

**ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА**

УДК 621.384.663, 621.372.8, 537.862

**ИМПУЛЬСНОЕ ОТКЛОНЯЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО
ИНТЕНСИВНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА**

©2026 г. О. Н. Алякринский^{a, *}, А. В. Акимов^a, П. А. Бак^a,
А. М. Батраков^a, К. И. Живанков^a, И. А. Журавлев^b, П. В. Логачев^a,
О. А. Никитин^b, О. А. Павлов^a, И. В. Пензин^b, А. В. Петренко^a,
Д. В. Петров^b, Р. В. Протас^{b, c}, Д. Ф. Решетов^a, А. А. Старостенко^a

^a *Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера*

Сибирского отделения Российской академии наук

Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

^b *Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский
институт технической физики им. академика Е.И. Забабахина*

Россия, 456770, Снежинск Челябинской обл., ул. Васильева, 13

^c *Снежинский физико-технический институт*

Национального исследовательского ядерного университета “МИФИ”

Россия, 456776, Снежинск Челябинской обл., ул. Комсомольская, 8

* *e-mail: O.N.Alyackrinskiy@inp.nsk.su*

Поступила в редакцию 18.08.2025 г.

После доработки 20.08.2025 г.

Принята к публикации 06.10.2025 г.

Разработано импульсное отклоняющее устройство (кикер), позволяющее отклонять интенсивный электронный пучок без внесения искажений из-за наведенных полей. Измерены характеристики отклоняющего устройства и проведены его испытания с интенсивным электронным пучком. Разработанное устройство используется в комплексе импульсной рентгеновской томографии для направления отрезков электронного пучка в разные каналы транспортировки.

1. ВВЕДЕНИЕ

В создаваемом ИЯФ СО РАН и РФЯЦ-ВНИИТФ комплексе импульсной рентгеновской томографии [1] необходимо направлять сильнооточный релятивистский электронный пучок с током 2 кА и энергией 20 МэВ в несколько отдельных каналов транспортировки. С этой целью разработана система разводки пучка, которая представляет собой совокупность магнитных элементов, последовательно расположенных в тракте транспортировки пучка, ускоренного в линейном индукционном ускорителе.

Кикер – импульсное отклоняющее устройство – является первым элементом системы разводки. Его назначение заключается в отклонении направления частей пучка от прямого импульсным электромагнитным полем. В результате пучок разделяется на части, каждая из которых направляется в свой электронно-оптический тракт.

В зависимости от задачи могут использоваться разные типы отклоняющих устройств [2, 3]. Мы используем схему сверхбыстрого кикера, в котором отклоняющее поле нарастает за несколько наносекунд. Взаимодействие интенсивного электронного пучка с устройством приводит к возбуждению наведенных электромагнитных полей, которые, взаимодействуя с электронным пучком, ухудшают его эмиттанс [4]. Мы разработали и испытали отклоняющее устройство, в котором поля возбуждения взаимодействуют с электронным пучком только на его фронтах. Это позволило провести и отклонить интенсивный электронный пучок без заметных искажений.

2. ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И РАБОТЫ ОТКЛОНЯЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

Кикер представляет собой конструкцию из восьми стержней длиной 610 мм и диаметром 28 мм, размещенных равномерно по углу в цилиндрической вакуумной камере диаметром 171 мм параллельно её стенке. Электроды крепятся с обеих сторон к разъемам для подключения системы питания. Волновое сопротивление каждой такой линии составляет 50 Ом. Система питания состоит из восьми импульсных генераторов и согласованных нагрузок на концах линий. Конструкция кикера показана на рис.1. Параметры отклоняющего устройства представлены в табл. 1.

Рис 1. Слева – поперечный разрез кикера. Справа – продольный разрез.

Таблица 1. Параметры отклоняющего устройства

Параметр	Значение
Интеграл суммы полей, кВ	320–450
Поперечная неоднородность интеграла поля в рабочей области Ø 30 мм	Не более ± 1.5 %

Коэффициент стоячей волны линии в полосе 700 МГц	Не более 1.13
Волновое сопротивление линий, Ом	50

Электронный пучок отклоняется суммой электрических и магнитных полей бегущих волн. Отдельная волна представляет собой основную моду 8-проводного коаксиального волновода, и возбуждается подачей импульса генератора на электрод. Волны движутся навстречу электронному пучку. Угол отклонения можно записать в виде

$$\alpha = \frac{p_y}{p_z} \approx \frac{p_y}{U/c}, \quad (1)$$

где α – угол поворота, p_z и p_y – продольный и поперечный импульсы, U – энергия электронов и c – скорость света. Здесь и далее считаем, что электроны релятивистские и поперечный импульс много меньше продольного. Запишем уравнение движения:

$$\frac{c}{dz} dp_y \approx \frac{dp_y}{dt} = e (E_y + c B_x), \quad (2)$$

где e – заряд электрона, E – электрическое поле, B – магнитная индукция. Интегрируя (2) по z и объединяя с (1), получим

