

## МАЛОГАБАРИТНЫЙ ИСТОЧНИК ИМПУЛЬСНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ РАДИОГРАФИИ

© 2013 г. И. В. Лавринович, Н. В. Жарова, В. К. Петин, Н. А. Ратахин,  
В. Ф. Федущак, С. В. Шляхтун, А. А. Эрфорт

*Институт сильноточной электроники СО РАН  
Россия, 634055, Томск, просп. Академический, 2/3*

Поступила в редакцию 28.06.2012 г.

Описан генератор импульсов жесткого рентгеновского излучения для высокоскоростной радиографии. Генератор состоит из линейного импульсного трансформатора, который разряжается на ускорительную трубку с вакуумным электронным диодом и формирует на ней высоковольтный импульс амплитудой до 750 кВ. Эффективная энергия квантов рентгеновского излучения, определенная по ослаблению в стальной пластине толщиной 5 мм, составила 125 кэВ. Доза рентгеновского излучения на расстоянии 1 м от анода была равна 10 мР при длительности рентгеновского импульса на полувысоте 40 нс и 15 мР — при 60 нс. Диаметр излучающего пятна <2 мм. Получены фотографические изображения ступенчатого стального клина толщиной 5–15 мм и стальных шариков с диаметрами  $\geq 0.5$  мм.

DOI: 10.7868/S0032816213030099

### ВВЕДЕНИЕ

Импульсные источники рентгеновского излучения являются эффективным инструментом для различных исследований, в частности быстропротекающих процессов. Это стимулирует создание надежных малогабаритных рентгеновских аппаратов с различными параметрами. Обычно в высоковольтных импульсных схемах первичный накопитель энергии (импульсный трансформатор и т.д.) за сотни наносекунд передает энергию в специальный промежуточный элемент, который в свою очередь формирует на нагрузке импульс напряжения длительностью единицы–десятки наносекунд [1, 2].

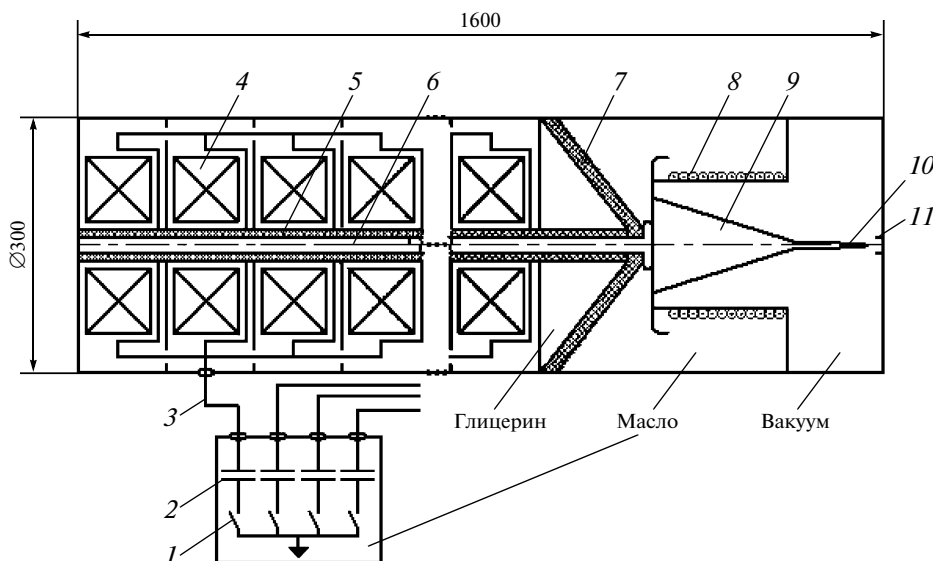
В данной работе описан генератор рентгеновских импульсов на основе линейного импульсного трансформатора, разряжающегося за десятки наносекунд непосредственно на нагрузку без промежуточного накопителя энергии. Это позволяет существенно упростить электрическую схему устройства и уменьшить длину генератора рентгеновских импульсов. Кроме того, размеры самого линейного импульсного трансформатора значительно уменьшаются при переходе от времен разряда в сотни наносекунд к десяткам наносекунд благодаря повышению импульсной электрической прочности изоляции и пропорциональному времени разряда, уменьшению размера и массы ферромагнитной системы.

