

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИМПУЛЬСНОГО СИЛЬНОТОЧНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ «ГАММА-1» С МАГНИТОИЗОЛИРОВАННОЙ ЛИНИЕЙ И ДИОДОМ

Д. О. Мансуров, М. А. Мoiseевских, С. Ю. Пучагин, К. В. Страбыкин

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

В ИЯРФ РФЯЦ-ВНИИЭФ завершены работы по созданию сильноточного импульсного ускорителя электронов «Гамма-1» [1] и проведена его экспериментальная отработка в режимах функционирования на вакуумную магнитоизолированную передающую линию (МИПЛ) и сильноточный вакуумный диод.

## Описание ускорителя «Гамма-1»

Система формирования высоковольтных импульсов ускорителя выполнена на базе двойной ступенчатой формирующей линии (ДСФЛ) [2] с первоначальным накоплением энергии в четырех линиях с водяной изоляцией приблизительно равной электрической длины  $\sim 50$  нс. С целью уменьшения общей длины ускорителя линии уложены последовательно по радиусу в пределах одного осевого размера ( $\sim 1,8$  м). Зарядка ДСФЛ до рабочего напряжения 1 МВ за время  $\sim 900$  нс производится от двух параллельно включенных генераторов импульсного напряжения ГИН-1000. Коммутация ДСФЛ осуществляется с помощью 36 управляемых газонаполненных искровых разрядников, расположенных симметрично по азимуту на корпусе формирующей системы.

Предымпульсный коммутатор является неотъемлемой частью формирующей системы. Он непосредственно участвует в формировании выходного импульса и включается через 260 нс после срабатывания многоканального коммутатора ДСФЛ. Предымпульсный коммутатор содержит 6 газонаполненных искровых разрядников тригatronного типа.

Передающая линия с водяной изоляцией (ВПЛ) служит для транспортировки импульса с выхода формирующей системы к ускорительной трубке. Конструктивное исполнение линии – коаксиальное, в качестве изоляции используется деионизованная вода. Волновое сопротивление линии согласовано с выходным импедансом формирующей системы и составляет 2,9 Ом. Диаметр внешнего электрода линии равен 1,62 м.

Ускорительная трубка представляет собой последовательность чередующихся, соединенных друг с другом диэлектрических и металлических градиентных колец.

Ускорительная трубка с магнитоизолированной передающей линией и сильноточным вакуумным диодом служит для формирования электронного пучка, энергия которого конвертируется в мишени в импульс тормозного излучения. Внешний вид модуля показан на рис. 1.

Исследования проводились с двумя МИПЛ длиной 1,5 и 2,5 м с диаметрами внешнего и внутреннего электродов 200 и 168 мм соответственно. В экспериментах зазор между внутренним и внешним электродом МИПЛ устанавливался 16 мм с точностью 0,1 мм. В качестве нагрузки ускорителя использовался сильноточный вакуумный диод.

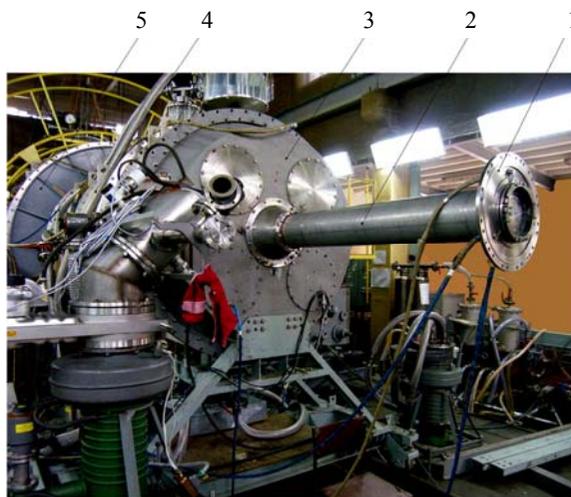


Рис. 1. Внешний вид импульсного сильноточного ускорителя электронов «Гамма-1» с магнитоизолированной передающей линией: 1 – сильноточный вакуумный диод; 2 – МИПЛ; 3 – ускорительная трубка; 4 – ВПЛ; 5 – ДСФЛ