$$\alpha \approx \frac{\int (E_y + c B_x) dz}{U/e}. \quad (3)$$

2.1. Поля отклонения

Отклоняющее поле должно быть однородно в области пролета пучка, чтобы избежать искажения углового распределения и роста эмиттанса. Известное решение уравнений Максвелла для трубы, по внутренней поверхности которой течет ток с косинусным угловым распределением, представляет собой однородное дипольное магнитное поле во внутренней области трубы. Дискретизация косинусного распределения приведет к появлению неоднородности распределения магнитного поля, но в области вокруг оси устройства эта неоднородность мала. Для случая восьми электродов неоднородность распределения магнитного поля в области вокруг оси с диаметром 30 мм составит менее 0.1 % при расстоянии между краями электродов 100 мм. Следовательно, основным источником неоднородности распределения магнитного поля является погрешность изготовления и юстировки электродов и погрешности амплитуд импульсов генераторов. Диапазон амплитуд импульсов, подаваемых на электроды, указан в табл. 2. Распределения полей, рассчитанные с помощью CST Studio Suite, показаны на рис. 2. На электроды слева вертикальной плоскости симметрии подаются импульсы с отрицательной полярностью, на электроды справа – с положительной.

Рис. 2. Распределение отклоняющих электрического (а) и магнитного (б) полей

Таблица 2. Параметры генераторов системы питания

Параметр	Значение	
Количество генераторов, шт	8	
Импеданс нагрузки генератора, Ом	50±0.5	
Полярность генераторов	Положительная (4 генератора)	Отрицательная (4 генератора)
Диапазон регулировки выходного напряжения	11–16.4 кВ (2 генератора) 4.5–7 кВ (2 генератора)	11–16.4 кВ (2 генератора) 4.5–7 кВ (2 генератора)
Длительность вершины импульса напряжения на согласованной нагрузке по уровню 99%, нс	34±2	
Неравномерность вершины импульса (от уровня 99% на переднем фронте до уровня 99% на спаде)	не более ±1 %	
Длительность переднего фронта импульса напряжения по уровню 1–99%, нс	не более 5	
Стабильность во времени импульса напряжения на нагрузке, нс	не более 1	

Интеграл магнитного поля измерялся на стенде (рис.3) для точной калибровки и измерения неоднородности. Для этого в кикер вставлялась пластина с прямыми проводниками, параллельными оси кикера и расположенными между собой на расстоянии 5 мм. С одной стороны пластины проводники подключались к оплетке коаксиального кабеля, с другой – к жиле. На разъем кикера подавался синусоидальный сигнал низкой частоты с амплитудой 10 В. Синусоидальный сигнал с каждого проводника измерялся осциллографом. Для повышения точности измерения использовалось фурье-преобразование, и амплитуда сигнала усреднялась по нескольким измерениям. Измеренные амплитуды сигналов с каждого проводника умножались на коэффициенты косинусного распределения и суммировались для всех разъемов. В соответствии с законом индукции Фарадея разница напряжений сигналов с соседних проводников пропорциональна производной по времени магнитного потока между ними. Полагая однородность дипольного поля между проводниками, перепишем интеграл

магнитного поля по площади как интеграл по оси, умноженный на расстояние между проводниками. Таким образом измерялась амплитуда интеграла магнитного поля. Для определения неоднородности интеграла магнитного поля сравнивались измеренные значения в рабочей области диаметром 30 мм вокруг оси. Поворот пластины вокруг оси позволял делать измерение в плоскостях, находящихся под разными углами. Погрешность измерения составила 1.5%, а неоднородность интеграла магнитного поля не превышала 1.5% в области пролета электронного пучка. Электрическое поле поперечной волны связано с магнитным через волновое сопротивление вакуума, что позволяет определить интеграл суммы полей.

Рис. 3. Общий вид конструкции стенда для магнитных измерений.

2.2. Наведенные поля

Электронный пучок взаимодействует также и с наведенными полями. Возбуждение наведенных полей можно представить в виде бегущих навстречу волн. Волна на входе кикера порождается влетом пучка в отклоняющее устройство, и волна на выходе порождается вылетом пучка. Амплитуды волн пропорциональны току электронного пучка и сравнимы с амплитудами, которые используются для создания отклоняющего поля. При пролете пучка по оси устройства, на всех электродах наводятся волны одинаковой амплитуды, что приводит к вычитанию полей. Чем выше аксиальная симметрия устройства, тем в большей области происходит компенсация полей. В конструкциях, в которых для достижения высокой однородности отклоняющего поля используются электроды сложной формы [2], возникает сильная неоднородность наведенных полей. Наше устройство имеет высокую степень аксиальной симметрии, поэтому наведенные поля компенсированы во всей области пролета электронного пучка. Из-за этого взаимодействие электронного пучка и стоячей волны происходит в основном на фронте импульса пучка, когда возбуждение кикера нарастает и становится очень малым в стационарном режиме, где энергия взаимодействия соответствует потерям циркулирующих волн. Распределение наведенных электрического и магнитного полей в стационарном режиме показано на рис. 4. Если электронный пучок смещен относительно оси устройства, то на электродах наводится косинусное распределение амплитуд, что приводит к появлению однородного дипольного поля, которое не искажает, а только смещает электронный пучок.

Рис. 4. Распределение наведенных электрического (а) и магнитного (б) полей.