### 1. КОНСТРУКЦИЯ ГЕНЕРАТОРА

Конструкция генератора рентгеновских импульсов схематично изображена на рис. 1. Формирование высоковольтного импульса происходит по схеме линейного импульсного трансформатора (л.и.т.). Четыре конденсатора емкостью 0.1 мкФ каждый заряжаются до напряжения 45–47 кВ, на такое же напряжение рассчитаны изоляция первичного витка и ферромагнитная система каждой ступени л.и.т. Каждый конденсатор снабжен собственным коммутатором, и вместе они образуют единую конденсаторно-коммутаторную сборку.

После срабатывания коммутаторов конденсаторы разряжаются одновременно на 16 ступеней л.и.т., каждый конденсатор на одну секцию из четырех ступеней. При зарядном напряжении конденсаторов 45 кВ напряжение л.и.т. в ударе составит  $U = 45 \times 16 = 720$  кВ. Ударная емкость импульсного трансформатора составляет  $C_{уд} = (0.1/4^2)/4 = 1.56$  нФ. Ударная индуктивность импульсного трансформатора с учетом индуктивности конденсаторов, подводящих кабелей и первичных витков, вторичного витка и нагрузки составляет 2.77 мкГн.

Такие параметры при зарядном напряжении конденсаторов 45 кВ обеспечивают формирование на нагрузке л.и.т. (ускорительной трубке с вакуумным электронным диодом с импедансом  $\sim 300$  Ом) высоковольтного импульса амплитудой 720 кВ, фронтом 50 нс и длительностью  $\sim 70$  нс на полувысоте. Для лучшего согласования л.и.т. и



**Рис. 1.** Конструкция генератора рентгеновских импульсов. 1 – коммутатор; 2 – конденсатор; 3 – высоковольтные кабели; 4 – магнитопроводы ступени л.и.т. (всего 16 ступеней); 5 – высоковольтная изоляция вторичного витка; 6 – вторичный виток; 7 – проходной изолятор; 8 – катушка индуктивности; 9 – анододержатель; 10 – анод; 11 – катод.

нагрузки между ними может устанавливаться коаксиальный конденсатор емкостью 1.0–1.2 нФ (на рис. 1 не показан), заполненный глицерином, что увеличивает передаваемую в электронный диод энергию и длительность высоковольтного импульса в 1.5 раза. Габаритная длина генератора рентгеновских импульсов при этом увеличивается примерно на 300 мм, диаметр конденсатора равен диаметру л.и.т.

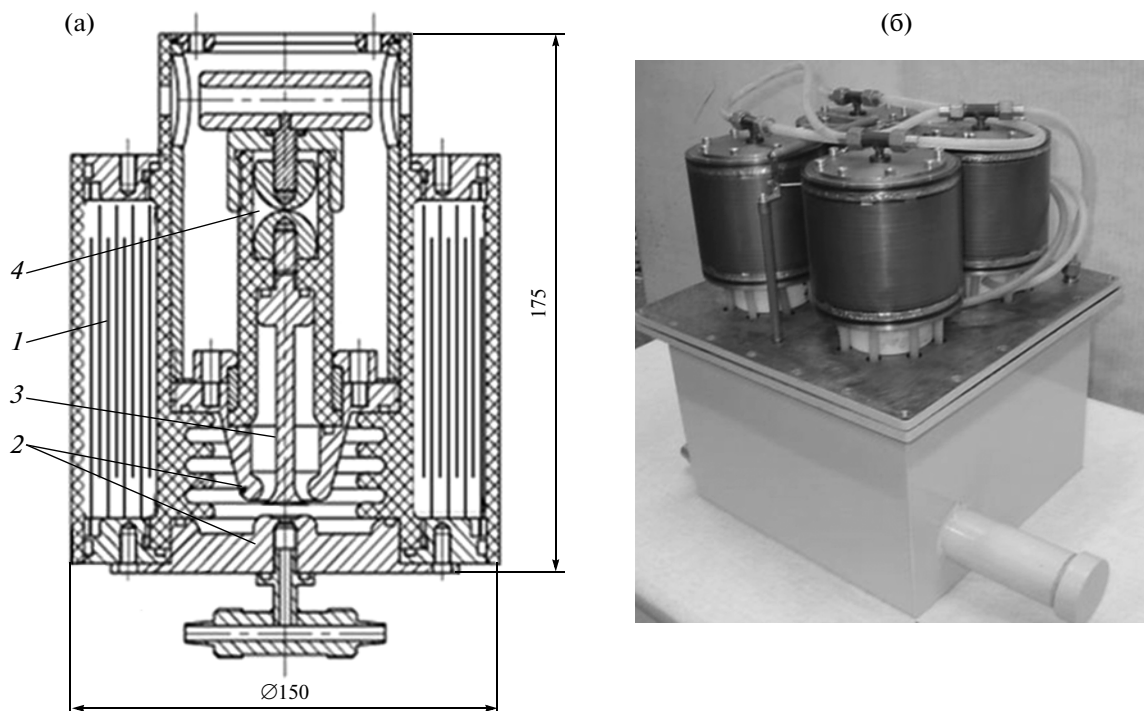
В таблице приведены значения напряженности электрического поля в различных элементах генератора.