Диаметр эмитирующей кромки катода составлял 168 мм. Катод изготовлен из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т. Эмитирующая кромка катода после каждого рабочего включения ускорителя обрабатывалась механически для восстановления геометрических размеров. Ускоряющий зазор между катодной кромкой и мишенью устанавливался 10 мм с точностью 0,1 мм. По экономическим соображениям в исследованиях по отработке режимов работы сильноточного диода применялись мишени из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т диаметром 180 мм

и толщиной 0,9 мм. С высокоточным вакуумным диодом соединялась вакуумируемая измерительная камера, в которой на расстоянии 20 см от мишени устанавливалась матрица с детекторами ПСТ (из стекла марки ИС-7) для получения углового распределения тормозного излучения (ТИ). В качестве фильтра электронов, прошедших через мишень, использовались диски полиэтилена толщиной 9 и 12 мм при зарядном напряжении ДСФЛ 0,9 и 1 МВ соответственно. Для защиты матрицы с детекторами от металлических осколков мишени были установлены дополнительно несколько слоев кевлара.

Рабочий вакуум  $(6-9) \cdot 10^{-3}$  Па ( $(5-7) \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст.) в диоде, МИПЛ и измерительной камере обеспечивался диффузионным паромасляным агрегатом АВП-250 и контролировался ионизационным датчиком ПМИ-10-2, установленным вблизи ускорительного зазора.

### Система регистрации

Измерение зарядного напряжения ДСФЛ осуществлялось с помощью емкостного делителя напряжения, конструкция которого показана на рис. 2.

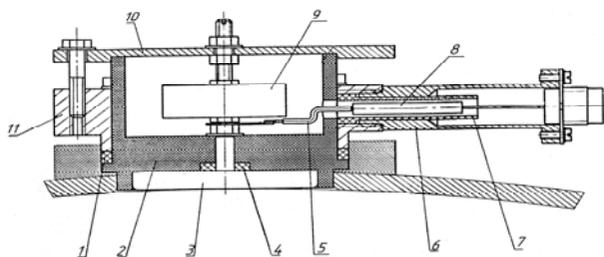


Рис. 2. Конструкция емкостного делителя напряжения: 1 – прокладка; 2 – изолятор; 3 – электрод; 4 – уплотнение; 5 – трубка; 6 – переходник; 7 – втулка; 8 – сопротивление; 9 – конденсатор; 10 – крышка; 11 – корпус

Электрод 3 вставляется в изолированное отверстие заземленного электрода ДСФЛ, тем самым, образуя емкость высоковольтного плеча между электродом делителя и высоковольтным электродом ли-

нии. Емкость низковольтного плеча представляет собой керамический конденсатор, с которого снимается сигнал через интегрирующее сопротивление.

Измерение напряжения в ВПЛ и ускорительной трубке проводится с помощью жидкостных омических делителей [3], конструкция которых показана на рис. 3.

В данном делителе реализованы две степени деления напряжения. Первая ступень на основе водного раствора соли КСl одной концентрации в обоих плечах делителя. Вторая ступень деления образована из резисторов ТВО-2.

Импульсы тока в ВПЛ регистрируются секционированными индукционными датчиками тока, которые размещались в специальном пазе прямоугольного сечения во внешнем электроде ВПЛ. Конструкция датчика показана на рис. 4.

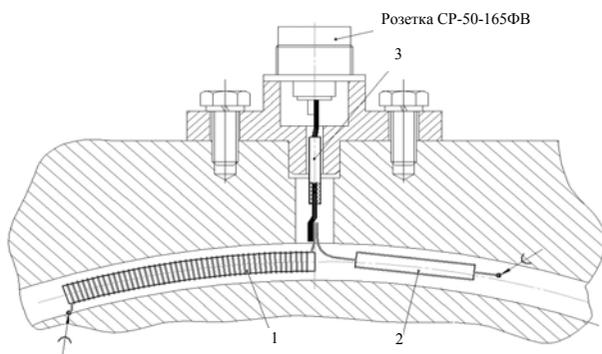


Рис. 4. Конструкция секционированного пояса Роговского: 1 – секционированный индукционный датчик тока; 2 – нагрузочное сопротивление; 3 – провод ПВ 1

Чувствительным элементом индукционного датчика тока является обмотка, в которой возбуждается Э. Д. С. переменным магнитным полем измеряемого тока. Формирование выходного сигнала происходит на резистивной нагрузке датчика.

