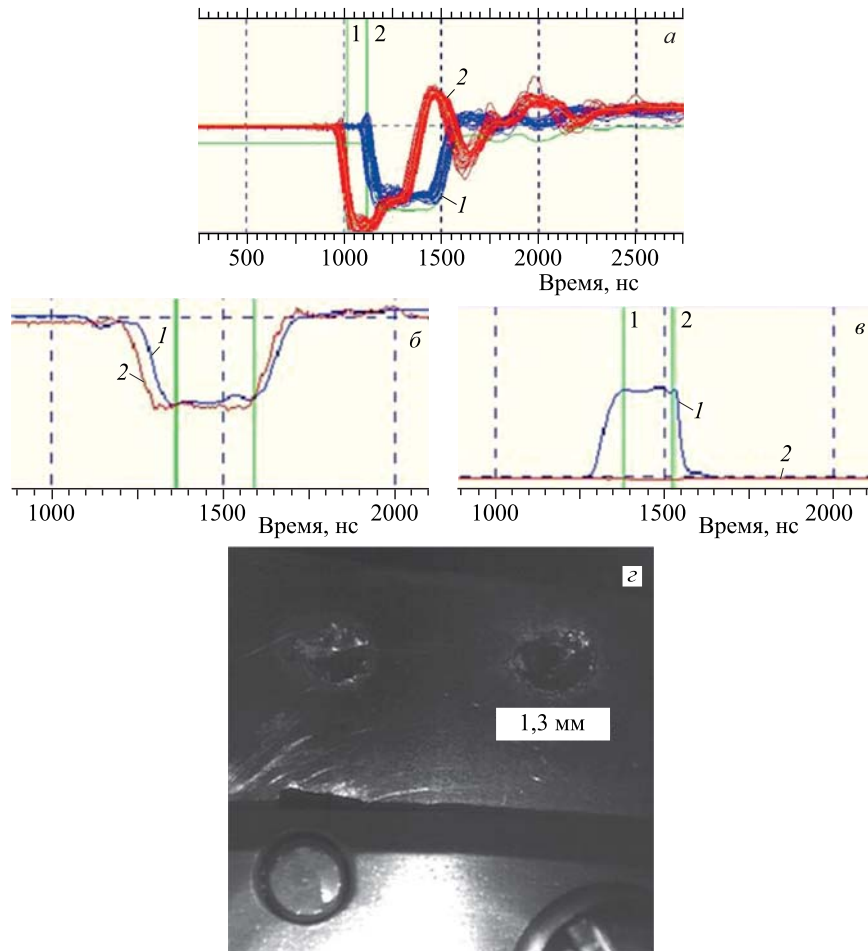


Рис. 4 (цветной в электронной версии). *а)* Напряжение на индукторах, питающих диод (синий цвет, 1) и ускорительную трубку (красный цвет, 2); *б)* ток в диоде; *в)* ток на входе в мишенный узел; *г)* конверсионная мишень с отпечатком пучка (диаметр отверстия 1,3 мм)

некоторое время раньше или позже по сравнению с моментом появления тока в диоде. На приведенном примере (рис. 4, *a*) сдвиг равен 150 нс. В таком режиме работы часть электронного пучка, не получившая ускорения в трубке, теряется на электродах ускорительной трубки либо перефокусируется и попадает на стенку вакуумной камеры. В таком режиме (рис. 4, *a*) длительность пучка, вылетающего из диода, составляет 230 нс (рис. 4, *b*), но до мишенного узла долетает пучок длительностью 145 нс (рис. 4, *в*). Результат фокусировки сокращенного пучка представлен на рис. 4, *г*.

В таком режиме модуляторы часть времени работают на несогласованную нагрузку, что приводит к перенапряжению на ускорительной трубке и увеличению вероятности высоковольтного пробоя по поверхности. Поэтому изменять длительность гамма-импульса можно при энергиях не более 1,2 МэВ.

### АВТОМАТИЗАЦИЯ НАСТРОЙКИ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

В связи с тем, что на ЛИУ-2 используются импульсные линзы, максимум поля внутри вакуумной камеры и максимум тока в линзе не совпадают из-за эффекта экранировки. Для качественной настройки оптической системы в одноимпульсном режиме необходимо совместить максимум магнитного поля с моментом пролета электронного пучка. В двухимпульсном режиме требуется расположить пучки симметрично так, чтобы они пролетали в одинаковых магнитных полях (рис. 5). Результаты стендовых измерений показали, что максимум поля сдвинут примерно на 200 мкс позже относительно максимума тока в линзе и задержка меняется в зависимости от амплитуды тока. На рис. 5 синий сигнал (1) — ток в линзе, красный сигнал (2) — производная магнитного поля внутри вакуумной камеры. Осциллограммы записаны с помощью двух 24-битных  $\Sigma\Delta$  ADC, расположенных внутри интегратора VsDC2 [5]. Остановка интегрирования выполняется при нулевом значении производной магнитного поля. Поскольку каналы синхронные, осциллограмма тока обрывается в момент остановки интегрирования.

