

Исследование режимов работы ускорителя СТРАУС-Р

В. С. Гордеев, Г. А. Мысков,
В. С. Никольский, Н. Н. Сулин,
Г. Н. Акатов, Н. Н. Утюмов,
М. В. Волков, П. В. Гусаков,
А. Н. Драчев, Ю. Г. Кудрявцев,
А. Ю. Копкин, В. И. Потапин

Приведены описание и результаты исследований импульсного электронного ускорителя СТРАУС-Р (3,5 МэВ, 60 кА, 60 нс) в двух режимах работы. В режиме фокусировки электронного пучка ускоритель обеспечивает получение на мишени фокусного пятна диаметром от 3 до 4 мм при максимальной дозе тормозного излучения 27 Р на расстоянии 1 м от выходного фланца. В облучательном режиме максимальная доза тормозного излучения на расстоянии 1 м от мишени по оси ускорителя достигает 36 Р с неоднородностью не более 30 % на площади 0,36 м² (пятно диаметром 0,6 м).

СТРАУС-Р [1, 2] (сильноточный трансформирующий ускоритель рентгенографический) продолжает ряд созданных ранее и успешно функционирующих установок, таких как СТРАУС, СТРАУС-2 и ЛИУ-10М [3–5], использующих технологию формирования высоковольтных импульсов на базе многокаскадных линий с распределенными параметрами. Ускоритель генерирует мощные одиночные импульсы тормозного излучения длительностью до 50 нс в режиме фокусировки электронного пучка на мишени в пятно малого диаметра и предназначен для использования в рентгенографии быстротекающих процессов. Он может применяться для исследований в области радиационной физики и при небольшой модификации в качестве инжектора линейного индукционного ускорителя.

Основным функциональным модулем СТРАУС-Р является ускоряющая система 4,7 × 2,2 × 2,4 м (рис. 1). Она включает в себя генератор импульсного напряжения ГИН-700, систему формирования высоковольтных импульсов, а также диодный узел с выходной вакуумной камерой и фокусирующим устройством. Помимо этого в состав ускорителя входят высоковольтная система синхронизации, автоматизированная система управления и контроля, высоковольтные зарядные устройства, системы вакуумной откачки, газонаполнения, водо- и маслоочистки (рис. 2).

Система формирования высоковольтных импульсов СТРАУС-Р выполнена на базе водонепроницаемой пятикаскадной двойной ступенчатой формирующей линии (ДСФЛ) с электрической длиной каждого каскада 30 нс и суммарной электрической емкостью 93 нФ. Как и в ускорителе СТРАУС-2 [3, 4], импедансы отрезков линий ДСФЛ выбраны равными $Z_1 = 0,9 \text{ Ом}$, $Z_2 = 0,8 \text{ Ом}$, $Z_3 = 1,9 \text{ Ом}$, $Z_4 = 3,2 \text{ Ом}$ и $Z_5 = 18 \text{ Ом}$. Зарядка ДСФЛ до рабочего напряжения 650 кВ за время 0,8 мкс производится от восьмикаскадного генератора Маркса с максимальным энергозапасом 30 кДж и электрической емкостью в ударе 95 нФ. За счет волновых процессов, возникающих при коммутации линии двадцатью включенными параллельно газонаполненными тригatronами, достигается семикратное (до 4,5 МВ в режиме холостого хода) повышение напряжения на выходе ДСФЛ по сравнению с зарядным. Фокусировка электронного пучка происходит в диоде, выполненном в виде сходящейся конической передающей линии с магнитной самоизоляцией, внутренний

электрод которой завершается катодной насадкой из сплава ВНЖ. Мишенью служит установленный на анодном фланце танталовый диск в комбинации с алюминиевым фильтром-поглотителем электронов. Более детальное описание ускорителя СТРАУС-Р приведено в работе [1].

