

ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ СЕРИИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОМЕТРИИ ОБРАТНЫЙ ПИНЧ

INTERMEDIATE RESULTS OF EXPERIMENTAL SERIES USING REVERSED PUNCH GEOMETRY

*П. Б. Репин, А. Г. Репьев, М. Ш. Ибрагимов, А. П. Орлов, В. П. Отмахов, Н. Г. Данченко,
В. С. Покровский, Д. С. Покровский, А. В. Шанин, К. С. Коняев, Г. И. Логунов, О. В. Коноплев
P. B. Repin, A. G. Repiev, M. Sh. Ibragimov, V. P. Otmakhov, N. G. Danchenko, V. S. Pokrovsky,
D. S. Pokrovsky, A. V. Shanin, K. S. Konyayev, G. I. Logunov, O. V. Konoplev*

Госкорпорация Росатом, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»
State Corporation Rosatom, RFNC-VNIIEF

Сообщается о результатах серии экспериментов по запитке многопроволочных цилиндрических лайнерных систем с использованием обратного пинча, как элемента формирующего токовый импульс в основном лайнере. Начальная конфигурация обратного пинча образована расположенным на оси системы потенциальным токопроводом и тонкими проволочками, равномерно распределенными вдоль цилиндрической образующей, диаметр которой превышает диаметр потенциального токопровода. Основной лайнер выполнен в классической конфигурации и схемотехнически подключен параллельно обратному пинчу через индуктивность подводящей линии. Импульс тока амплитудой 2 МА с временем нарастания 1 мкс подавался сначала на обратный пинч, а затем, по мере роста его импеданса, обеспечивалась запитка и основного лайнера.

В результате серии экспериментов подобраны режимы, оптимальные для разгона токоплазменной оболочки в обратном пинче. Зарегистрировано рентгеновское излучение как при размыкании обратного пинча, так и при схлопывании основного лайнера. Определены направления для дальнейших исследований.

This paper presents results of an experimental series on multi-wire cylindrical arrays powering using a reversed pinch. The reversed pinch forms the current pulse. Initial configuration of the reversed pinch is formed by a potential current conductor and thin wires. The current conductor is located on the axis of the system; thin wires are evenly distributed along the cylindrical generatrix, diameter of which exceeds the diameter of potential current conductor. The main liner is made in classical configuration and connected in parallel to the reversed pinch through an inductance of a feeding line. The current pulse of 2 MA and rise time of 1 μ s was supplied to the reversed pinch; as far as the impedance grows, the main liner was powered.

In the result of experimental series, we selected optimum regimes for current-plasma shell in the reversed pinch. X-ray radiation was recorded both at the reversed pinch opening, and at the main liner implosion. We determined the directions of further research.

В настоящее время широко исследуется импlosionия цилиндрических сборок из микропроводников под действием тока в геометрии Z-пинча [1]. В фазе конечного сжатия вещества проволочной сборки на ее оси формируется плотная высокотемпературная плазма и генерируется мощный импульс мягкого рентгеновского излучения (МРИ). При достаточной плотности мощности импульса МРИ на границе первичного хольраума его можно использовать для постановки физических экспериментов по изучению свойств веществ и процессов при высокой плотности энергии. Мощность генерируемого МРИ за пределами

хольраума определяется несколькими факторами, основными из которых является температура плазмы пинча и размеры хольраума. Выбор размеров первичного хольраума зависит, в основном, от параметров источника питания пинча. Сокращение времени нарастания токового импульса дает возможность уменьшить радиальные размеры лайнера и хольраума в целом, и, тем самым, при прочих равных условиях, повысить плотность мощности МРИ за его пределами. Таким образом, поиск способов сокращения времени нарастания токового импульса в лайнерных нагрузках является весьма актуальным для решения задачи повы-

шения энергетических параметров МРИ за пределами первичного хольраума. Особую актуальность имеет задача сокращения времени нарастания токового импульса для драйверов на основе взрывомагнитных генераторов, имеющих время нарастания более нескольких сотен наносекунд [1].

Одним из перспективных направлений такого поиска являются исследования в конфигурации нагрузочного узла, дополненной так называемым обратным пинчем [2]. По сути обратный пинч представляет собой тот же самый многопроволочный лайнер, что и в классическом варианте, но только с измененным взаимным расположением лайнера и обратного токопровода. То есть на оси системы располагается жесткий токопровод, окруженный цилиндрическим многопроволочным лайнером. При протекании тока по такой элек-

тродной системе проволочки лайнера взрываются, и образующаяся плазма под действием силы Ампера разгоняется к периферии и выбрасывается за пределы электродов. В идеальном случае проводимость обратного пинча нарушается, и ток может быть переброшен на полезную нагрузку, причем время нарастания тока в нагрузке будет меньше, чем без использования обратного пинча.