Неоднородные наведенные поля могут наводиться при возникновении на линиях кикера стоячих волн разной амплитуды, которые могут образовываться за счет отражений на скачках волнового сопротивления линий. Для измерения коэффициента отражения один разъем линии кикера подключался к векторному анализатору электрических цепей, а другой

– к согласованной нагрузке. Для оценки влияния точности изготовления измерения проводились для каждого разъема. Графики коэффициентов отражения представлены на рис. 5.

Рис. 5. Измеренные коэффициенты отражения от линий кикера, подключенных к согласованной нагрузке.

На графиках видны выраженные максимумы и минимумы, следовательно, основные отражения происходят на вводах кикера, которые представляют собой многоэлектродный коаксиальный переход, проходной изолятор и разъем. Максимумы графиков соответствуют частотам, на которых фазы отраженных волн от обоих вводов линии совпадают, что приводит к сложению амплитуд отраженных волн от каждого ввода. Из графиков можно определить, что отражение от отдельного ввода не превышает 3% по отношению амплитуд падающей и отраженной волн в полосе частот до 700 МГц.

2.3. Система питания

В системе питания используются твердотельные генераторы с дрейфовым диодом с резким восстановлением [5]. Принципиальная схема подключения одной линии отклоняющего устройства к генератору показана на рис. 6. Параметры генераторов для системы питания представлены в табл. 2.

Рис. 6. Принципиальная схема подключения формирующей линии (ФЛ) генератора к кикеру

Импульсы с восьми генераторов должны быть синхронизованы друг с другом. Для этого импульсы тока с каждого генератора совмещались с минимальной разницей во времени посредством изменения задержек включения генераторов, задаваемых системой управления ускорителя. Измерение импульсов проводилось с помощью шунтов, установленных на выходе генераторов. Система управления ускорителем позволяет изменять задержки включения устройствами с шагом 2 нс. В результате удалось совместить выходные импульсы генераторов во времени с наибольшей разницей 1.5 нс. На рис. 7 показаны импульсы напряжения с шунтов четырех генераторов. Длительность переднего фронта для совмещенных импульсов составила 6.5 нс. Коэффициент пересчета напряжения с измерительного выхода шунта в напряжение на нагрузке 50 Ом, подключаемой к силовому выходу шунта: $U_{\text{нагрузка}}/U_{\text{шунт}} = 800$.

Рис. 7. Снимок экрана осциллографа при измерении импульсов напряжения с шунтов четырех генераторов.

2.4. Измерение наведенных сигналов

Для проведения испытаний кикера с электронным пучком устройство было установлено в тракт ускорителя ЛИУ 20 [6]. Расположение кикера в канале транспортировки показано на рис. 8.

Рис. 8. Отклоняющая система в канале ускорителя.

Наведенные электронным пучком сигналы на линиях кикера измерялись при отключенных генераторах, длина измерительного кабеля от шунта до осциллографа составляла 30 м. Измерительное оборудование описано в [7]. На рис. 9 показаны измеренные сигналы. На рис. 9а наблюдаются симметричные разнополярные сигналы, что соответствует теории формирования сигналов на выводах кикера, изложенной в [8]. На рис. 9б виден ярко выраженный однополярный сигнал, что говорит о касании электронного пучка линии кикера. Возникающее при этом возбуждение быстро затухает и не влияет на прохождение основной части электронного пучка.

Рис. 9. Наведенные сигналы на линиях кикера.

2.5. Отклонение пучка

Электронный пучок с энергией 21 МэВ отклонялся кикером и далее обрезался ножом септум-магнита. Для экспериментального исследования эффектов, которые могут возникать при отклонении электронного пучка, регистрировались изображения пучка до и после отклонения, и измерялась зависимость тока и положения пучка с помощью датчика положения пучка. Изображения пучка представляют собой снимки излучения сапфировой пластины при прохождении через нее электронного пучка. Изображения регистрируются камерами СПУ-2 [9]. На рис. 10 показаны снимки пучка до и после отклонения. Заметным эффектом является отсутствие гало в изображении после отклонения. Это связано с тем, что вырезалась центральная часть электронного пучка. Вырезанный отрезок пучка имеет фронты с длительностью на порядок меньше, чем у исходного пучка, что приводит к значительному уменьшению гало.

Рис. 10. Изображения электронного пучка до (слева) и после (справа) отклонения.

Ток и смещение отрезка электронного пучка, вырезанного ударом кикера, показаны на рис. 11. Удар кикера вызывает отклонение части электронного пучка в горизонтальном направлении. Отклоненная часть отрезается от основной ножом септум-магнита. Передний фронт импульса тока длительностью 1.2 нс формируется при разрезании ножом септума. Передний фронт смещения центра электронного пучка имеет длительность 3.5 нс. Длительность этого фронта примерно равна половине времени нарастания отклоняющих полей в кикере, которое равно сумме длительности переднего фронта импульсов генераторов

(6.5 нс) и времени заполнения кикера (2 нс) за вычетом части пучка, теряемой на ноже септум-магнита. Длительность равномерной вершины импульса тока и смещения равна 30 нс, и соответствует длительности равномерной вершины импульсов генераторов за вычетом времени заполнения кикера. Спад импульсов тока и смещения имеет большую длительность, чем передний фронт, за счет большей длительности спада импульсов генераторов. Каких-либо искажений или возбуждений электронного пучка не обнаружено.