Далее будут рассмотрены основные элементы генератора.

*1.1. Конденсаторно-коммутаторная сборка НСЕІсар50-0.1*

На рис. 2а показано устройство конденсаторно-коммутаторной сборки НСЕІсар 50-0.1 с основными элементами конструкции, специально разработанной для данной задачи [3]. Конденсаторно-коммутаторная сборка состоит из конденсатора 50 кВ-0.1 мкФ и коммутатора – искрового разрядника. Объем активной части конденсатора сборки составляет 0.6 дм<sup>3</sup>. Разрядник – трехэлектродный, управляемый по принципу искажения поля. Амплитуда запускающего импульса равна зарядному напряжению конденсатора, фронт импульса после обостряющего промежутка не более 10 нс.

Элемент конструкции генератора	Напряжение, кВ	Время воздействия напряжения	Напряженность электрического поля, кВ/мм
Конденсатор НСЕІсар 50-0.1	47	Постоянный ток + импульс 200 нс	200
Кабели КВИМ	47	Импульс (200 нс)	18.5
Изоляция первичного витка	47	Импульс (200 нс)	15.6
Изоляция вторичного витка	720	Импульс (200 нс)	100
Вакуумная поверхность изолятора трубки	720	Импульс (200 нс)	3



**Рис. 2.** а – основные элементы конструкции сборки HSEIcap 50-0.1 (1 – конденсатор; 2 – основные электроды разрядника; 3 – управляющий электрод разрядника; 4 – обостряющий промежуток); б – четыре сборки HSEIcap 50-0.1 в едином корпусе.

Промежуток между основными электродами разрядника составляет 5 мм, давление газа в коммутаторе 4.5 ати. Газ – сухой атмосферный воздух с точкой росы  $-30^{\circ}\text{C}$ . Четыре сборки смонтированы на одной металлической крышке и помещены в один корпус (см. рис. 2б).

Испытания, проведенные ранее, показали, что одна сборка HSEIcap 50–0.1 в режиме короткого замыкания обкладок конденсатора разрядником имеет общую индуктивность 16 нГн и при зарядном напряжении конденсатора 45 кВ развивает ток 100 кА при времени нарастания 50 нс [3]. Полная масса конденсаторно-коммутаторной сборки 3.5 кг.

Индуктивность каждой из четырех сборок, смонтированных в одном корпусе, составляет 28 нГн при коммутации высоковольтного электрода конденсатора на заземленную металлическую крышку, другой электрод конденсатора при этом через 6 высоковольтных разъемов соединяется с нагрузкой – первичными витками линейного импульсного трансформатора.