Импульсы тока в ускорительной трубке контролировались флюксометрами, расположенными симметрично по окружности одного радиуса с суммированием сигналов с каждого флюксометра по схеме рис. 5 и регистрацией одного суммарного сигнала.

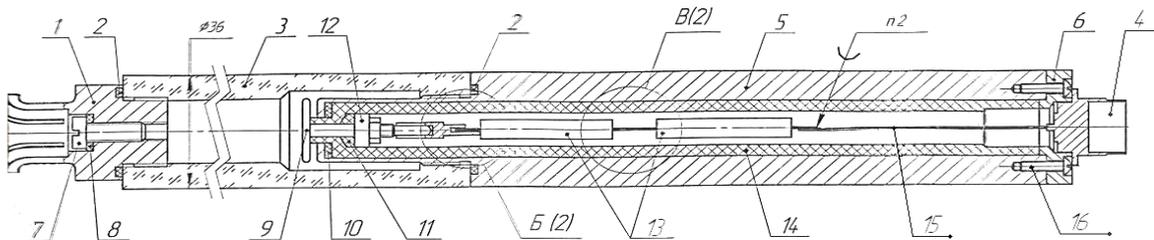


Рис. 3. Конструкция жидкостного омического делителя напряжения: 1 – цанга; 2 – прокладка; 3 – корпус; 4 – соединительный разъем СР – 50 – 165 ФВ; 5 – корпус; 6 – втулка; 7 – винт; 8 – прокладка; 9 – электрод; 10 – прокладка; 11 – прокладка; 12 – шайба; 13 – резисторы ТВО – 2; 14 – изолятор; 15 – проводник; 16 – винт М3

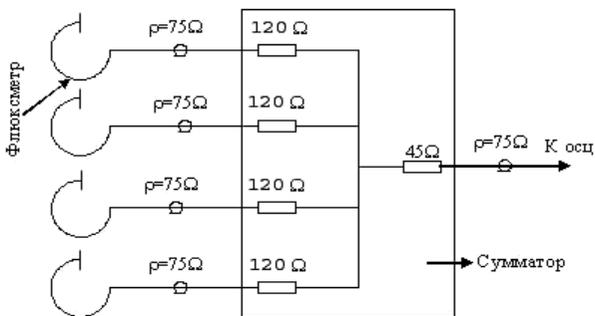


Рис. 5. Схема суммирования сигналов с флюксметров

Чувствительным элементом флюксметра является обмотка, в которой возбуждается э. д. с. переменным магнитным полем измеряемого тока.

На рис. 6 показано расположение датчиков на ускорителе, с помощью которых проводились измерения.

После каждого рабочего включения ускорителя вычислялись:

– запасенная в ДСФЛ электрическая энергия  $W_{ДСФЛ}$

$$W_{ДСФЛ} = C U_0^2 / 2, \text{ Дж}, \quad (1)$$

где  $C$  – электрическая емкость ДСФЛ, Ф;  $U_0$  – напряжение зарядки ДСФЛ, В;

– мощность  $P_{ВПЛ}$  и энергия  $W_{ВПЛ}$  электрического импульса в ВПЛ

$$P_{ВПЛ} = U_{ВПЛ} I_{ВПЛ}, \text{ Вт}, \quad (2)$$

$$W_{ВПЛ} = \int P_{ВПЛ} dt, \text{ Дж}, \quad (3)$$

где  $U_{ВПЛ}$  – напряжение с резистивного делителя напряжения в середине ВПЛ, В;  $I_{ВПЛ}$  – ток с секционированного индукционного датчика тока в ВПЛ, А;

