

УДК 533.952

PACS: 52.58 Lq

## Установка плазменного фокуса с током до 2 МА как источник жесткого рентгеновского излучения

Д. И. Юрков, А. К. Дулатов, Б. Д. Лемешко, Д. А. Андреев, А. В. Голиков,  
Ю. В. Михайлов, И. А. Прокуратов, А. Н. Селифанов, Т. С. Фатиев

*В статье описана установка на основе генератора импульсных токов с емкостным накопителем энергии, работающего на нагрузку в виде камеры плазменного фокуса (ПФ). Установка обеспечивает амплитуду разрядного тока до 2 МА в камере ПФ при запасаемой энергии в конденсаторной батарее до 150 кДж. Камера ПФ разработана для изучения жесткого рентгеновского излучения (ЖРИ), она имеет окна на корпусе для вывода ЖРИ в сторону катода, а также специальную вставку для вывода ЖРИ внутрь анода. Проведено исследование работы камеры в составе установки с использованием различных рентгеновских мишеней на аноде. При разрядном токе 1,5 МА в камере ПФ генерируется импульс ЖРИ со средней длительностью 16 нс, энергетическим спектром от 10 до 200 кэВ, который обеспечивает поглощенную дозу в облучаемых образцах порядка 1 Зв.*

*Ключевые слова:* генератор импульсных токов, плазменный фокус, жесткое рентгеновское излучение.

### Введение

Установки, использующие эффект пинчевания плазмы при протекании больших разрядных токов, имеют широкое распространение в прикладных задачах для генерации ионизирующих излучений [1]. В данной работе описана установка на основе емкостного накопителя энергии. В качестве нагрузки используется газоразрядная камера, в которой реализуется нецилиндрический  $z$ -пинч [2].

Межэлектродный промежуток камеры заполняется рабочим газом. При подаче высокого напряжения на электроды газоразрядной камеры на поверхности керамического изолятора формируется токоплазменная оболочка (ТПО) из рабочего газа. В результате дальнейшего движения вдоль электродов ТПО сжимается на оси в нецилиндрический  $z$ -пинч – плазменный фокус (ПФ). Пинч является источником нейтронного излучения, мягкого и жесткого рентгеновского излучений (ЖРИ), электронных и ионных пучков и плазменных струй [3].

Во ВНИИА разработан модельный ряд установок ПФ в диапазон токов от 200 кА до 1000 кА, ориентированных на генерацию нейтронного излучения с выходом  $10^7$ – $10^{12}$  нейтр./имп. при использовании в качестве рабочего газа дейтерия и дейтерий-тритиевой смеси [4]. При этом в камерах ПФ генерируется ЖРИ вследствие торможения электронного пучка, образующегося в пинче, на аноде камеры или на специальной рентгеновской мишени, находящейся на аноде.

В последнее время большое количество исследований посвящено изучению ЖРИ установок ПФ, которые могут находить прикладные применения в радиохирургии [5], радиационной биологии [6], проверки радиационной стойкости электронных компонентов [7]. Это в ряде случаев

---

**Юрков Дмитрий Игоревич**, зам. директора – первый зам. гл. конструктора – руководитель НПЦ ИТ, к.т.н.  
**Дулатов Али Каюмович**, начальник отдела, к.т.н.  
**Лемешко Борис Дмитриевич**, ведущий научный сотрудник, д.т.н.  
**Андреев Дмитрий Александрович**, ведущий инженер.  
**Голиков Александр Владимирович**, ведущий инженер.  
**Михайлов Юрий Владимирович**, инженер 1 кат., к.т.н.  
**Прокуратов Илья Александрович**, инженер 1 кат.  
**Селифанов Алексей Николаевич**, инженер 1 кат., к.т.н.  
**Фатиев Тимур Сафиуллинович**, зам. начальника отдела.  
 ФГУП ВНИИА им. Н. Л. Духова.  
 Россия, 127055, Москва, ул. Сушевская, д. 22.  
 Тел. (495) 321-45-55. Факс (495) 787-76-93.  
 E-mail: bogolubov@vniia.ru

Статья поступила в редакцию 24 ноября 2016 г.

© Юрков Д. И., Дулатов А. К., Лемешко Б. Д., Андреев Д. А., Голиков А. В., Михайлов Ю. В., Прокуратов И. А., Селифанов А. Н., Фатиев Т. С., 2017

требует дальнейшего существенного повышения интенсивности ЖРИ. Другими словами, актуальной задачей становится создание установки ПФ как источника ЖРИ, работающей при мегаамперных разрядных токах для получения высоких параметров ЖРИ.

Целью данной работы является разработка установки на основе генератора импульсных токов с емкостными накопителями энергии, обеспечивающей амплитуду разрядного тока в камере ПФ до 2 МА, а также исследование характеристик данной установки.

### Описание установки

В разработанной установке энергия накапливается в конденсаторной батарее, после чего происходит разряд батареи на нагрузку в виде камеры ПФ.

Установка состоит из четырех разрядных модулей, токового коллектора с системой токоподводов, камеры ПФ, модуля управления и зарядки. Отдельные модули установки являются транспортабельными (без подключения токоподводящих кабелей между модулями). Общий вид установки приведен на рис. 1. Установка занимает площадь  $8 \text{ м}^2$ , общая масса  $\sim 4 \text{ т}$ .

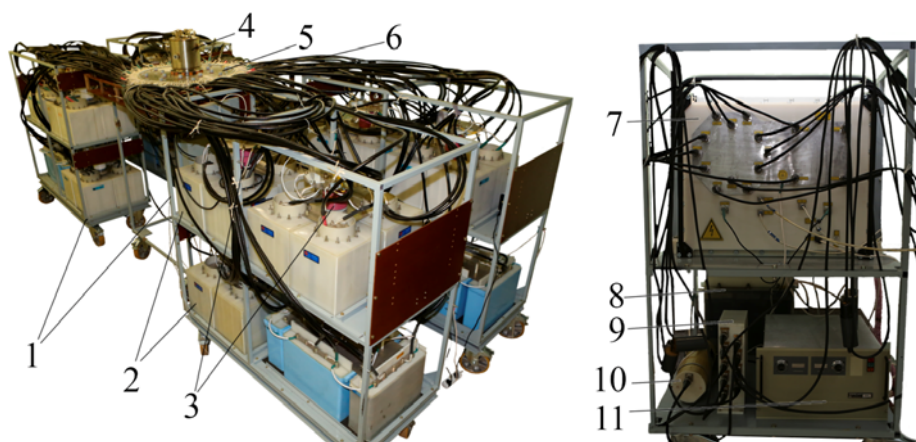


Рис. 1. Общий вид установки ПФ: 1 – разрядные модули, 2 – конденсаторы, 3 – коммутаторы, 4 – камера ПФ, 5 – токовый коллектор, 6 – токоподводящие кабели, 7 – блок коммутации, 8 – защитный конденсатор, 9 – блок распределительный, 10 – высоковольтное реле, 11 – блок зарядки.