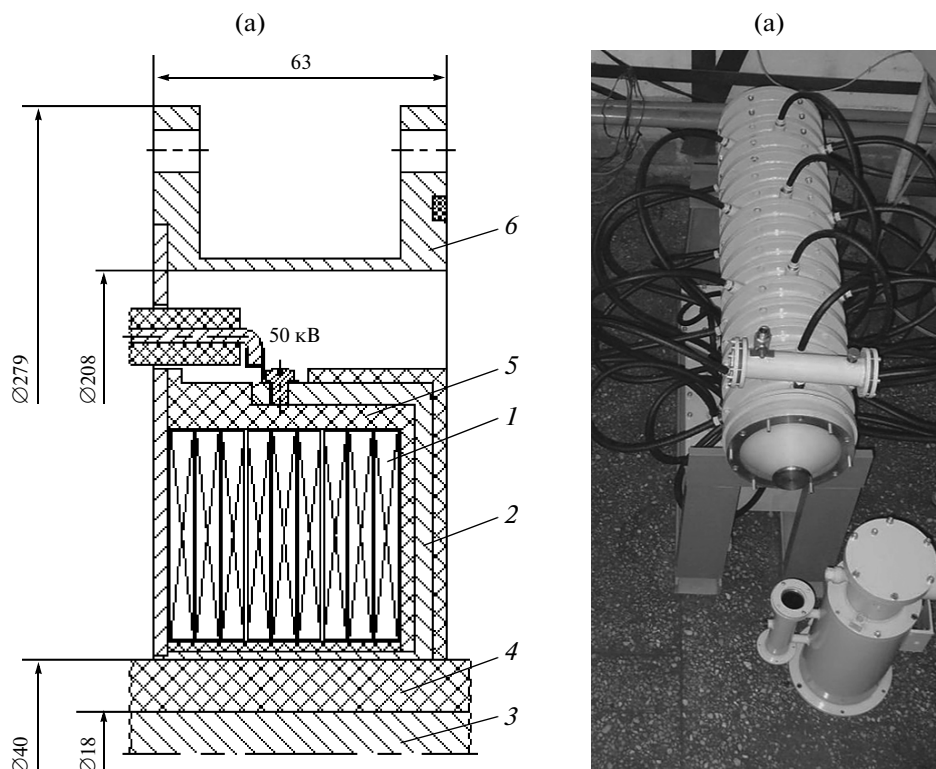
### 1.2. Линейный импульсный трансформатор

Линейный импульсный трансформатор состоит из четырех одинаковых секций, каждая из которых, в свою очередь, состоит из четырех ступеней. К каждой секции через высоковольтные вво-

ды подключаются шесть параллельных кабелей от одной конденсаторно-коммутаторной сборки. Все четыре ступени одной секции подключены к высоковольтным вводам л.и.т. с помощью отрезков проводников, расположенных внутри корпусов его ступеней.

Конструкция одной ступени л.и.т. представлена на рис. 3а, внешний вид л.и.т. и ускорительной трубки показан на рис. 3б.

Объемный первичный виток 2 охватывает магнитопровод 1. Каждый магнитопровод изготовлен из девяти сердечников с размерами  $\varnothing 48.5 \times \varnothing 138 \times 5$  мм, упакованных в общий полиэтиленовый корпус 5. Каждый сердечник при этом помещен в футляр из полипропилена толщиной 200 мкм. Изоляция магнитопровода от первичного витка рассчитана на импульсное напряжение 50 кВ. Сердечники изготовлены на ОАО “Ашинский металлургический завод” из аморфного сплава (ленты толщиной 30 мкм) 2НСР (аналог Metglas 2605 S2) [4, 5]. При напряжении на первичном витке 50 кВ напряжение между смежными слоями ленты в сердечнике составляет 3.7 В. Общее сечение магнитопровода из девяти сердечников при коэффициенте заполнения 0.8 составляет  $S = 2.24 \times 9 \times 0.8 = 16.1 \text{ см}^2$ . По центру всех 16-ти ступеней проходит общий вторичный виток 3. Вторичный виток представляет собой металлический стержень  $\varnothing 18$  мм с намотанной на него гли-



**Рис. 3. а** – конструкция секции л.и.т. (1 – магнитопровод; 2 – объемный первичный виток; 3 – вторичный виток; 4 – глицерино-пленочная изоляция; 5 – полиэтиленовый корпус; 6 – корпус); **б** – внешний вид л.и.т. и ускорительной трубки.

церино-пленочной изоляцией 4. Рабочая напряженность данной изоляции составляет 1 МВ/см. Аналогичная изоляция используется в генераторе МИГ [6].

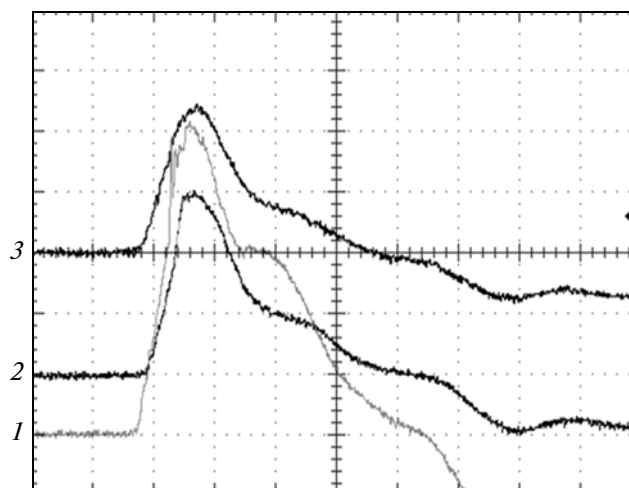
Высоковольтный конец вторичного витка закреплен в выходном полиэтиленовом изоляторе, отделяющем л.и.т. от ускорительной трубки. Корпусы секций л.и.т., соединенные друг с другом, с торцевым фланцем и с выходным изолятором, образуют герметичный корпус. Корпус л.и.т., общая длина которого составляет ~1.2 м, заполняется глицерином, объем которого не превышает 20 л.