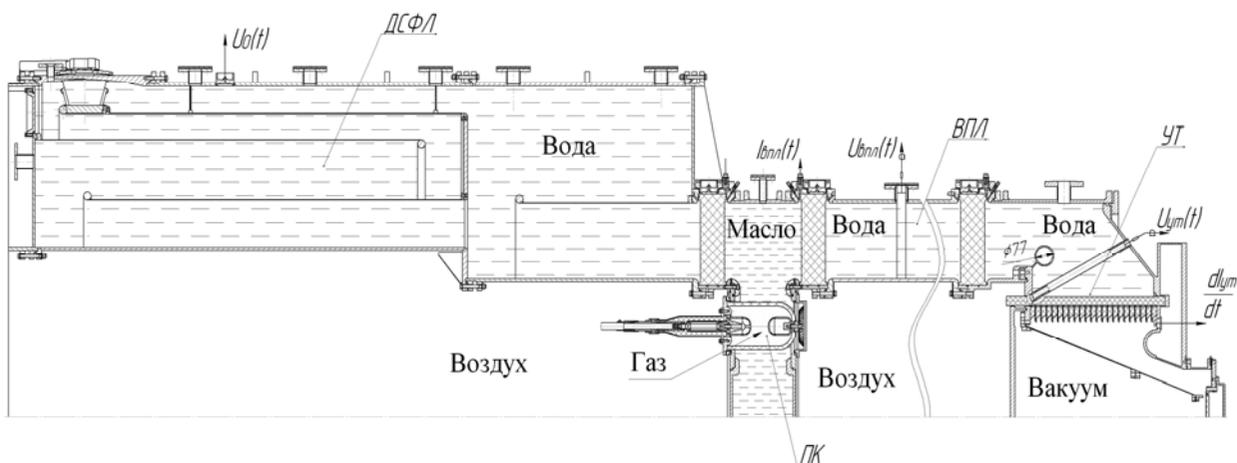


Рис. 6. Конструктивная схема высоковольтной части ускорителя «Гамма-1» и положение измерительных датчиков тока и напряжения

– напряжение на диоде  $U_D$  рассчитывалось по формуле

$$U_D = U_{УТ} - L dI_{УТ} / dt, \quad (4)$$

где  $L$  – расчетная индуктивность ускорительной трубки и магнитоизолированной линии;  $dI_{УТ} / dt$  – сигнал с дифференцирующего датчика тока расположенного в конце ускорительной трубки, А/с;  $I_{УТ}$  рассчитывался путем интегрирования сигнала  $dI_{УТ} / dt$  с дифференцирующего датчика тока.

– мощность  $P_{\Pi}$  и энергия  $W_{\Pi}$  электрического импульса в сильноточном вакуумном диоде

$$P_{\Pi} = U_D I_{УТ}, \text{ Вт}, \quad (5)$$

$$W_{\Pi} = \int P_{\Pi} dt, \text{ Дж}, \quad (6)$$

где  $U_D$  – напряжение на вакуумном сильноточном вакуумном диоде, В;  $I_{УТ}$  – ток на выходе ускорительной трубки, А;

– коэффициент передачи энергии электрического импульса от предимпульсного коммутатора к диоду

$$\text{КПД} = \left( \frac{W_{\Pi}}{W_{ВПЛ}} \right) \cdot 100 \%. \quad (7)$$

Мощность  $P_{\Pi}$  и энергию  $W_{\Pi}$  электрического импульса в сильноточном вакуумном диоде надо воспринимать как некоторые оценочные параметры, поскольку на данный момент измерение токов мегаамперного диапазона в конце МИПЛ вызывает некоторые трудности, связанные с процессом замагничивания МИПЛ и неоднородности формирования электронного пучка.

## Экспериментальные исследования на ускорителе «Гамма-1» и полученные результаты

В таблице представлены обработанные экспериментальные данные в трех режимах работы: I – без МИПЛ; II – с МИПЛ длиной 1,5 м; III – с МИПЛ длиной 2,5 м.