С помощью функции  $\Delta t(I)$  вычисляем момент запуска линзы так, чтобы оба пучка в момент пролета находились в одинаковых магнитных полях.

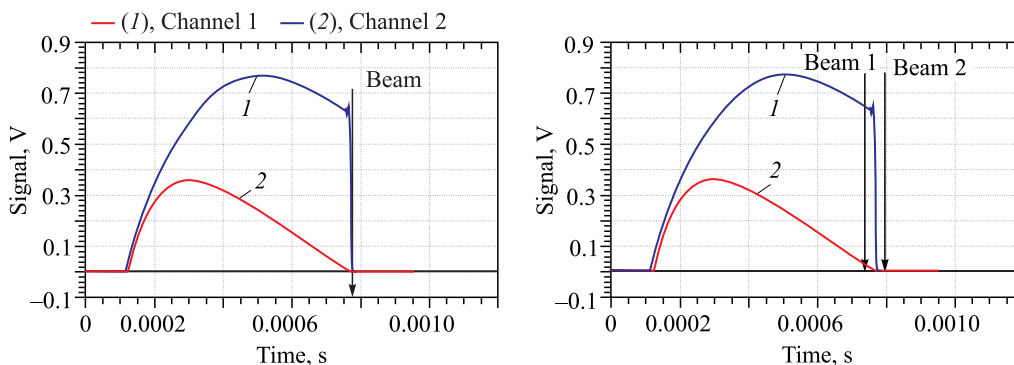


Рис. 5 (цветной в электронной версии). Синий сигнал (1) — ток в линзе, красный сигнал (2) — производная магнитного поля внутри вакуумной камеры

### ДВУХИМПУЛЬСНЫЙ РЕЖИМ

Ускоритель способен работать в двухимпульсном режиме с интервалом 2–100 мкс. При временных интервалах между импульсами более 10 мкс наблюдается эффект увеличения диаметра фокусного пятна второго импульса за счет образования плазмы в результате попадания первого импульса на мишень. Один из способов снижения этого эффекта — предварительный прогрев мишени расфокусированным пучком. В настоящее время исследуются возможности снижения влияния первого импульса на второй.

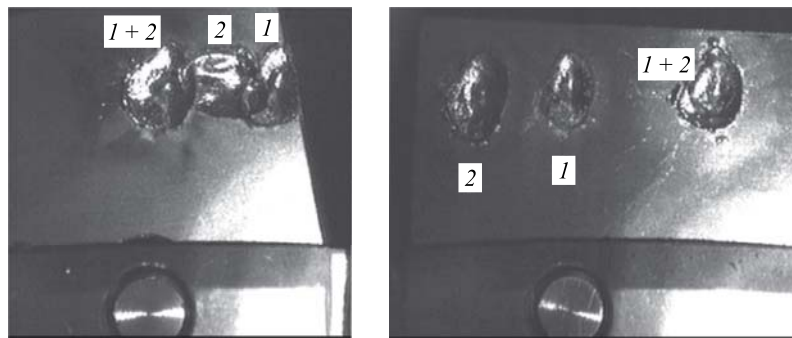


Рис. 6. Настройка двухимпульсного режима. 1 — первый импульс; 2 — второй импульс; 1 + 2 — два импульса с интервалом 10 мкс. Мишень — Та толщиной 1 мм

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рентгеновская установка позволяет проводить эксперименты в одноимпульсном (до 1,7 МэВ) и в двухимпульсном (до 1,5 МэВ) режимах [6]. Интервал между кадрами можно изменять в диапазоне 2–100 мкс с минимальным шагом 5 нс. На основе моделирования и результатов стендовых измерений разработан способ автоматической настройки оптической системы в зависимости от режима работы ускорителя. Это позволило сократить количество пробных выстрелов по мишени и тем самым продлить ресурс катода. В результате настройки и модернизации системы высоковольтного питания повышена надежность работы ускорителя и получена более качественная фокусировка пучка.

**Благодарности.** Данная работа была выполнена при поддержке Госкорпорации «Росатом».

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Logachev P. 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, 2011.
2. Логачев П. В. и др. Линейный индукционный ускоритель ЛИУ-2 // ПТЭ. 2013. Вып. 6. С. 42–50.
3. Кузнецов Г. И., Батазова М. А. Электронно-оптическая система индукционного ускорителя ЛИУ-2 // Письма в ЭЧАЯ. Т. 11, № 5(189). С. 945–949.

1506 *Старостенко Д. А. и др.*

4. *Акимов А. В. и др.* Система импульсного питания линейного индукционного ускорителя ЛИУ-2 // ПТЭ. 2012. Вып. 2. С. 77–83.
5. *Pavlenko A., Batrakov A., Ilyin I.* Electronics for Precise Measurements of Accelerator Pulsed Magnets // Proc. of IPAC 2013, Shanghai, China, 2013.
6. *Starostenko D. A. et al.* Results of Operating LIA-2 in Radiograph Mode // Phys. Part. Nucl. Lett. 2014. V. 11, No. 5. P. 660–664.