Каждый разрядный модуль установки включает в себя высоковольтные импульсные конденсаторы, коммутаторы, токоподводящие кабели, дроссели и блоки зарядных резисторов. На рис. 2 приведена общая схема установки, на которой показан один из четырех разрядных модулей. В качестве емкостных накопителей в разрядных модулях установки используются низкоиндуктивные конденсаторы типа КПИМ-50-6 и КПИМК-50-9 ёмкостью 6 и 9 мкФ соответственно. Данные конденсаторы позволяют работать, с учетом переполюсовки напряжения на конденсаторах после срабатывания установки, при зарядном напряжении до 25 кВ. Суммарная емкость установки составляет 528 мкФ при использовании 48 конденсаторов КПИМК-50-9 и 16 конденсаторов КПИМ-50-6. Конденсаторы в разрядных модулях объединены по четыре штуки в разрядные секции. На секции установлен один коммутатор. В каждом разрядном модуле используются три секции с конденсаторами КПИМК-50-9 и вакуумными разрядниками РВУ-47 [8] и одна секция с конденсаторами КПИМ-50-6 и тиратроном ТДИ1-50к/45 [9]. Ваку-

умные разрядники РВУ-47 и газонаполненные тиратроны ТДИ1-50к/45 используются из следующих соображений: тиратроны обеспечивают монотонный рост тока на начальном этапе развития разряда для формирования однородной ТПО, а затем подключаются секции с вакуумными разрядниками РВУ-47, обеспечивающими рост тока до требуемого значения. Вакуумные разрядники РВУ-47 зарекомендовали себя как коммутаторы с высокой надежностью и стабильностью работы, но время задержки вакуумных разрядников составляет  $1 \div 1,5 \text{ мкс}$  с джиттером  $0,1 \div 0,15 \text{ мкс}$ , тогда как тиратроны ТДИ1-50к/45 имеют время задержки срабатывания  $50 \div 100 \text{ нс}$  с джиттером  $10 \div 20 \text{ нс}$  ввиду развития разряда в газе. Коммутаторы ТДИ1-50к/45 являются накальными газонаполненными приборами, требующими регулировки тока накала и ряда диагностических операций, что может сказываться на стабильности их работы. Для работы с тиратронами ТДИ1-50к/45 на каждый из них подается ток накала 1,65 А от источников НУ1502D.

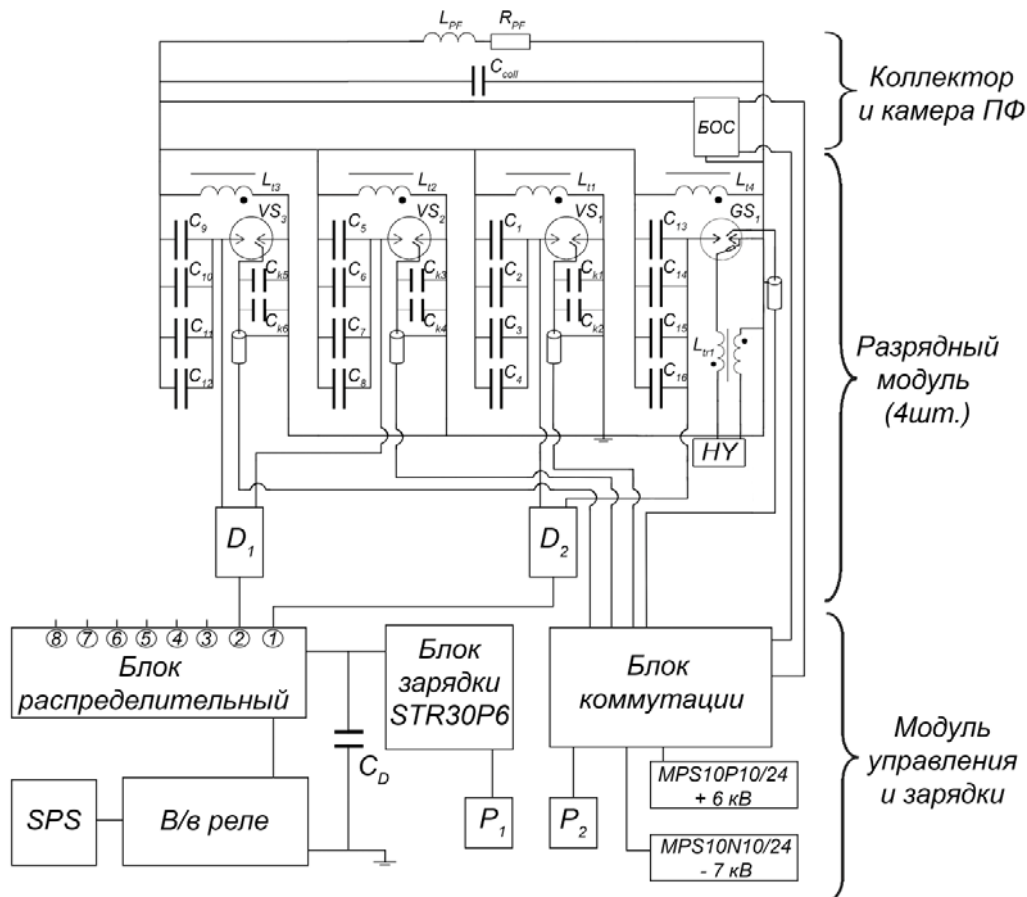


Рис. 2. Блок схема установки с электрической схемой одного разрядного модуля.  $V_{S1}-V_{S3}$  – управляемые вакуумные разрядники РВУ-47,  $GS_1$  – тиратрон ТДИ1-50к/45,  $C_1-C_{12}$  – зарядные конденсаторы секций с вакуумными разрядниками,  $C_{13}-C_{16}$  – зарядные конденсаторы секций с тиратронами,  $L_{11}-L_{14}$  – дроссели,  $C_{coll}$  – емкость коллектора,  $L_{PF}$  – индуктивность камеры ПФ,  $R_{PF}$  – сопротивление камеры ПФ, БОС – блок обратной связи,  $C_{k1}-C_{k6}$  – обостряющие конденсаторы на узле запуска РВУ-47,  $D_1, D_2$  – блоки зарядных резисторов,  $C_D$  – защитный конденсатор,  $P_1$  – пульт управления блоком зарядки,  $P_2$  – пульт запуска блока коммутации, НУ – блок питания НУ1502D, SPS – блок питания SPS-3610.