Таблица

Передача электрического импульса по ускорителю при зарядном напряжении формирующей системы 1 МВ

Наименование параметра	Значение		
	I	II	III
$W_{\text{ДСФЛ}}$ , кДж	120	120	120
$W_{\text{ВПЛ}}$ , кДж/ $P_{\text{ВПЛ}}$ , ТВт	106/2,0	109/2,2	107/2,1
$W_{\text{П}}$ , кДж/ $P_{\text{П}}$ , ТВт	90/1,7	70/1,5	54/1,4
$U_{\text{д}}$ , МВ	1,9	1,7	1,7
Максимальная доза ТИ, кР	1,03	0,75	0,75
КПД, %	84	64	50

На первом этапе, на ускорителе «Гамма-1» проводилась серия экспериментов без МИПЛ, т. е. ускорительная трубка нагружалась на высокоточный вакуумный диод при зарядном напряжении ДСФЛ 0,9 и 1 МВ. На рис. 7 показаны зависимости мощности электрического импульса в середине ВПЛ и диоде без МИПЛ от времени при зарядном напряжении ДСФЛ 1 МВ.

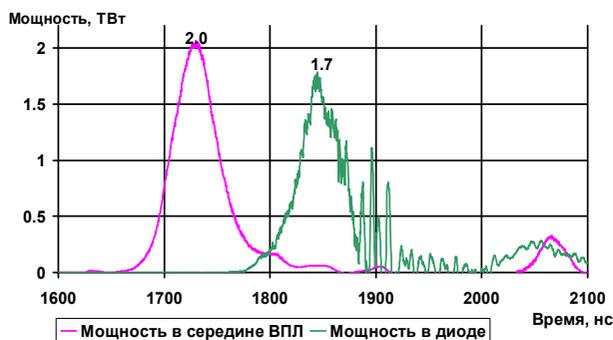


Рис. 7. Мощность электрического импульса по мере его прохождения по ускорителю «Гамма-1» при зарядном напряжении ДСФЛ 1 МВ

Из рис. 7 видно, что максимальное значение мощности электрического импульса в середине ВПЛ 2,0 ТВт больше, чем максимальное значение мощности в диоде 1,7 ТВт. Это непосредственно связано с потерями электрической энергии на индуктивности ускорительной трубки.

На рис. 8 представлены результаты измерений методом дозиметрии ИКС экспозиционной дозы ТИ на расстоянии 20 см от мишени, при зарядном напряжении ДСФЛ 1 МВ. Черными точками указаны

места расположения детекторов ПСТ. Желтым цветом показана область, в которой экспозиционная доза отличается не более чем на 15 % от максимальной. Красным цветом показана область, в которой экспозиционная доза отличается не более чем на 30 % от максимальной.

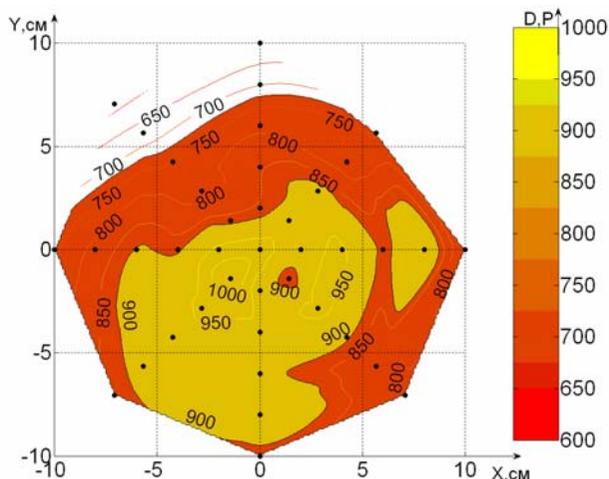


Рис. 8. Распределение экспозиционной дозы ТИ на расстоянии 20 см от мишени без МИПЛ при зарядном напряжении ДСФЛ 1 МВ

Из рис. 8 видно, что на площади матрицы с детекторами ПСТ (из стекла марки ИС-7) максимальное значение экспозиционной дозы ТИ составило 1030 Р.