Результаты исследования, представленные в данном докладе, получены на электрофизической установке, обеспечивающей в нагрузке ток амплитудой ~2 МА при времени нарастания ~1 мкс [3]. Конструкция нагрузочного узла с обратным пинчем представлена на рис. 1.

На штатные токоподводящие части 1 установки монтируются высоковольтные 2, 3 и заземленный 5 электроды. Проволочки обратного лайнера 10 висят на крючках 12 под весом грузиков 13,

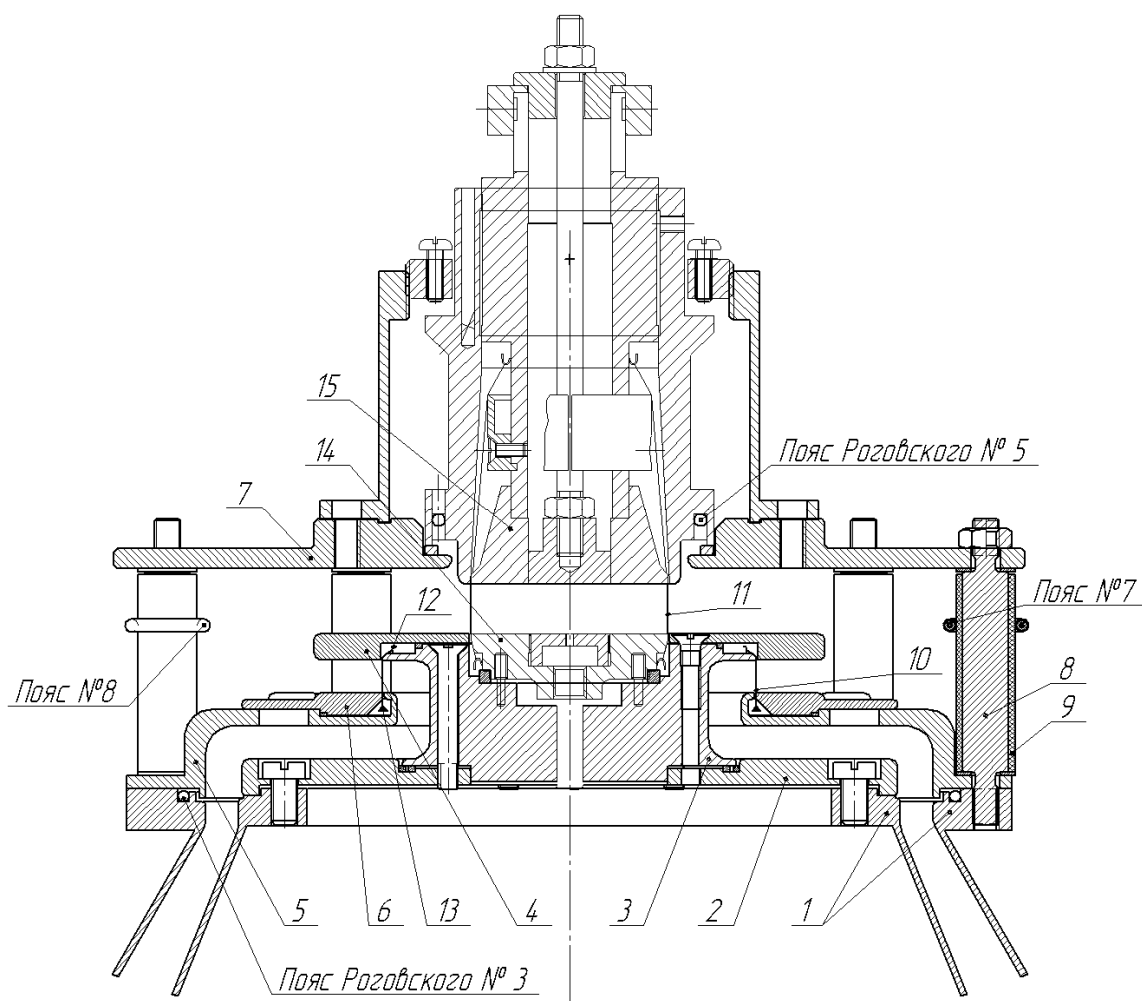


Рис. 1. Конструкция нагрузочного узла установки с обратным пинчем: 1 – электроды передающей линии установки, 2–4 – элементы потенциального электрода обратного пинча, 5, 6 – элементы «заземленного» электрода обратного пинча, 7–9 – элементы обратного токопровода основного лайнера, 10, 11 – проволочки лайнера обратного и основного пинча, 12, 13 – крючки и грузики для установки проволочек обратного пинча, 14–15 – потенциальный и заземленный электроды основного лайнера