Коммутаторы разрядных модулей запускаются от блока коммутации установки. Для запуска тиратронов ТДИ1-50к/45 (расположенных в разрядных модулях), конденсаторы, емкостью 6,6 нФ, расположенные в блоке коммутации и заряженные до напряжения 6 кВ разряжаются через тиратрон ТДИ1-50к/25СН (безнакальный тип), обеспечивая амплитуды токов запуска 50 А с фронтом 50 нс.

Для запуска вакуумных разрядников конденсаторы, расположенные в блоке коммутации, емкостью 45 нФ заряженные до напряжения -7 кВ разряжаются через второй тиратрон ТДИ1-50к/25СН. Импульсы запуска подаются на узел поджига РВУ-47, расположенные в разрядных секциях. Дополнительно в цепь узла поджига вакуумных разрядников установлены обостряющие конденсаторы  $C_{k1}-C_{k6}$ , номиналом 3,3 нФ каждый. Это сделано для уменьшения времени задержки срабатывания вакуумных разрядников путем обострения фронта токового импульса запуска [10]. Добавление обостряющего конденсатора приводит к уменьшению индуктивности разрядной цепи за-

пуска, уменьшению фронта импульса тока запуска при сохранении значения амплитуды тока запуска. На узел поджига РВУ-47 подается импульс тока с амплитудой 1,5 кА и периодом разряда 2 мкс, на который наложены гармонические колебания с периодом 160 нс вследствие использования обостряющих конденсаторов. В модуле управления и зарядки используются преобразователи напряжения MPS10P10/24 и MPS10N10/24 для формирования напряжений +6 и -7 кВ, заряжающих конденсаторы в системе запуска коммутаторов.

Для заряда основных емкостных накопителей используется блок зарядки Spellman STR30P6, мощностью 2 кВт. Преобразователь напряжения STR30P6 подключается к распределительному блоку, использующему восемь разъемов, рассчитанные на напряжение 25 кВ, и высоковольтные кабели для разветвления зарядного напряжения на все разрядные секции установки. От распределительного блока зарядное напряжение поступает на разрядные секции через блоки резисторов D. Для заряда каждой секции используются дроссели  $L_t$ .

Снятие напряжения с зарядных конденсаторов после срабатывания установки осуществляется высоковольтным вакуумным реле, расположенным в модуле зарядки и управления установки. Для защиты STR30P6 от пробоя, при действии отрицательного импульса напряжения, возникающего при разряде емкостного накопителя, между выходом STR30P6 и «землей» подключен конденсатор  $C_D$  КПИМ-42-9 (42 кВ, 9 мкФ) и блоки резисторов  $D$ , по два в каждом разрядном модуле.

Коллектор установки предназначен для сведения тока от разрядных модулей на общую нагрузку (камеру ПФ). Он представляет собой два диска из нержавеющей стали 12X18H10T (катодная и анодная пластины), разделенные изоляционными материалами. В центре дисков выполнены отверстия для подключения камеры ПФ. В качестве изоляции между пластинами вблизи контакта камеры ПФ используются вкладыши из ПА6 и лавсановые изоляционные пленки на периферии пластин коллектора. Суммарная толщина пленок составляет 5 мм. К коллектору установки подходит 128 токоподводящих кабелей с погонной индуктивностью 60 нГн/м (по 8 штук от каждой разрядной секции). Для отработки режимов работы установки в состав коллектора входит токовая закоротка, используемая вместо камеры ПФ.

Контроль электротехнических параметров установки осуществляется с помощью разъемных интегрирующего и дифференцирующего поясов Роговского, расположенных вблизи коллектора установки на нескольких земляных контактах токоподводящих кабелей. Контроль напряжения на камере ПФ обеспечивается блоком обратной связи (БОС), представляющим собой импульсный высоковольтный трансформатор, подключенный параллельно к пластинам коллектора. БОС также выполняет защитную функцию в случае несанкционированного срабатывания одного из коммутаторов, вырабатывает сигнал на модуль запуска, для обеспечения аварийного срабатывания всех секций. Контроль зарядного напряжения осуществляется через пульт управления установки.

В целом установка ПФ имеет следующие электротехнические параметры: суммарная емкость конденсаторной батареи 528 мкФ, напряжение зарядки конденсаторов до 25 кВ положительной полярности, постоянная индуктивность контура 13 нГн (с установленной закороткой), постоянное активное сопротивление контура 3 мОм. Мощность источника зарядки конденсаторов составляет 2 кВт, что обеспечивает зарядку до рабочего напряжения в течение 30–60 с. При работе с камерой ПФ амплитуда разрядного тока достигает 2 МА.

### Рентгеновская камера плазменного фокуса

Для изучения особенностей генерации ЖРИ в ПФ при мегаамперных токах разработана камера ПФ [11], показанная на рис. 3. Electroды камеры ПФ изготовлены из нержавеющей стали. Внутренний электрод камеры (анод) 1 имеет сферическую геометрию. Катод 3 камеры имеет сферическую геометрию вблизи изолятора 2, переходящую в цилиндрическую, начиная с полувысоты анода для обеспечения равномерно увеличивающегося зазора по мере движения ТПО на начальной стадии развития разряда. Внешний диаметр анода 147 мм, внутренний диаметр цилиндрического катода 230 мм. Electroды камеры разделены керамическим изолятором (рабочая длина 20 мм). Расстояние между концом анода и верхней крышкой катода сделано 65 мм для того, чтобы не ограничивать движение ТПО на стадии сжатия разряда. Камера ПФ имеет четыре диагностических окна 6 на верхней крышке катода и два диагностических окна на катоде на уровне области пинчевания, установленные под углом 90 градусов к откачному фланцу 7. Оценочная индуктивность камеры ПФ составляет 13–15 нГн.