Генератор был испытан при работе на эквивалент нагрузки, в качестве которой использовался жидкостный омический делитель, выполняющий также функции датчика напряжения. Сопротивление эквивалента нагрузки составляет 250 Ом. Типичные осциллограммы, полученные при работе на эквивалент нагрузки, представлены на рис. 4.

## 2. ГЕНЕРАЦИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В качестве нагрузки линейного импульсного трансформатора использовалась ускорительная

трубка с вакуумным электронным диодом (рис. 5). Ускорительная трубка состоит из корпуса, полиэтиленового вакуумного изолятора и вакуумного электронного диода. Пространство между ваку-



**Рис. 4.** Осциллограммы тока в эквиваленте нагрузки (1), напряжений с омического (2) и с емкостного (3) делителей напряжения. Масштабы: по вертикали 540 А/деление (1), 213 кВ/деление (2), 270 кВ/деление (3); по горизонтали 80 нс/деление.

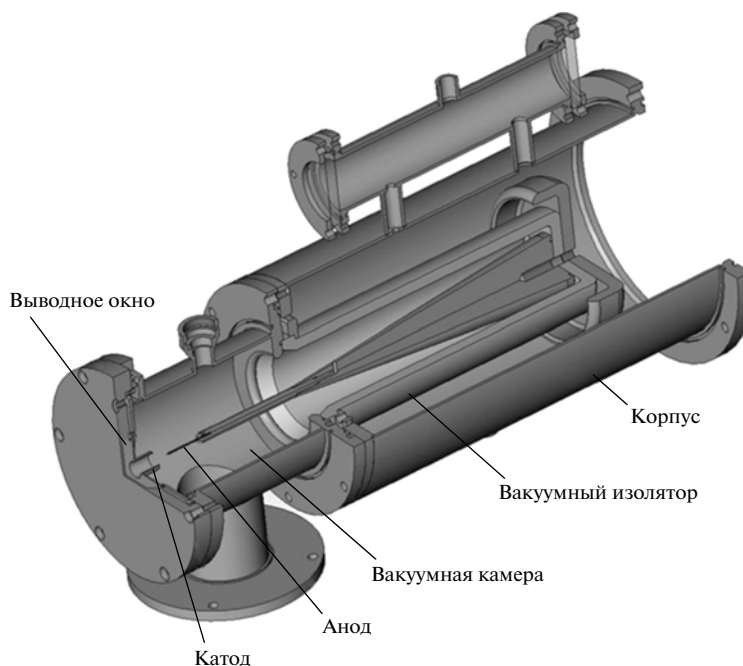


Рис. 5. Ускорительная трубка.

умным изолятором и корпусом трубки заполняется трансформаторным маслом. Электронный диод образован “заземленным” катодом и находящимся под положительным потенциалом анодом.

Катод диода – тонкостенные стальные трубки различного диаметра с заостренной кромкой для улучшения электронной эмиссии. Анод – вольфрамый стержень  $\varnothing 2$  мм. Кончик анода длиной порядка 5 мм заострялся для уменьшения размера источника излучения. В оптимальной для наших условий конфигурации диода диаметр эмитирующей кромки катода составлял 16 мм, толщина стенки катода 0.5 мм и расстояние между плоскостью эмитирующей кромки и анодом 9–12 мм.

В выходной дюралюминиевой крышке вакуумной камеры было проточено окно толщиной  $\sim 400$  мкм для вывода излучения в атмосферу. Для замыкания цепи перемагничивания линейного импульсного трансформатора по вторичному витку, а также для улучшения распределения электрического поля в области вакуумного изолятора по всей длине изолятора была намотана катушка (не изображена на рис. 5, см. рис. 1) индуктивностью 140 мкГн, включенная параллельно диоду. Диод откачивался паромасляным насосом АВП-100 до давления  $(2-4) \cdot 10^{-4}$  Торр.