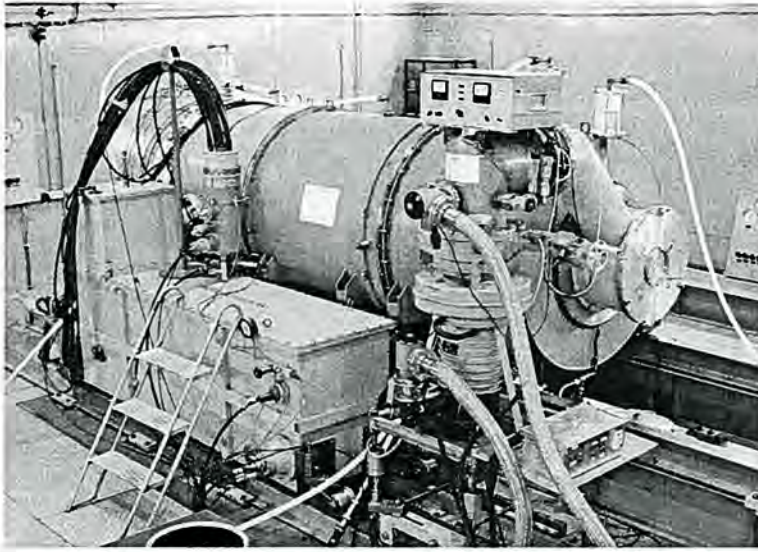


Рис. 1. Ускоряющая система СТРАУС-Р

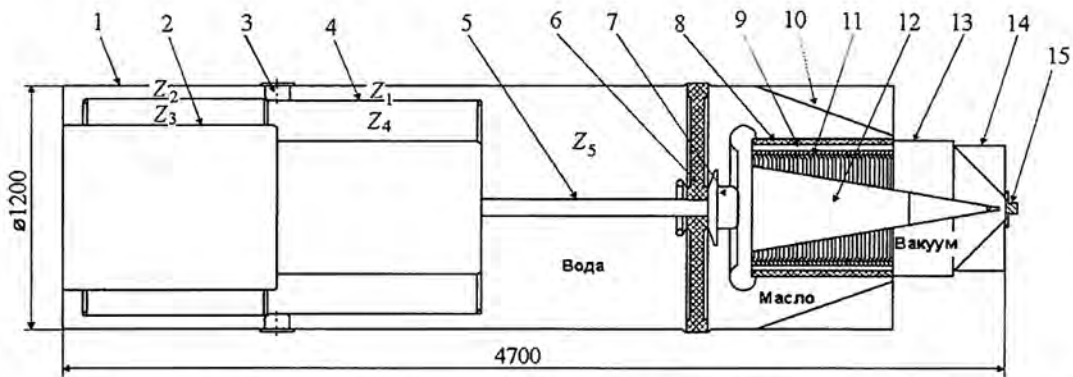


Рис. 2. Схематичное изображение формирующей системы и диодного узла ускорителя СТРАУС-Р: 1 – корпус; 2 – внутренний (заземленный) электрод ДСФЛ; 3 – многоканальный коммутатор; 4 – высоковольтный электрод ДСФЛ; 5 – внутренний электрод выходной линии ДСФЛ; 6 – разделительная диафрагма; 7 – предимпульсный разрядник; 8 – диэлектрическая труба; 9 – объем резистивной нагрузки; 10 – конусный электрод; 11 – секционированный изолятор; 12 – катододержатель с катодом; 13 – выходная вакуумная камера; 14 – фокусирующее устройство; 15 – анодный фланец с мишенным узлом

В ходе экспериментов на ускорителе СТРАУС-Р было произведено свыше 300 рабочих импульсов, в процессе которых исследовались режимы его функционирования как с фокусировкой, так и без фокусировки электронного пучка на мишени. В первом случае использовался штатный диодный узел с установленным на его выходе фокусирующим устройством (см. рис. 2). Зазор анод-катод в диоде варьировался в пределах 10–25 мм с помощью набора сменных катодных насадок из сплава ВНЖ, выполненных в форме усеченного конуса с кольцевой или сплошной торце-

вой кромкой диаметром от 5 до 15 мм. Менялась также толщина танталовой мишени от 0,3 до 1 мм. Во втором случае конфигурация диода ускорителя была аналогична применяемой на установке СТРАУС-2 [4, 6]. Катодом служил сплошной графитовый цилиндр диаметром 35 мм с двумя коаксиальными кольцевыми кромками на торце, обращенном к аноду. Танталовая мишень диаметром 150 мм и толщиной 0,5 мм закреплялась в съемном анодном фланце из алюминиевого сплава, который выполнял функции фильтра-поглотителя электронов, прошедших через мишень. Ускоряющий зазор варьировался в пределах от 40 до 70 мм путем перемещения катода вдоль оси диода.