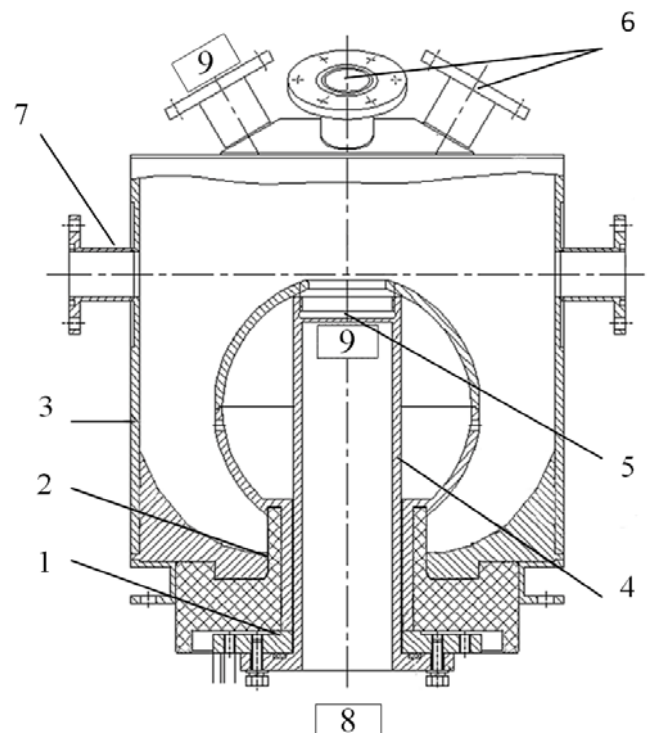


Рис. 3. Рентгеновская камера плазменного фокуса и диагностическое оборудование: 1 – анод, 2 – изолятор, 3 – катод, 4 – анодная вставка, 5 – рентгеновская мишень, 6 – окна для вывода излучения, 7 – фланец для откачки и наполнения камеры газом, 8 – сцинтилляционный детектор ССДИЗ8, 9 – термолюминесцентные детекторы ДТЛ-02.

Для вывода ЖРИ внутрь камеры ПФ на конце анода сделано отверстие диаметром 43 мм, и уста-



новлена полая анодная вставка 4 внутрь камеры ПФ, на которой находятся сменные рентгеновские мишени 5. За мишенями внутри анодной полости можно располагать исследуемые образцы и детекторы, подвергающиеся воздействию ЖРИ. Преимуществом данной конструкции является максимально близкое расстояние от источника ЖРИ (рентгеновской мишени) до области расположения образцов. Анод камеры ПФ и, соответственно, анодная вставка находятся под «земляным» потенциалом, что упрощает работу с образцами внутри анодной полости. Анодная вставка 4 вакуумноплотно присоединяется к аноду камеры ПФ. Она выполнена из алюминия с толщиной боковых стенок 5 мм и толщиной области вывода излучения 2 мм. Расстояние от верхушки анода (области формирования пинча) до торца анодной вставки составляет 15 мм.

Для откачки камеры ПФ использовался безмасляный откачной пост Mini-TASK AG81, находящийся отдельно от установки ПФ. При работе на калиброванный тестовый объем откачной пост обеспечивает вакуум  $4 \times 10^{-8}$  Торр. После сборки камера ПФ откачивалась до давления  $5 \times 10^{-4}$  Торр. Затем камера ПФ была установлена на коллектор и проведена высоковольтная тренировка камеры для очистки электродной системы от адсорбированных газов. Тренировка проводилась при зарядных напряжениях 5–12 кВ. В качестве рабочего газа использовался дейтерий при давлениях 3–10 Торр. Предельный уровень вакуума, достигнутый на камере ПФ после высоковольтной тренировки, составил  $3 \times 10^{-5}$  Торр.

### Исследования жесткого рентгеновского излучения

На установке проведено экспериментальное изучение выхода и спектра ЖРИ камер ПФ при мегаамперных разрядных токах. На камере ПФ производились серии срабатываний при зарядном напряжении батареи 18 кВ, что соответствует запасаемой энергии 85 кДж. Амплитуда разрядного тока в камере составляла 1,5 МА, значение тока в особенности 1,2 МА. Камера ПФ заполнялась дейтерием до давления 13 Торр для согласования времени появления особенности с четвертью периода разряда (5,8 мкс). Для контроля выхода ЖРИ при каждом срабатывании установки использовался сцинтилляционный детектор ССДИЗ8 [12], установленный на расстоянии 100 см от мишени камеры ПФ в направлении анодной полости (см. рис. 3).

На рис. 4 приведены импульсы разрядного тока и производной разрядного тока от интегрирующего и дифференцирующего поясов Роговско-

го соответственно и импульс ЖРИ с детектора ССДИЗ8. Для измерения абсолютного выхода ЖРИ использованы термомлюминесцентные детекторы (ТЛД). Преимуществами ТЛД являются высокая чувствительность и большой диапазон измерения доз (энергий). В экспериментах использовались детекторы типа ДТЛ-02, состоящие из LiF с добавками Mg и Ti.

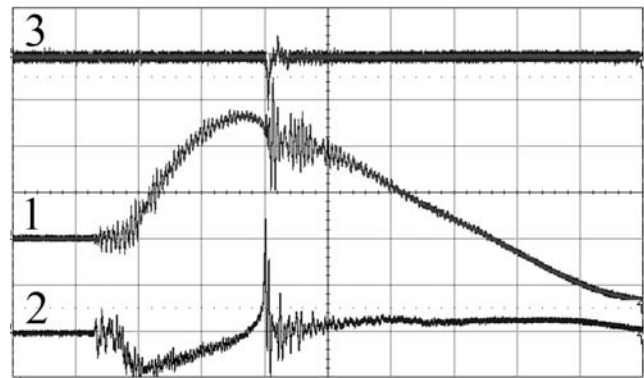


Рис. 4. Экспериментальные данные: 1 – сигнал разрядного тока (10 В/дел.), 2 – инвертированный сигнал производной разрядного тока (10 В/дел.), 3 – сигнал ЖРИ (5 В/дел.), временная развертка 2 мкс/дел.