Рис. 11. Ток и смещение центра в вырезанном отрезке электронного пучка.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для комплекса импульсной рентгеновской томографии разработано отклоняющее устройство, позволяющее направлять сильноточный релятивистский электронный пучок в отдельные каналы транспортировки без внесения существенных искажений фазового объема. Созданное нами устройство имеет высокую степень аксиальной симметрии, вследствие этого наведенные поля имеют высокую однородность и малы в стационарном режиме при пролете электронного пучка по оси кикера. Высокая однородность отклоняющих полей обеспечивается косинусным распределением амплитуд бегущих волн. Отсутствие возбуждений обеспечено согласованием в рабочей полосе частот.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новости научного портала “Атомная энергия 2.0”. 25 марта 2022 г. <https://www.atomic-energy.ru/news/2022/03/25/123117>
2. *Barnes M.* Kicker systems.// Proceedings of the CAS–CERN Accelerator School: Beam Injection, Extraction and Transfer. 10–19 March 2017. Erice, Italy. CERN Yellow Reports: School Proceedings. 2018. V. 5. <https://doi.org/10.23730/CYRSP-2018-005.229>
3. *Анчуглов О.В., Шведов Д.А., Киселев В.А. и др.* // ПТЭ. 2022. №3. С. 100. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48621760>
4. *Milton S.* LANL Accelerators: History, capabilities, and Plans. LA-UR-19-31935. 27.11.2019.
5. *Efanov V.M, Kardo -Sysoev A.F., Larionov M.A., Tchashnikov I.G., Yarin P.M., Kriklenko A.V.* // 11th IEEE International Pulsed Power Conference. Baltimore. 1997. V. 21997. P. 985. <https://doi.org/10.1109/PPC.1997.674522>
6. *Ахметов А.Р., Крюков И.В., Никитин О.А. и др.* // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19. №4. С. 5. <https://doi.org/10.25205/2541-9447-2024-19-4-5-19>
7. *Бак П.А., Батраков А.М., Бехтенов Е.А. и др.* // ПТЭ. 2021. № 2. С.49. <https://doi.org/10.31857/S0032816221020014> .

8. *Goldberg D.* Dynamic Devices A Primer on Pickups and Kickers. Lawrence Berkeley National Laboratory, 1991. <https://escholarship.org/uc/item/4g52655x>
9. <https://nanoscan.su/catalog/active/spu2-x/>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис 1.** Слева – поперечный разрез кикера, справа – продольный.
- Рис. 2.** Распределение отклоняющих электрического (**а**) и магнитного (**б**) полей.
- Рис. 3.** Общий вид конструкции стенда для магнитных измерений: 1 – кикер, 2 – переход на разъем типа *N*; 3 и 5 – пластины, 4 – диск, 6 – измерительная пластина.
- Рис. 4.** Распределение наведенных электрического (**а**) и магнитного (**б**) полей.
- Рис. 5.** Измеренные коэффициенты отражения от линий кикера, подключенных к согласованной нагрузке.
- Рис. 6.** Принципиальная схема подключения формирующей линии (ФЛ) генератора к кикеру, ДДРВ – дрейфовый диод с резким восстановлением.
- Рис. 7.** Снимок экрана осциллографа при измерении импульсов напряжения с шунтов четырех генераторов. По оси абсцисс деление составляет 10 нс, по оси ординат – 2 В для осциллограмм 1 и 3, и 5 В для осциллограмм 2 и 4.
- Рис. 8.** Отклоняющая система в канале ускорителя.
- Рис. 9.** Наведенные сигналы на линиях кикера: **а** – пролет электронного пучка по центру кикера, **б** – задевание электрода на фронте электронного пучка.
- Рис. 10.** Изображения электронного пучка до (слева) и после (справа) отклонения. Диаметр смотрового окна составляет 100 мм.
- Рис. 11.** Ток и смещение центра в вырезанном отрезке электронного пучка.

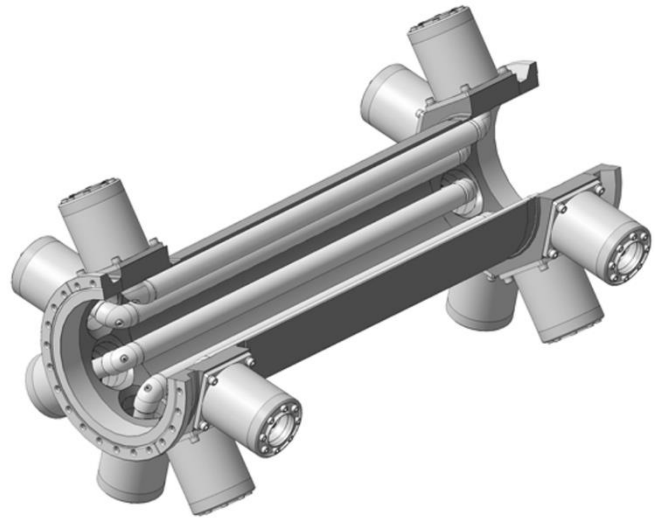
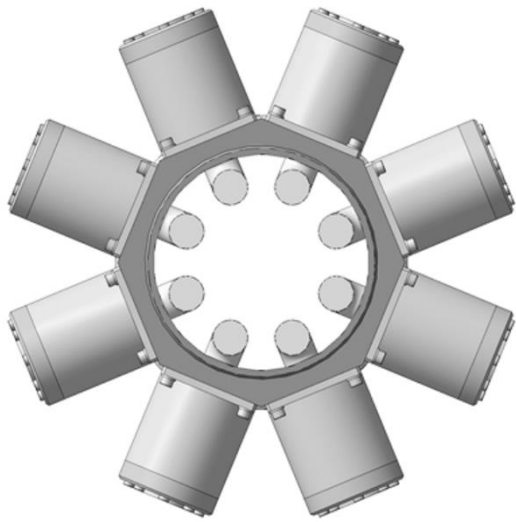


Рис 1.