В зависимости от времени включения предимпульсного разрядника относительно момента срабатывания многоканального коммутатора ДСФЛ на ускорителе могут быть реализованы импульсы тока пучка различной формы и длительности (рис. 3). Для получения максимальных дозовых параметров на выходе установки зарядное напряжение ДСФЛ и удельное сопротивление электролитической нагрузки диодного узла выбирались близкими к предельным (650 кВ и 1500 Ом·см), а предимпульсный разрядник настраивался таким образом, чтобы обеспечить максимальную длительность формируемого импульса. Дальнейшая оптимизация заключалась в подборе требуемого импеданса диода путем вариации размера ускоряющего зазора.

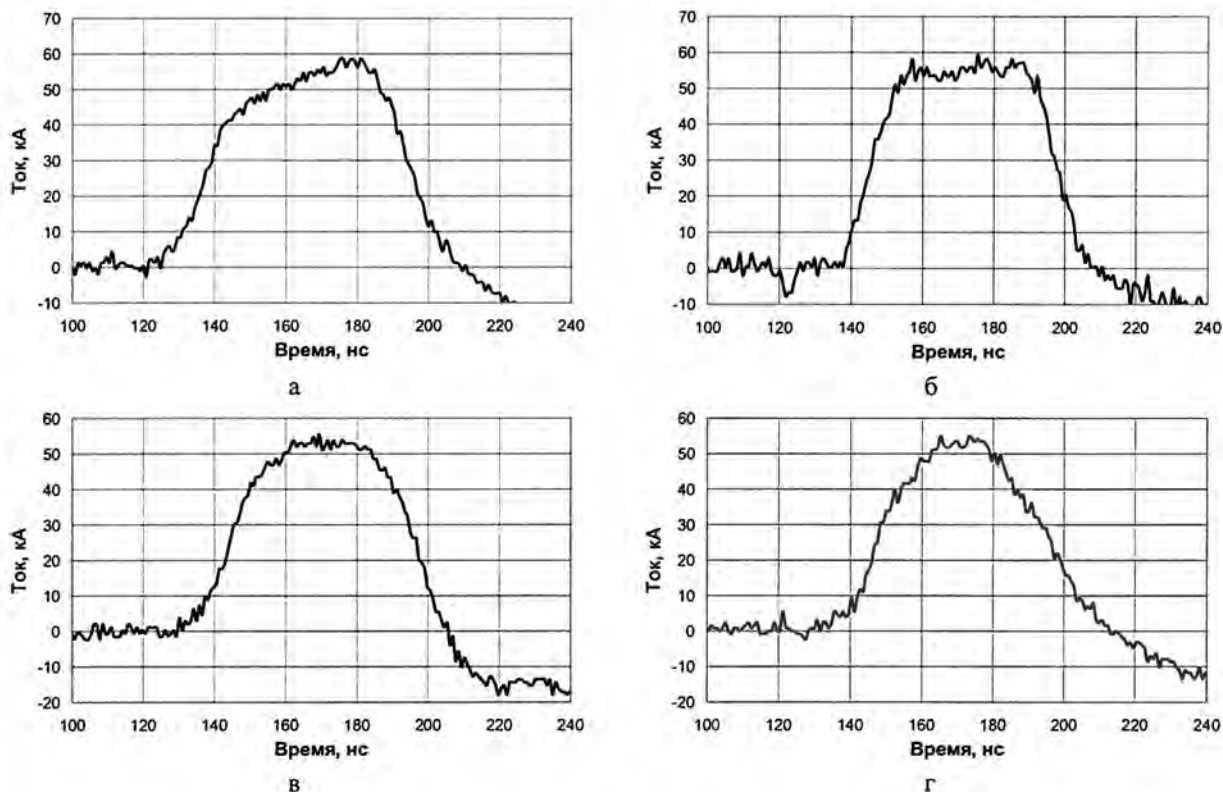


Рис. 3. Осциллограммы импульсов диодного тока ускорителя СТРАУС-Р различной формы и длительности: а – 58 нс; б – 53 нс; в – 49 нс; г – 46 нс на полувысоте