Измерение поглощенных доз в ТЛД производилось в двух направлениях: за окном вывода излучения на верхушке катода и внутри анодной полости за рентгеновской мишенью (см. рис. 3). В качестве окна на катоде использовался алюминиевый фильтр толщиной 0,7 мм, за которым располагались ТЛД. При этом расстояние от центра рентгеновской мишени до ТЛД составляло 16 см. Детекторы внутри анодной полости за мишенью устанавливались максимально близко к мишени на расстоянии 2 см. В экспериментах последовательно использовались мишени двух типов: молибден 0,8 мм и алюминий 2 мм. Необходимо отметить, что при установке молибденовой мишени, ЖРИ, попадающее внутрь анодной полости, проходит через 0,8 мм молибдена мишени и через 2 мм алюминия (торец анодной вставки). Однако после ослабления ЖРИ в молибдене толщиной 0,8 мм (пропускает рентгеновские кванты с энергией больше 50 кэВ) ослабление от 2 мм алюминия не превышает 8 % (пропускает кванты с энергией > 15 кэВ) [13]. В каждом случае произведено три последовательных срабатывания установки при зарядном напряжении 18 кВ, запасенная энергия 85 кДж. Относительный выход ЖРИ контролировался сцинтилляционным детектором ССДИЗ8 при каждом срабатывании. Средняя длительность импульсов ЖРИ составила  $\langle t \rangle = (16 \pm 3)$  нс. Значения поглощенных доз ЖРИ приведены в таблице.

Таблица

Значения поглощенных доз ЖРИ

Мишень	Расположение ТЛД	Поглощенная доза ТЛД внутри анодной полости, Зв	Поглощенная доза ТЛД за рентгеновским окном на катоде, Зв
Al 2 мм		$1,3 \pm 0,7$	$0,15 \pm 0,02$
Mo 0,8 мм		$0,03 \pm 0,02$	$0,30 \pm 0,08$

При использовании алюминиевой мишени и выводе ЖРИ внутрь анодной полости получено наибольшее значение поглощенной дозы в ТЛД. За окном на катоде поглощенная в детекторах энергия на порядок меньше. Замена алюминиевой мишени на молибденовую для увеличения атомного номера мишени ( $Z_{Mo}/Z_{Al} = 3,15$ ) приводит к тому, что внутри анодной полости поглощенная энергия крайне мала за счёт поглощения всего ЖРИ самим материалом мишени. За рентгеновским окном при переходе с алюминия на молибден поглощенная доза должна была увеличиться пропорционально  $Z_{Mo}/Z_{Al}$ , но она возросла только в два раза за счет напыленного слоя алюминия на молибденовой мишени.

Для измерения спектра ЖРИ установки ПФ использованы ТЛД и набор медных поглощающих фильтров, толщинами 0,1 / 0,5 / 2 / 4 / 6 / 8 мм. Сборка с детекторами и фильтрами располагалась на расстоянии 28 см от мишени в направлении анодной полости камеры ПФ. Проведено три срабатывания установки с алюминиевой мишенью при зарядном напряжении 18 кВ, после чего была определена поглощенная доза с детекторов за фильтрами. Первый детектор не закрывался фильтром. По полученной кривой поглощения ЖРИ в детекторах восстановлен спектр ЖРИ методом квазиразрешения [14]. Полученный спектр показан на рис. 5.

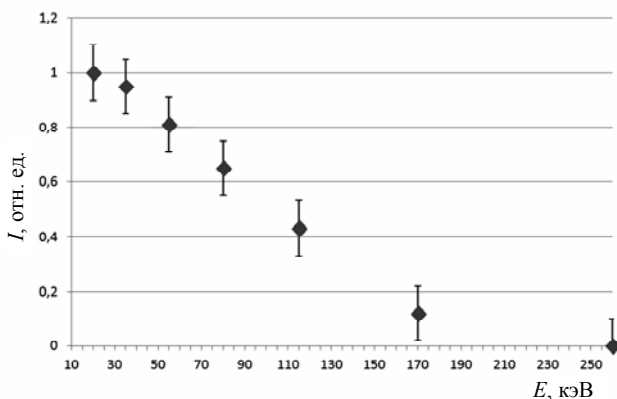


Рис. 5. Восстановленный спектр ЖРИ установки.

В целом проведенные эксперименты показали, что работа с алюминиевой мишенью и выводом ЖРИ внутрь анода обеспечивает поглощен-

ную дозу в детекторах в  $(4,5 \pm 2,2)$  раза больше, чем при использовании молибденовой мишени и выводе ЖРИ через окно на катоде.

Проведем теоретическую оценку эффективности вывода ЖРИ из камер ПФ в двух направлениях. Эффективность вывода ЖРИ из камер ПФ можно описать формулой:

$$\omega = g\xi\eta \frac{Y_{in}(Z)}{S} = \frac{\xi(\varphi)e^{-\rho\mu h}Z}{L^2}K, \quad (1)$$

где  $\omega$  — плотность энергии ЖРИ за окном вывода излучения,  $Y_{in}$  — полная энергия ЖРИ,  $S$  — площадь окна для вывода излучения,  $\rho$  — плотность мишени,  $\mu$  — массовый коэффициент ослабления излучения в мишени,  $h$  — толщина мишени,  $\varphi$  — угол вылета квантов относительно направления электронного пучка, попадающего в мишень,  $L$  — расстояние от центра мишени до точки вывода излучения,  $K$  — константа, зависящая от параметров электронного пучка (ток и длительность электронного пучка и т. п.). В формуле (1) под  $Y_{in}$  понимается непрерывный тормозной спектр ЖРИ, поскольку характеристическое излучение, как показано в работе [15], мало.

На  $\omega$  оказывают влияние атомный номер материала мишени  $Z$ , диаграмма направленности ЖРИ при взаимодействии электронного пучка с мишенью  $\xi(\varphi)$  [16, 17], кривые пропускания ЖРИ материалом мишени и рентгеновским окном  $\eta = \exp(-\rho\mu h)$  и ослабление энергии ЖРИ за счет расстояния от мишени до точки вывода ЖРИ  $g = L^{-2}$ .