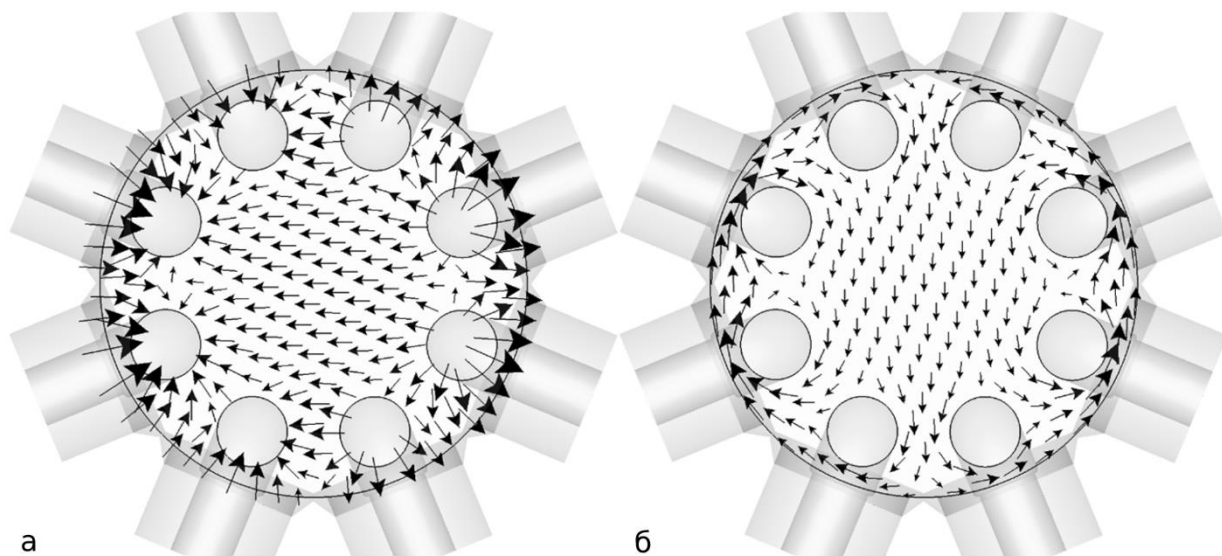


Рис. 2.

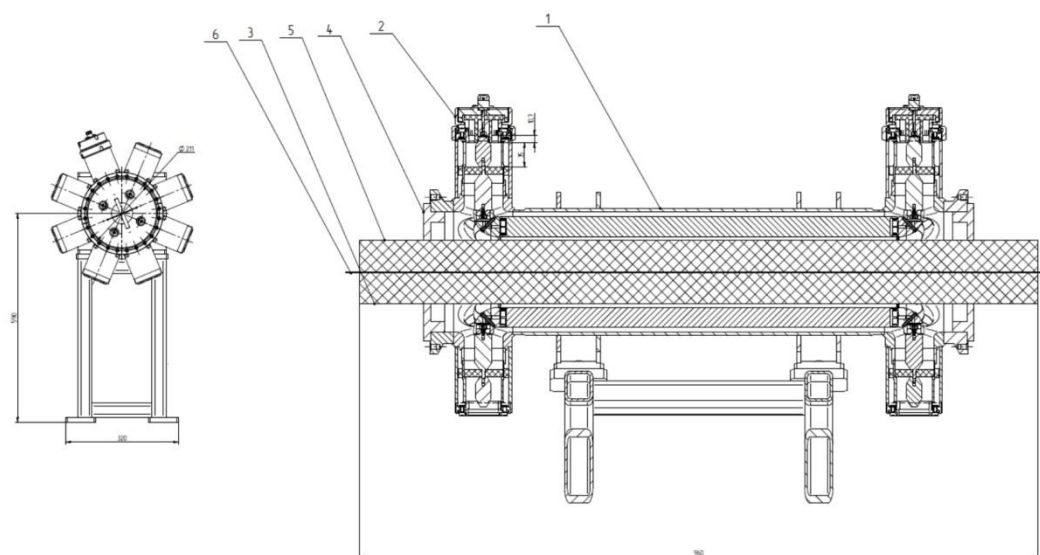


Рис. 3.