В рентгенографическом режиме работы ускорителя максимальные дозовые параметры при приемлемом качестве фокусировки пучка достигались при использовании катодной насадки диаметром 10 мм с кольцевой торцевой кромкой толщиной 2 мм, зазоре анод-катод 15 мм и толщине танталовой мишени 0,3 мм. Это полностью соответствует данным экспериментов, проведенных ранее на ускорителе СТРАУС-2 [6], несмотря на различие этих установок, прежде всего, по дли-

тельности формируемого импульса и энергетическим параметрам. В качестве иллюстрации на рис. 4 приведены фотография мишени после однократного импульса ускорителя СТРАУС-Р, рентгеновское изображение фокусного пятна и распределение интенсивности излучения по мишени. В режиме без фокусировки электронного пучка максимальная доза тормозного излучения (36 Р на расстоянии 1 м от мишени) была получена при ускоряющем зазоре в диоде 60 мм. Осциллограммы выходных импульсов и основные характеристики ускорителя СТРАУС-Р для двух исследованных режимов его работы приведены соответственно на рис. 5 и в таблице.

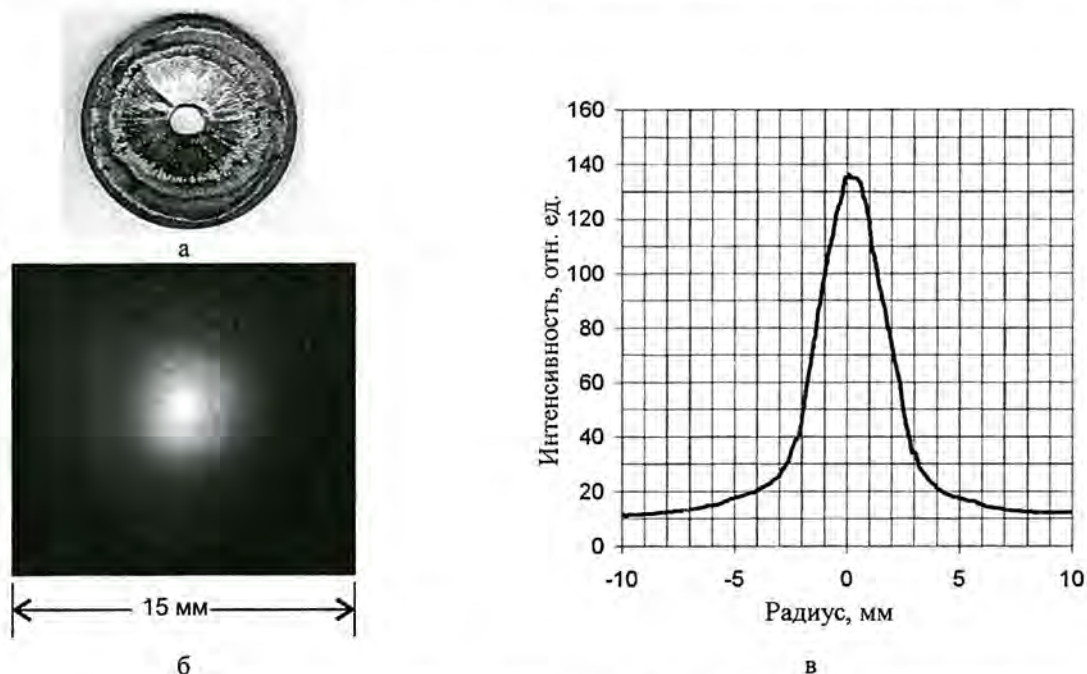


Рис. 4. Фотография мишени (а), рентгеновское изображение фокусного пятна (б) и распределение интенсивности излучения по мишени ускорителя (в)

В обоих случаях выходные импульсы ускорителя достаточно близки по амплитудно-временным параметрам, однако дозовые характеристики генерируемого тормозного излучения различны. При фокусировке пучка в диоде обеспечивается заметно более высокая доза излучения вблизи мишенного узла ускорителя, но ее уровень на расстоянии 1 м от мишени несколько меньше, чем в режиме без фокусировки. Это обусловлено, с одной стороны, значительно более высокой концентрацией энергии пучка на мишени, а с другой стороны, некоторым ухудшением угловых характеристик электронного потока в диоде по сравнению с режимом нефокусированного пучка.