Поскольку  $Y_{in}$  пропорционален атомному номеру  $Z$  материала мишени, то при выводе ЖРИ обычно используют мишени из материала с большим  $Z$  [1, 18]. Действительно, по формуле (1) наиболее выгодным материалом мишени при выводе излучения через окно на катоде является материал с большим  $Z$ , например, тантал или вольфрам, также часто используется молибден. При этом толщина мишени должна составлять несколько миллиметров для обеспечения достаточного ресурса работы. В этом случае кривые пропускания ЖРИ материалом мишени не учитываются ( $\eta = 1$ ). В случае вывода ЖРИ внутрь анодной полости, необходимо использовать материал мишени с ма-

леньким  $Z$ . Это объясняется резким изменением множителя  $e^{-\rho_{\text{мг}}h}$  при увеличении  $Z$ . Например, изменение  $Z$  с 13 (алюминий) до 42 (молибден), приводит к изменению массового коэффициента поглощения с  $\mu_{\text{Al}} = 0,2$  до  $\mu_{\text{Mo}} = 2$  (для 80 кэВ), уменьшению множителя  $e^{-\rho_{\text{мг}}h}$  в 6 раз, и соответственно уменьшению плотности энергии ЖРИ, прошедшей насквозь через мишень. Для низкоэнергетической части спектра ЖРИ изменение  $e^{-\rho_{\text{мг}}h}$  достигает двух порядков.

При сравнении по формуле (1) выводимой плотности энергии ЖРИ через рентгеновское окно на катоде  $\omega_K$  в случае использования мишени из молибдена толщиной 10 мм, и выводимой плотности энергии ЖРИ внутрь анодной полости  $\omega_A$  для алюминиевой мишени, толщиной 2 мм, получается, что оптимизированная плотность ЖРИ, выводимая внутрь анодной полости  $\omega_A$ , в шесть раз больше оптимизированной плотности ЖРИ, выводимой через окно на катоде  $\omega_K$  камеры ПФ ( $\omega_A/\omega_K \approx 6$ ). В расчете принималось, что средняя энергия рентгеновских квантов 80 кэВ, расстояния до точки вывода излучения внутри анода и за окном на катоде равны 2 и 16 см соответственно, что соответствует реальным экспериментам. В случае замены молибденовой мишени на танталовую или вольфрамовую с большим  $Z$  можно снизить отношение  $\omega_A/\omega_K$  до 4.

На установке проведено исследование ресурса работы рентгеновских мишеней. Ресурс мишеней при воздействии плазменных струй и электронного пучка определяет возможность применения установок ПФ как источников ЖРИ. Известно, что после срабатываний установок ПФ на мишенях наблюдаются значительные деформации. В работе [19] указывается, что в молибденовой вставке после 100 срабатываний установки ПФ с энергетикой 60 кДж наблюдается несквозное отверстие диаметром 6 мм и абляция материала, вызванная потоком быстрых электронов. В [20] проведено исследование влияния плазменных струй и ион-

ных пучков на стальные вставки, расположенные на катоде камеры ПФ. Энергетика также составляла 60 кДж. При одном срабатывании наблюдалось уменьшение толщины и массы на 0,38 мкм и 0,24 г соответственно. Такое же испарение материала наблюдалось и на вольфрамовых вставках [21].

Для экспериментов на установке выбраны рентгеновские мишени из молибдена толщинами 0,2 мм / 0,4 мм / 0,8 мм, из меди толщиной 1 мм и из алюминия (в качестве мишени использовалось алюминиевый торец анодной вставки толщиной 2 мм). Каждая из мишеней последовательно устанавливалась в анодную вставку и на камере ПФ производились серии срабатываний при зарядном напряжении батареи 14 кВ.

На рис. 6 показаны рентгеновские мишени после работы в составе установки. В молибденовой мишени толщиной 0,2 мм, после 30 срабатываний появилось сквозное отверстие I диаметром 8–10 мм (рис. 6, а). При этом по показаниям ССДИЗ8 наблюдалось снижение относительного выхода ЖРИ. На оставшейся части мишени видны деформации, сколы и напыление алюминия (из анодной вставки) и стали (из электродов камеры). Увеличение толщины мишени до 0,4 мм и 0,8 мм приводит к повышению ресурса работы мишени: при 50 срабатываниях установки сквозное отверстие не образуется (равномерное запыление II), однако в центре есть симметричная каверна III диаметром 2÷4 мм, свидетельствующая о локальном взаимодействии электронного пучка с мишенью (рис. 6, б, в). На более толстых мишенях из меди и алюминия экспериментально показано, что толщина мишени  $\sim 1$  мм достаточна для сохранения её ресурса работы в течение не менее 30 срабатываний. В экспериментах медная мишень не деформирована, явные следы взаимодействия электронного пучка с мишенью отсутствуют (рис. 6, г), алюминий анодной вставки также не деформировался (рис. 6, д) после 50 срабатываний.

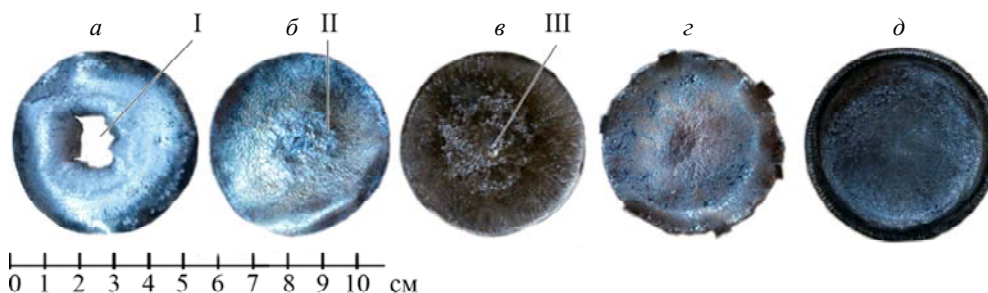


Рис. 6. Рентгеновские мишени после работы в составе установки. I – сквозное отверстие, II – равномерное запыление, III – локальная каверна; а – молибден 0,2 мм, б – молибден 0,4 мм, в – молибден 0,8 мм, г – медь 1 мм, д – алюминий 2 мм.