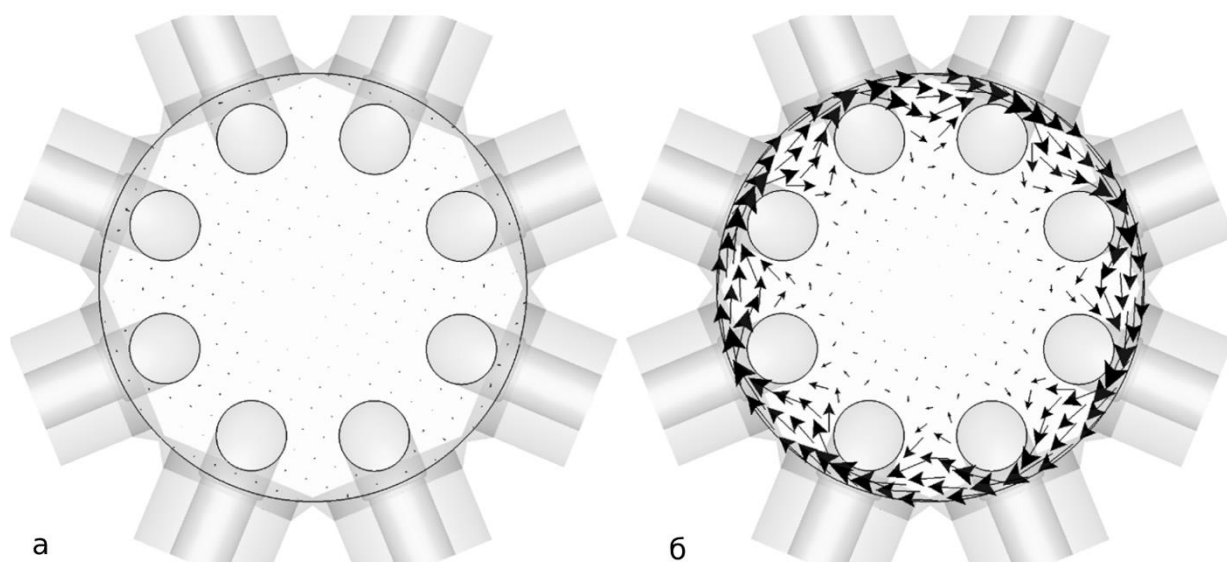


Рис. 4.

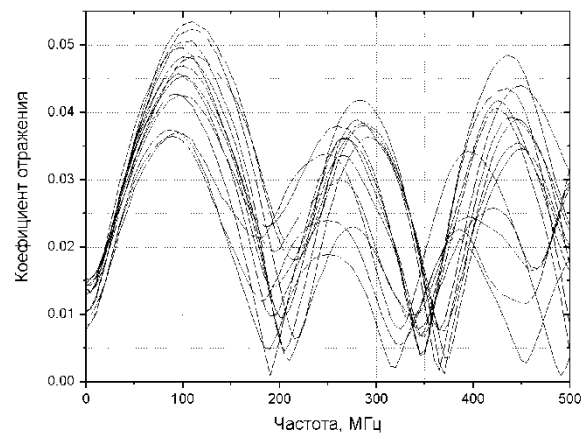


Рис.5.

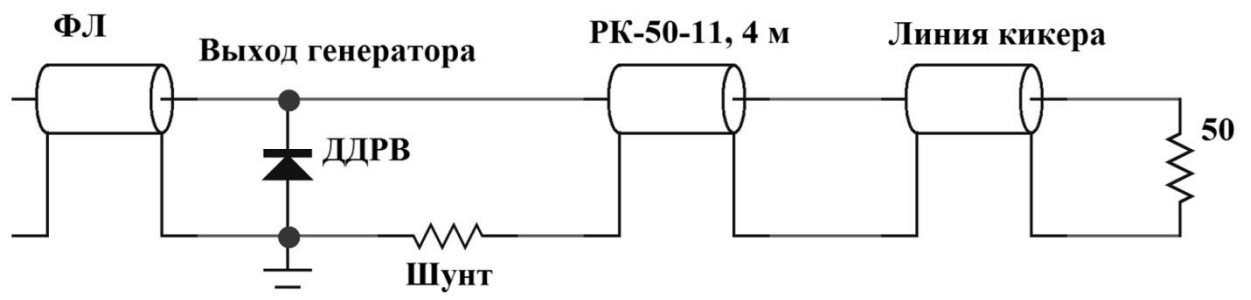


Рис. 6.