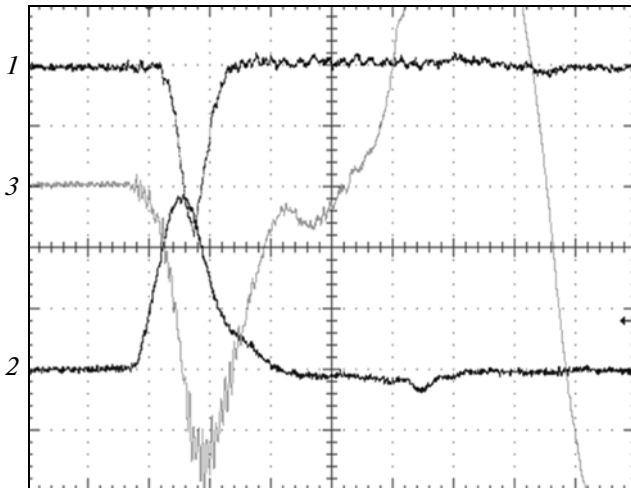
Напряжение на ускорительной трубке измерялось с помощью емкостного делителя, ток в нагрузке – поясами Роговского, а временная зависимость мощности излучения – полупроводни-

ковым детектором СКД1-01. Измерение доз рентгеновского излучения проводилось термолюминесцентными детекторами LiF с последующим “высвечиванием” их с помощью прибора ДТУ-0,1М. Для определения размеров источника рентгеновского излучения использовалась камера-обскура с диафрагмой  $\sim 300$  мкм.

Всего было проведено более 200 пусков установки. Напряжение на нагрузке достигало 750 кВ, ток в нагрузке 2–3.5 кА, импеданс диода 250–300 Ом. В экспериментах без коаксиального конденсатора между линейным импульсным трансформатором и ускорительной трубкой доза на выводном окне (44 мм от анода) составила 5 Р и длительность рентгеновского импульса на полувысоте 40 нс. В экспериментах с коаксиальным конденсатором емкостью 1.0–1.2 нФ между линейным импульсным трансформатором и ускорительной трубкой доза на выводном окне составила 8 Р и длительность рентгеновского импульса на полувысоте 60 нс. Типичные осциллограммы, полученные в ходе экспериментов на генераторе рентгеновских импульсов без коаксиального конденсатора, приведены на рис. 6.

На рис. 7 представлено изображение источника излучения на рентгеновской фотопленке, полученное с помощью камеры-обскуры.

Измеренный размер источника излучения составил  $< 2$  мм. Пересчет доз в предположении точечного источника излучения показал, что на расстоянии 1 м от анода экспозиционная доза со-



**Рис. 6.** Оциллограммы: 1 – импульсы мощности излучения (СКД1-01, в отн. ед.), 2 – напряжения на нагрузке, 3 – тока в нагрузке. Масштабы: по вертикали 270 кВ/деление (2), 540 А/деление (3); по горизонтали 80 нс/деление.

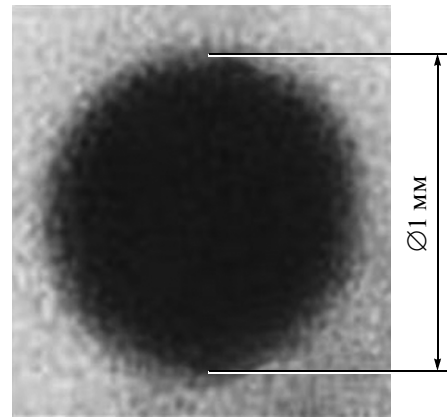
ставит 10 мР в экспериментах без коаксиального конденсатора между линейным импульсным трансформатором и ускорительной трубкой и 15 мР с коаксиальным конденсатором.

Было установлено, что на установке можно проводить серии до 20–30 пусков без вскрытия вакуумной камеры, при этом не происходит значительного изменения характеристик источника излучения. После 20–30 пусков необходимо проверить состояние вольфрамового анода и провести в случае необходимости его замену или заточку.