Каждое срабатывание камеры ПФ сопровождается сильной эрозией металлических поверхностей, взаимодействующих с ТПО на этапе её ускорения и сжатия в пинч. Возникающая эрозия приводит к запылению мишени. Поскольку ЖРИ возникает вследствие взаимодействия электронного пучка с мишенью, а характерные расстояния торможения электронного пучка в материале мишени составляют десятки и сотни микрометров [22], то запыление мишени может оказывать значительное влияние на выход ЖРИ. Для оценки степени запыления мишеней и состава напыленного слоя, проведен рентгеноспектральный анализ. Определен элементный состав мишеней в запыленных областях. В молибденовой мишени толщиной 0,8 мм после 22 срабатываний на отдельных участках содержание алюминия достигает 70 % по весовому составу. Запыление в основном алюминием объясняется, во-первых, близким расположением алюминиевой анодной вставки к мишени – конец алюминиевой вставки приподнят над мишенью, чтобы обеспечить место крепления мишени, во-вторых, меньшей температурой плавления алюминия. При этом запыление резко неоднородно – запыление алюминием происходит слоями, соответствующими каждому срабатыванию установки ПФ.

### Заключение

Созданная установка с нагрузкой в виде камеры ПФ позволяет проводить исследования генерации ЖРИ при разрядном токе до 2 МА. Эксплуатация установки с разрядной камерой показала её надежную работу. На установке проведены исследования особенностей генерации ЖРИ в камере ПФ. Показано, что при запасаемых энергиях порядка 100 кДж необходимо использовать рентгеновские мишени толщиной 1–2 мм и более для сохранения ресурса их работы. При каждом срабатывании наблюдается запыление мишеней конструкционными материалами камеры. Для получения максимальной плотности выводимой энергии из камеры ПФ целесообразно выводить ЖРИ внутрь анодной полости через мишень, изготовленную из материалов с малым атомным номером. На исследуемой камере ПФ средняя длительность импульса ЖРИ составила 16 нс, максимальная поглощенная доза в тканеэквивалентных образцах  $\approx 1$  Зв, энергетический спектр ЖРИ в диапазоне от 10 до 200 кэВ.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Серия Б. Том IX-3. Радиационная плазмотермодинамика (под ред. В. А. Грибова). – М.: ЯНУС-К, 2007.

2. Филиппов Н. В., Филиппова Т. И., Петров Д. П., Храбров В. А. // Физика плазмы и проблемы управляемых термоядерных реакций. 1958. Т. 4. С. 170.
3. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Серия Б. Том IX-2. Высокоэнергетичная плазмотермодинамика (под ред. А. С. Кингсеппа). – М.: ЯНУС-К, 2007.
4. Yurkov D. I., Dulatov A. K., Lemeshko B. D., Mikhailov Yu. V., Prokuratov I. A., Selifanov A. N., Andreev D. A., Golikov A. V. // Journal of Physics: Conference Series. 2015. No. 653. P. 1–5. doi: 10.1088/1742-6596/653/1/012019.
5. Разработка методов и аппаратуры для диагностики и терапии злокачественных опухолей на основе импульсных генераторов нейтронного и рентгеновского излучений (под ред. Ю. Н. Бармакова) // Вопросы атомной науки и техники. Серия: ядерное приборостроение. 2010. Т. 27. № 1. С. 15.
6. Tartari A., Da Re A., Mezzetti F., Angeli E., De Chiara P. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 2004. Vol. 213. P. 607.
7. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру (под ред. В. М. Чернова). 1994. Вып. 1–2.
8. Akhmetgareev M., Alferov D., Bunin R., Evsin D., Sidorov V. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2013. No. 8. Vol. 41. P. 2154.
9. Bochkov V. D., Dyagilev V. M., Ushich V. G., Frants O. B., Korolev Yu. D., Sheirlyakin I. A., Frank K., Geyman V. G., Bickes Ch., Ernst U., Iberler M., Urban J. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2001. No. 5. Vol. 29. P. 1520.
10. Дулатов А. К., Лемешко Б. Д., Михайлов Ю. В., Прокуратов И. А., Селифанов А. Н. // Приборы и техника эксперимента. 2014. № 6. С. 45. doi: 10.1134/S0020441214050133.
11. Андреев Д. А., Дулатов А. К., Лемешко Б. Д., Михайлов Ю. В., Прокуратов И. А., Селифанов А. Н. Патент 141586 РФ Импульсный источник рентгеновского излучения наносекундной длительности. ФГУП ВНИИА им. Н. Л. Духова. 2014.
12. Официальный сайт ФГУП ВНИИА им. Н. Л. Духова (аппаратура для регистрации быстропротекающих процессов / детекторы импульсных ионизирующих излучений) URL: <http://www.vniia.ru/proces/detektor.html>
13. Сторм Э., Израэль Х. Сечения взаимодействия гамма-излучения. – М.: Атомиздат, 1973.
14. Тихонов А. Н., Арсенин В. А. Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1979.
15. Дулатов А. К., Крапива П. С., Лемешко Б. Д., Михайлов Ю. В., Москаленко И. Н., Прокуратов И. А., Селифанов А. Н. // Приборы и техника эксперимента. 2015. № 6. С. 71. doi: 10.7868/S0032816215050055.
16. Жуковский М. Е., Марков М. Б., Подоляко С. В., Усков Р. В. // Mathematica Montisnigri. 2014. Vol. 29. P. 38.
17. Козловский В. Н. Информация в импульсной рентгенографии. – Снежинск: РФЯЦ–ВНИИТФ, 2006.
18. Gullickson R. L., Barlett R. H. X-ray analysis for electron beam enhancement in the plasma focus device. – Livermore: Lawrence Livermore Laboratory, 1974.
19. Кварцхава И. Ф., Хаутиев Э. Ю., Нунидзе М. Л. // Физика плазмы. 1976. Т. 2. № 1. С. 40.
20. Gribkov V. A., Pimenov V. N., Ivanov L. I., Dyomina E. V., Maslyaev S. A., Mikuszewski R., Sholz M., Ugaste U. E., Dubrovsky A. V., Kulikauskas V. C., Zatekin V. V. // J. Phys. D. 2003. Vol. 36. P. 1817.
21. Gribkov V. A., Paduch M., Zielinska E., Laas T., Shirokova V., Väli B., Paju J., Pimenov V. N., Demina E. V., Latyshev S. V., Niemela J., Crespo M.-L., Cicuttin A., Talab A., Pokatilov A., Parker M. / 21st International Conference on Plasma Surface Interactions (Kanazawa City, Japan, 2014).
22. Абрамов А. И., Казанский Ю. А., Матусевич Е. С. Основы экспериментальных методов ядерной физики. – М.: Атомиздат, 1970.