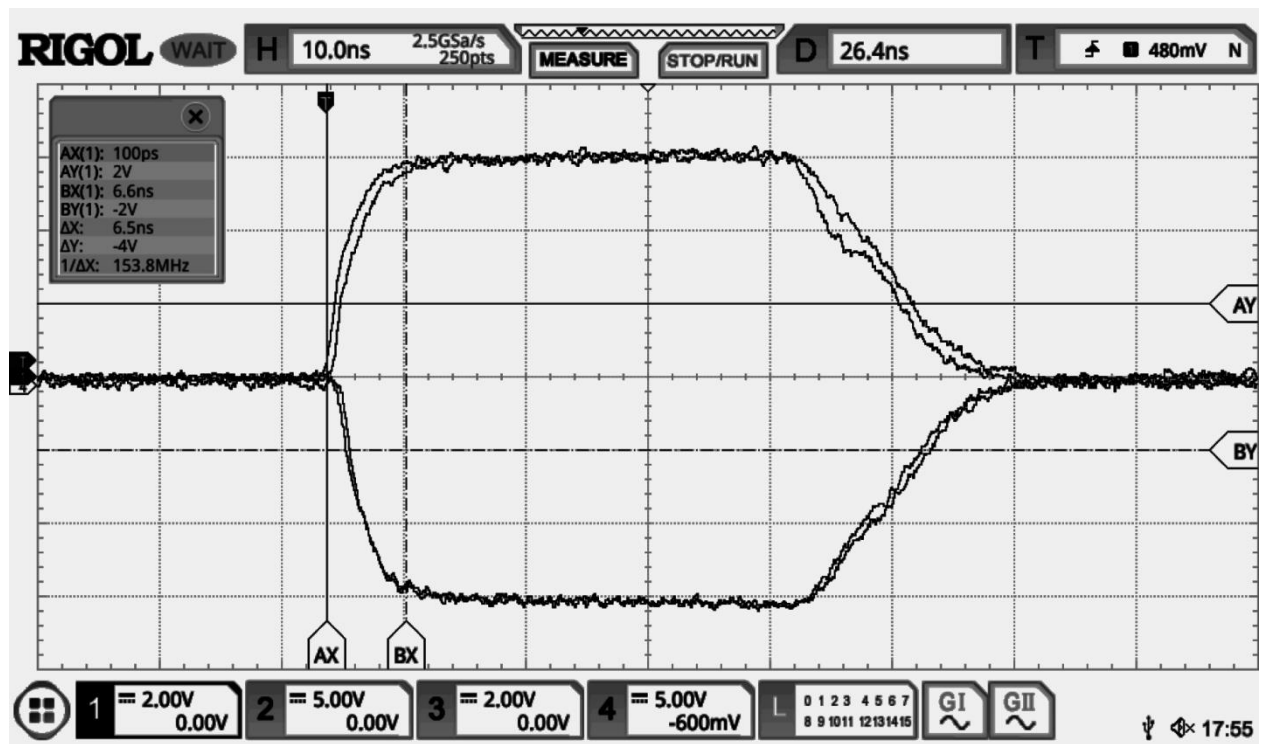


Рис. 7.

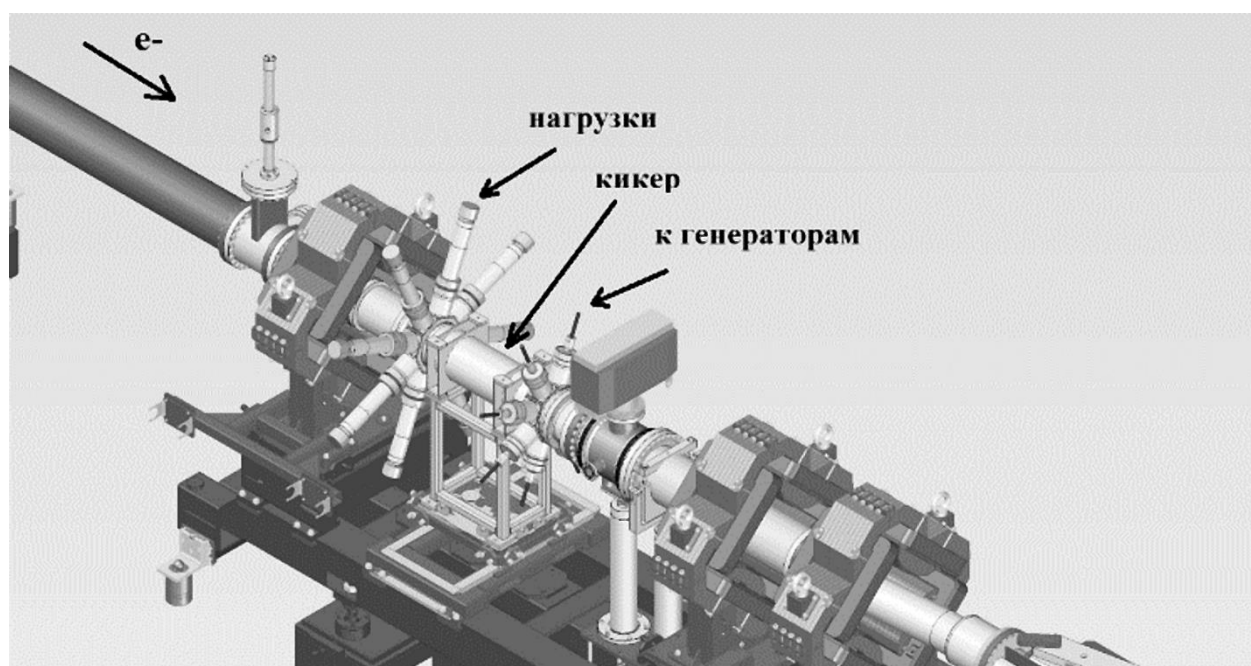


Рис. 8.