В настоящее время экспериментальное исследование ускорителя СТРАУС-Р в основном завершено. Полученные результаты показали возможность его использования в качестве близкого к точечному источника излучения для импульсной рентгенографии, а также как облучательной установки для исследований в области радиационной физики.

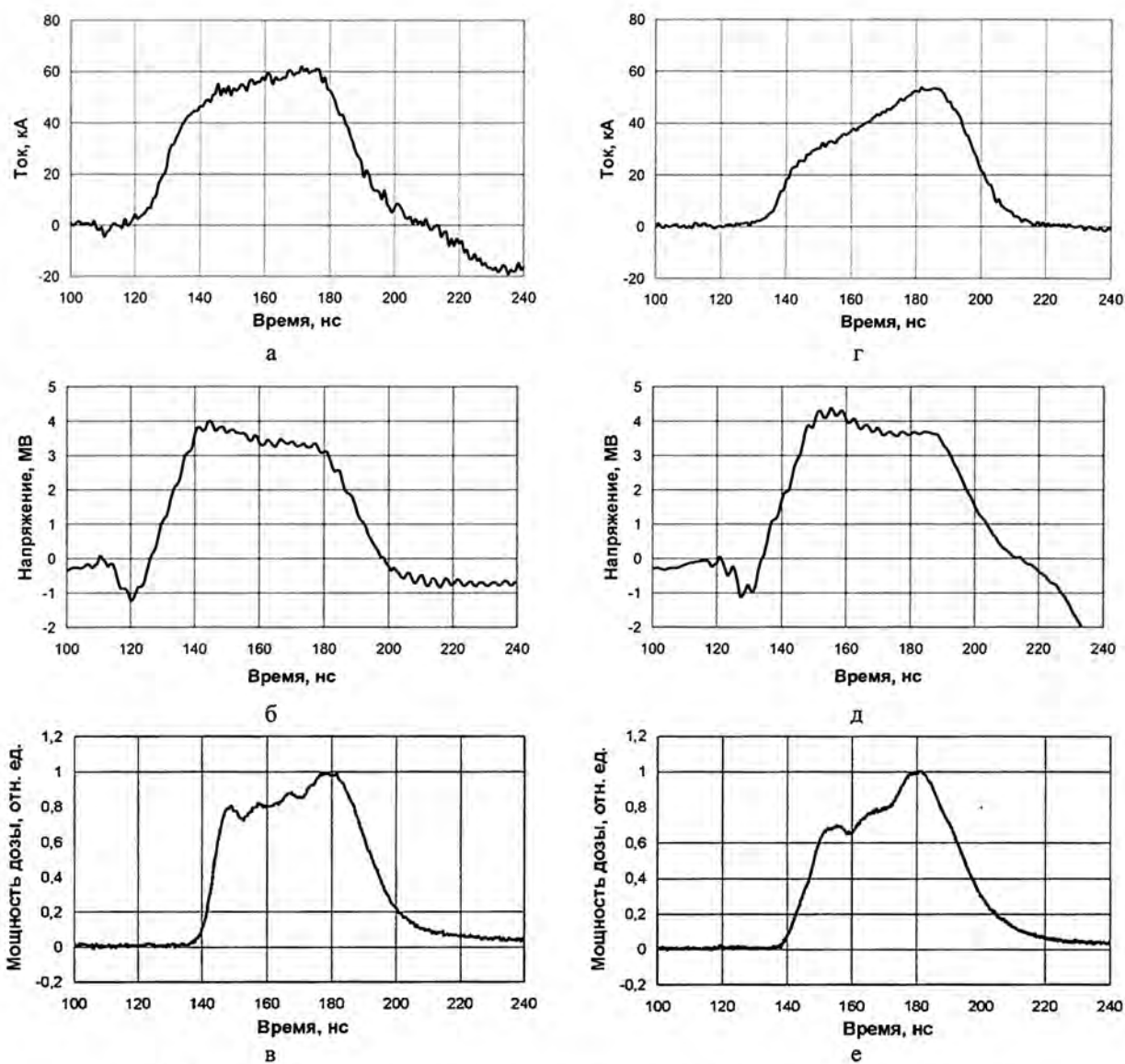


Рис. 5. Осциллограммы импульсов тока пучка (а, г), напряжения на входе в диод (б, д) и тормозного излучения (в, е) ускорителя СТРАУС-Р в режимах с фокусировкой (а–в) и без фокусировки электронного пучка (г–е)

Основные параметры ускорителя СТРАУС-Р в двух режимах работы

Параметр	Режим	
	с фокусировкой пучка	без фокусировки пучка
Ускоряющее напряжение, МВ	3,3	3,7
Амплитуда импульса тока пучка, кА	60	50
Длительность импульса тока на полувысоте, нс	60	
Длительность импульса тормозного излучения на полувысоте, нс	50	

Окончание таблицы

Параметр	Режим	
	с фокусировкой пучка	без фокусировки пучка
Диаметр фокусного пятна на мишени, мм	≤ 4	–
Максимальная доза тормозного излучения, Р: – на выходном фланце – на расстоянии 1 м от мишени	$2,5 \cdot 10^4$ 27	$1,4 \cdot 10^4$ 36
Диаметр пятна облучения (с неоднородностью дозы $\leq 30\%$), см: – на выходном фланце – на расстоянии 1 м от мишени	4 (4 см от мишени) 65	6 (1 см от мишени) 60

Список литературы

1. Gordeev V. S., Myskov G. A., Mikhailov E. S. et al. Design of STRAUS-R Accelerator // Problems of atomic science and technology. Series: Nuclear Physics Investigations. 2001. N 3 (38). P. 56–59.
2. Gordeev V. S., Myskov G. A., Basmanov V. F. et al. // Proc. 15th Int. Conf. on High-Power Particle Beams (BEAMS'2004). St-Petersburg, Russia, 2004. P. 323–326.