На втором этапе, на ускорителе «Гамма-1» проводилась серия экспериментов с МИПЛ длиной 1,5 м и высокоточным вакуумным диодом. Исследования проводились при зарядных напряжениях ДСФЛ 0,9 и 1 МВ.

В таблице приведены полученные значения мощности электрического импульса в середине ВПЛ и диоде с МИПЛ длиной 1,5 м при зарядном напряжении ДСФЛ 1 МВ. Максимальное значение мощности электрического импульса в середине ВПЛ составило 2,2 ТВт, а максимальное значение мощности в диоде 1,5 ТВт. При зарядном напряжении 0,9 МВ, максимальное значение мощности электрического импульса в середине ВПЛ практически не изменились по сравнению с экспериментами без МИПЛ, а максимальное значение мощности и энергии в диоде несколько уменьшилось по сравнению с выходными характеристиками ускорителя без МИПЛ. При этом КПД снизился с ~80–85 % до ~65–70 %. После проведения серии экспериментов с МИПЛ длиной 1,5 м была произведена ее разборка, в результате осмотра которой не было обнаружено видимых следов пробоев, что свидетельствует о достоверности полученных значений мощности  $P_{\text{П}}$  и энергии  $W_{\text{П}}$  электрического импульса в высокоточном вакуумном диоде.

Далее эксперименты продолжались с вакуумной магнитоизолированной передающей линией длиной 2,5 м. В таблице приведены полученные значения мощности электрического импульса в середине ВПЛ и диоде при зарядном напряжении 1 МВ. Макси-

мальное значение мощности в диоде с МИПЛ длиной 2,5 м отличается от максимального значения мощности с МИПЛ длиной 1,5 м, поскольку в конце импульса произошел пробой в УТ. В импульсах с зарядным напряжением 0,9 МВ таких существенных отличий для максимальных значений мощности в диоде с разными МИПЛ не наблюдалось и КПД сохранялся на уровне 65–70 %. После проведения серии экспериментов с МИПЛ длиной 2,5 м была произведена ее разборка, в результате которой не было обнаружено видимых следов пробоев.

Всего в рамках этой работы было проведено 32 рабочих включения ускорителя «Гамма-1». По результатам проведенных включений можно сделать вывод, что при работе ускорителя без МИПЛ передается ~ 80–85 % энергии электрического импульса от предимпульсного коммутатора к диоду, с МИПЛ длиной 1,5 м и длиной 2,5 м ~ 65–70 % энергии. Основные потери энергии электрического импульса в режиме работы ускорителя с МИПЛ связаны, по-видимому, с замагничиванием МИПЛ.

### Заключение

На импульсном сильноточном ускорителе электронов «Гамма-1» проведены экспериментальные исследования по передаче энергии к диодной нагрузке по МИПЛ с «холодным» импедансом 10,4 Ом, длиной 1,5 и 2,5 м и диаметрами внутренних и внешних

электродов 168 и 200 мм. Экспериментально установлено, что выходные характеристики ускорителя, работающего с МИПЛ, незначительно снижаются по отношению к выходным характеристикам ускорителя работающего без МИПЛ. Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности использования исследованных МИПЛ для передачи по ним энергии к диодной нагрузке.

### Литература

1. Пунин В. Т., Завьялов Н. В., Басманов В. Ф. и др. Состояние работ по созданию ускорителя с энергией электронов ~ 2 МэВ, током пучка ~ 1 МА в импульсе длительностью ~ 60 нс // VIII Харитоновские чтения по проблемам физики высоких плотностей энергии. 11–24 марта 2006 года (сборник докладов). Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2006. С. 145–149.
2. Bossamykin V. S., Gordeev V. S., Pavlovskii A. I. et. al. Pulsed Power Electron Accelerators with the Forming Systems Based on Stepped Transmission Lines // 9-th International Conference on High-Power Particle Beams, BEAMS-92, Washington, DC. May 25–29, 1992. Vol. 1. P. 505–510.
3. Герасимов А. И. Делитель высоковольтного импульсного напряжения с жидкостными резисторами // Приборы и техника эксперимента. № 2, 1993. С. 96–100.