На расстоянии 1 м от анода устанавливалась стальная клин со ступеньками шириной 2 и высотой 1 мм, при этом толщина клина изменялась от 5 до 15 мм. Дополнительно рядом с клином устанавливались металлические (свинец, сталь, медь) предметы малого размера для определения разрешающей способности установки. На расстоянии 0.3 м за клином (1.3 м от источника) устанавливалась кассета с рентгеновской пленкой (РФ-3, AGFA) и усиливающими экранами. На пленке РФ-3 был получен снимок клина, на котором различимы ступеньки, при этом доза в эксперименте в одном метре от диода составила 6 мР. На рис. 8 приведена рентгеновская фотография стальных шариков диаметрами от 0.5 до 4.0 мм.

Высокую разрешающую способность установки подтверждает факт присутствия на пленке изображения стального шарика  $\varnothing 0.5$  мм, располагавшегося в 30 см от пленки и в 1 м от источника излучения.

Также проводилось определение эффективной энергии квантов. Для этого за выводным окном



**Рис. 7.** Изображение источника излучения на рентгеновской фотопленке.

генератора устанавливалась стальная пластина толщиной 5 мм. С каждой стороны пластины измерялись дозы излучения с помощью термоминесцентных детекторов LiF. Пластина ослабила интенсивность излучения в 2.65 раза при максимальном напряжении на ускорительной трубке 750 кВ. Используя обычную формулу для ослабления излучения за барьером

$$I = I_0 e^{-\mu x},$$

находим коэффициент ослабления излучения материалом барьера  $\mu$ , на основании которого по таблицам ослабления находим эффективную энергию излучения. При максимальном напряжении на ускорительной трубке 750 кВ эффективная энергия излучения составила  $\sim 125$  кэВ.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В ходе работы создан генератор рентгеновских импульсов со следующими параметрами:

- напряжение на ускорительной трубке до 750 кВ;
- эффективная энергия квантов 125 кэВ;
- размер излучающего пятна  $< 2$  мм;
- длительность рентгеновского импульса на полувысоте 40 нс, 60 нс;
- доза на расстоянии 1 м от анода 10 мР (40 нс), 15 мР (60 нс);
- в ходе экспериментов на рентгеновской пленке РФ-3, установленной в 1.3 м от источника излучения за дюралюминиевой пластиной толщиной 10 мм, было получено изображение ступенчатого стального клина толщиной от 5 до 15 мм и стальных шариков диаметром  $\geq 0.5$  мм, расположенных на расстоянии 1 м от источника, что под-

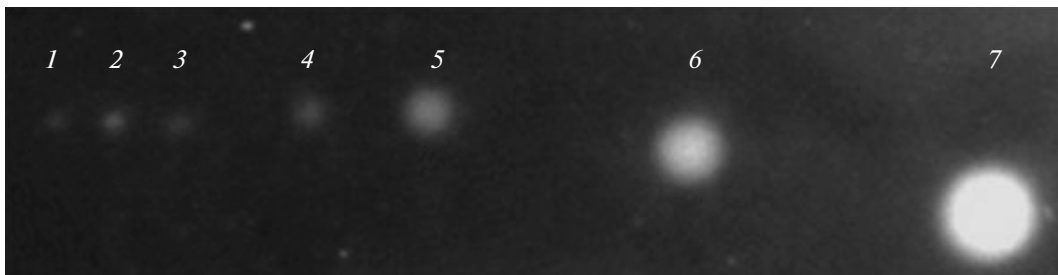


Рис. 8. Рентгеновская фотография стальных шариков диаметрами 0.5 (1), 0.8 (2), 1.0 (3), 1.4 (4), 2.0 (5), 2.8 (6), 4.0 мм (7).

твердило высокую разрешающую способность установки.

Авторы выражают благодарность А.В. Лавриновичу за помощь в написании статьи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ратахин Н.А., Федущак В.Ф., Шепелев А.Н. // Изв. вузов. Физика. 1995. № 12. С. 98.
2. Лучинский А.В., Ратахин Н.А., Федущак В.Ф., Шепелев А.Н. // Изв. вузов. Физика. 1997. № 12. С. 67.
3. Жарова Н.В., Ратахин Н.А., Саушкин А.В. и др. // ПТЭ. 2006. № 3. С. 96.
4. Прецизионные сплавы: Справочник / Под ред. Б.В. Молотилова. М.: Металлургия, 1983.
5. <http://www.amet.ru/mc2b.html>
6. Ратахин Н.А., Федущак В.Ф. // Изв. вузов. Физика. 1999. № 12. С. 15.