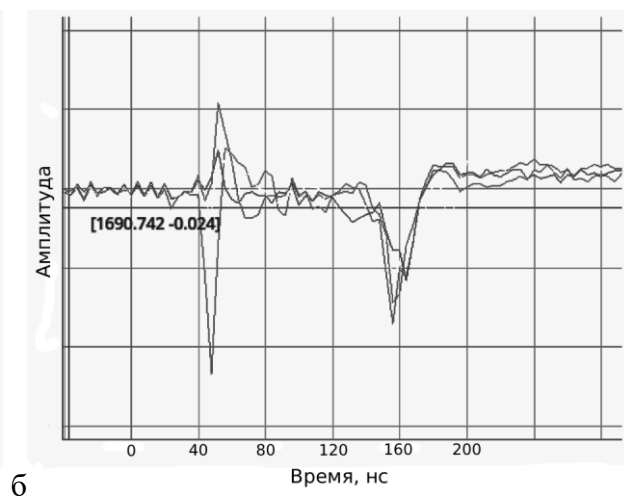
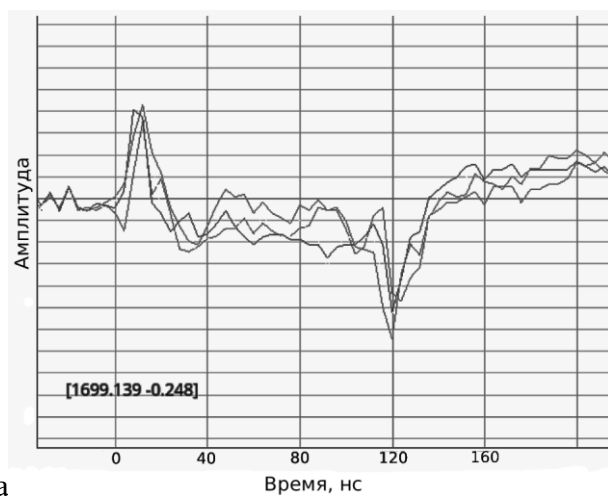


Рис. 9.

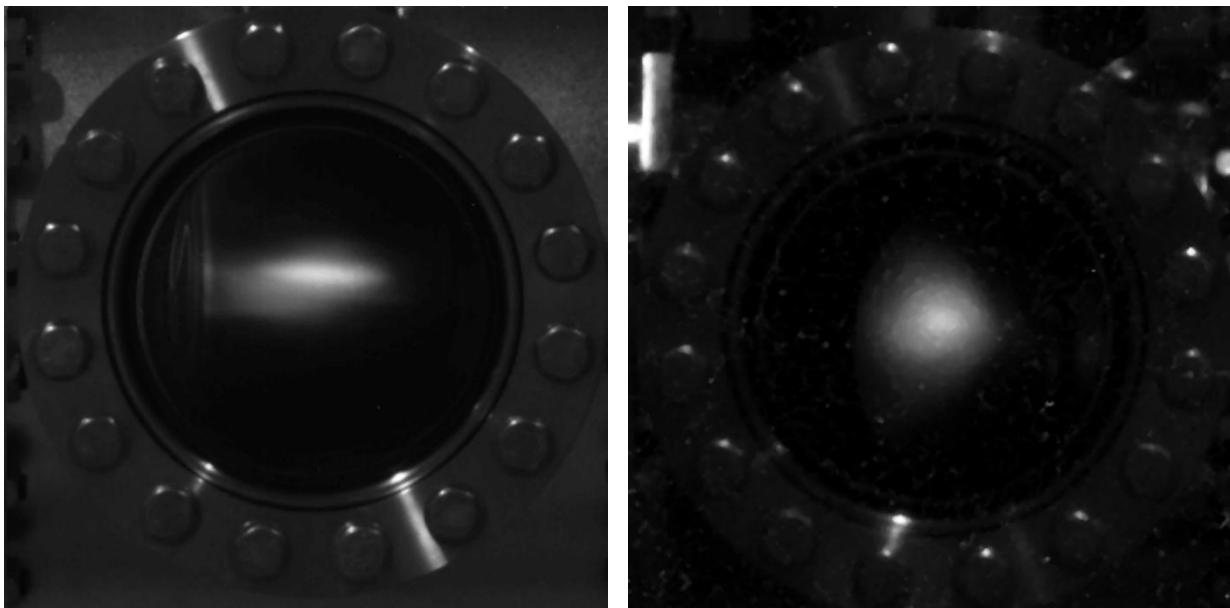


Рис. 10.

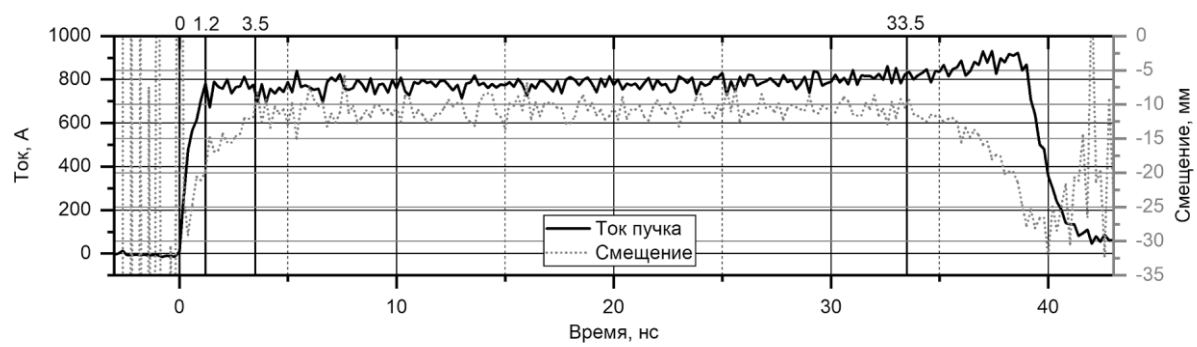


Рис. 11.