## The plasma focus device with the 2-MA discharge current as a hard X-ray source

D. I. Yurkov, A. K. Dulatov, B. D. Lemeshko, D. A. Andreev, A. V. Golikov, Yu. V. Mikhailov, I. A. Prokuratov, A. N. Selifanov, and T. S. Fatiev

All-Russian Research Institute of Automatics (VNIIA)  
22 Sushchevskaya str., Moscow, 127055, Russia  
E-mail: bogolubov@vniia.ru

Received November 24, 2016

***This paper describes a device based on a pulsed current generator with the capacity energy storage. The device works with a plasma focus (PF) chamber. It provides the discharge current amplitude up to 2 MA in the PF chamber and the storage energy as high as 150 kJ. The PF chamber has been elaborated for the hard X-ray (HXR) emission studying. It has diagnostic windows on the cathode and a special anode inset for the HXR radiation output. The PF chamber as a part of the PF device was investigated with different X-ray targets on the anode. The PF chamber with the 1.5-MA discharge current generates a HXR pulse with the mean duration of 16 ns and energy spectrum from 10 to 200 keV, that provides the absorbed dose in samples about 1 Sv.***

**Keywords:** pulse current generator, plasma focus, hard X-ray emission.

### REFERENCES

1. *Encyclopedia of Low-Temperature Plasma*, Ed. by V. E. Fortov, Ser. B, Vol. IX-3: *Radiative Plasma Dynamics: Physics, Experimental Technologies, and Applications*, Ed. by V. A. Gribkov (Yanus-K, Moscow, 2007) [in Russian].
2. N. V. Filippov, T. I. Filippova, D. P. Petrov, and V. A. Khabrov, *Plasma physics and controlled thermonuclear reaction problems*. 1958. Vol. 4. P. 170 [in Russian].
3. *Encyclopedia of Low-Temperature Plasma*, Ed. by V. E. Fortov, Ser. B, Vol. IX-2: *Plasma Dynamics: Physics, Experimental Technologies, and Applications*, Ed. by A. S. Kingsep (Yanus-K, Moscow, 2007) [in Russian].
4. D. I. Yurkov, A. K. Dulatov, B. D. Lemeshko, Yu. V. Mikhailov, I. A. Prokuratov, A. N. Selifanov, D. A. Andreev, and A. V. Golikov, *Journal of Physics: Conference Series*, No. 653, 1 (2015). doi: 10.1088/1742-6596/653/1/012019.
5. *The development of methods and apparatus for cancerous growth diagnostics and therapy on the base of neutron and x-ray radiation pulse generator*. Ed. by Yu. N. Barmakov, Issue of atomic science and technology. Ser: nuclear instrument-building **27** (1), 15 (2010).
6. A. Tartari, Da Re A., F. Mezzetti, E. Angeli, and P. De Chiara, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. **213**, 607 (2004).
7. Issue of atomic science and technology. Ser: Physics of radiation effects on radioelectronic equipment, Ed. by V. M. Chernov. No. 1–2, 1994 [in Russian].
8. M. Akhmetgareev, D. Alferov, R. Bunin, D. Evsin, and V. Sidorov, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **41** (8), 2154 (2013).
9. V. D. Bochkov, V. M. Dyagilev, V. G. Ushich, O. B. Frants, Yu. D. Korolev, I. A. Sheirlyakin, K. Frank, V. G. Geyman, Ch. Bickes, U. Ernst, M. Iberler, and J. Urban, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **29**, 1520 (2001).
10. A. K. Dulatov, B. D. Lemeshko, Yu. V. Mikhailov, I. A. Prokuratov, and A. N. Selifanov, *Instruments and Experimental Techniques* **57**, 692 (2014). doi: 10.1134/S0020441214050133.
11. D. A. Andreev, A. K. Dulatov, B. D. Lemeshko, Yu. V. Mikhailov, I. A. Prokuratov, and A. N. Selifanov, RF Patent No. 141586 (2014).
12. All-Russian Research Institute of Automatics (VNIIA) Home-Page URL: <http://www.vniia.ru/eng/proces/index.html>
13. E. Storm and H. Israel, *Photon cross sections from 0,001 to 100 MeV for elements 1 through 100*. (New Mexico: Los Alamos scientific laboratory, 1967).
14. A. N. Tikhonov, V. A. Arsenin, *Methods for solving ill-posed problems*. (Moscow.: Nauka, 1979) [in Russian].
15. A. K. Dulatov, P. C. Krapiva, B. D. Lemeshko, Yu. V. Mikhailov, I. N. Moskalenko, I. A. Prokuratov, and A. N. Selifanov, *Instruments and Experimental Techniques* **58**, 774 (2015). doi: 10.1134/S002044121505005X.
16. M. E. Zhukovsky, M. B. Markov, C. V. Podoliako, and R. V. Uskov, *Mathematica Montisnigri* **29**, 38 (2014).
17. V. N. Kozlovsky, *Information in pulse radiography*. (Snezinsk: Russian Federal Nuclear Center – VNIITF, 2006) [in Russian].
18. R. L. Gullickson and R. H. Barlett, *X-ray analysis for electron beam enhancement in the plasma focus device*. (Livermore: Lawrence Livermore Laboratory, 1974).
19. I. F. Kvartchava, E. Yu. Hautiev, and M. L. Ninidze, *Fizika Plazmy* **2** (1), 40 (1976).
20. V. A. Gribkov, V. N. Pimenov, L. I. Ivanov, E. V. Dyomina, S. A. Maslyayev, R. Mikluszewski, M. Sholz, U. E. Ugaste, A. V. Dubrovsky, V. C. Kulikauskas, and V. V. Zatekin, *J. Phys. D.* **36**, 1817 (2003).
21. V. A. Gribkov, M. Paduch, E. Zielinska, T. Laas, V. Shirokova, B. Väli, J. Paju, V. N. Pimenov, E. V. Demina, S. V. Latyshev, J. Niemela, M.-L. Crespo, A. Cicuttin, A. Talab, A. Pokatilov, and M. Parker, in *Proc. 21st International Conference on Plasma Surface Interactions* (Kanazawa City, Japan, 2014).
22. A. I. Abramov, Yu. A. Kazansky, and E. S. Matusevich, *Basics of nuclear physic experimental methods*. (Moscow: Atomizdat, 1970) [in Russian].