3. Gordeev V. S., Basmanov V. F., Myskov G. A. et al. High-current pulse electron accelerators based on stepped forming lines // Problems of atomic science and technology. Series: Nuclear Physics Investigations. 2001. N 3 (38). P. 50–52.
4. Bossamykin V. S., Gordeev V. S., Pavlovskii A. I. et al. // Proc. 9th IEEE Int. Pulsed Power Conf. Albuquerque, NM, USA, 1993. Vol. 2. P. 910–912.
5. Bossamykin V. S., Gordeev V. S., Basmanov V. F. et al. Linear Induction Accelerator LIA-10M with inductors on stepped lines // Problems of atomic science and technology. Series: Nuclear Physics Investigations. 1997. N 4–5 (31–32). P. 117–119.
6. Gordeev V. S., Myskov G. A., Filippov V. O. et al. Investigation of STRAUS-2 pulsed electron accelerator characteristics // Ibid. 1999. N 4 (35). P. 71–73.

Study of Operating Modes of STRAUS-R Accelerator

V. S. Gordeev, G. A. Myskov, V. S. Nikolsky, N. N. Sulin, G. N. Akatov,
N. N. Utyumov, M. V. Volkov, P. V. Gusakov, A. N. Drachyov,
Yu. G. Kudryavtsev, A. Yu. Kopkin, V. I. Potapin

The description of a pulsed electron accelerator STRAUS-R (3.5 MeV, 60 kA, 60 ns) and results of its experimental research for two operation modes are given. In the mode of electron beam focusing the accelerator provides a focal spot of diameter from 3 to 4 mm on a target and maximum exposure dose of 27 R at 1-m distance from the output window. In the irradiating mode maximum dose achieves 36 R at 1-m distance from the target with inhomogeneity less than 30 % within the area 0.36 m^2 (irradiation spot diameter is 0.6 m).