обеспечивающих натяжение проволочек и их электрический контакт с заземленной разгонной частью 6. Потенциальный 4 и заземленный 6 электроды обеспечивают контакт движущейся токоплазменной оболочки с токопроводами 3 и 5 соответственно. Радиальная длина разгонной части обратного пинча (от места установки проволочек до внешнего края электрода 4) – 20 мм. Потенциальный электрод 14 основного лайнера закреплен на потенциальном электроде обратного пинча 3. В качестве обратного токопровода для основного лайнера используются шпильки 8 с цилиндрическими изоляторами 9 и диск 7, к которому крепится верхний по рисунку электрод 15 лайнера. В качестве основной нагрузки в экспериментах использовался лайнер диаметром 60 мм, высотой 15 мм из 45 вольфрамовых проволочек диаметром 8 мкм. В предварительных экспериментах вместо основного лайнера устанавливалась индуктивная нагрузка (≈ 15 нГн). Фотография нагрузочного узла с установленными лайнерами – основным и обратным, представлена на рис. 2.

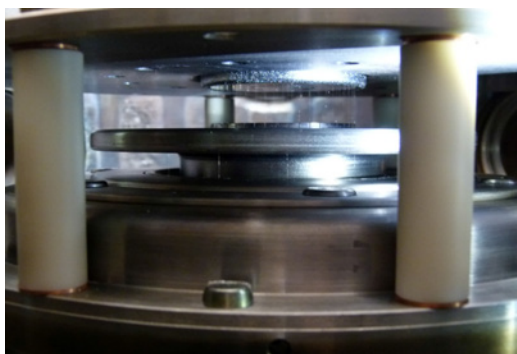


Рис. 2. Фотография нагрузочного узла установки с лайнерами

Как видно из рис. 1 электрически лайнер обратного пинча и основной лайнер включены в цепь параллельно. Из-за разности в индуктивности подключения лайнеров к передающей линии установки при ее срабатывании ток протекает сначала, в основном, по лайнеру и плазме обратного лайнера, а после нарушения его проводимости ток перебрасывается на основной лайнер. Однако, и на стадии работы обратного пинча некоторая часть тока протекает и по основному лайнеру, что по замыслу должно обеспечивать его предварительный электровзрыв.

Для диагностики работы устройства в экспериментах использовались индукционные токовые датчики. Полный ток в цепи обратного и основного лайнеров регистрировался поясом Роговского № 3 (см. рис. 1). Ток основного пинча измерялся

поясом Роговского № 5 а также двумя поясами № 7–8, размещенными на диаметрально противоположных шпильках 8 обратного токопровода. Необходимость в последних двух поясах возникла после первых экспериментов, когда было высказано, впоследствии подтвердившееся, предположение о затекании в щель пояса Роговского № 5 плазмы, образующейся при электровзрыве основного лайнера в процессе работы обратного пинча. Также в экспериментах регистрировались параметры импульсов МРИ при помощи вакуумных рентгеновских диодов (ВРД), полупроводниковых фотодиодов (ППД) и сцинтилляционных детекторов (СД). Интегральная по спектру и времени энергия импульса МРИ измерялась болометрами различной конструкции. Для исследования пространственных параметров области генерации МРИ лайнерной плазмы, ее изображение в рентгеновских лучах формировалось камерой-обскурой (КО) и регистрировалось на фотопленку. Следует отметить, что при внедрении в нагрузочный узел установки обратного пинча, основной лайнер значительно сместился вверх относительно оси диагностических каналов, что привело к тому, что излучение, образующееся при его схлопывании попадает в область видимости не всех датчиков. Такое допущение было сделано, поскольку детальное исследование сигналов МРИ не было целью данной работы.

Было проведено 3 серии экспериментов, в которых варьировались количество и диаметр проволочек обратного лайнера при неизменных параметрах основной нагрузки (см. табл. 1).

Таблица 1

Параметры обратного лайнера

Количество проволочек, шт	Диаметр проволочек, мкм	Масса лайнера, мкг
30	4	73
15	7,3	121
15	8	146

На рис. 3 приведены осциллограммы полного тока и токов в нагрузке, иллюстрирующие работоспособность устройства как размыкателя. Видно, что на начальной стадии работы устройства общий ток делится в соответствии с индуктивностями контуров основного и обратного лайнеров. Через основной лайнер протекает лишь малая часть общего тока. При срабатывании обратного пинча как размыкателя ток перебрасывается в основной лайнер. Увеличение массы обратного лайнера ведет к увеличению времени нахождения плазмы, обра-

зующейся при его электровзрыве, в межэлектродном зазоре и, как следствие, к более позднему времени срабатывания устройства (см. рис. 3, 4). Анализ осциллограмм показывает, что в нагрузку передается заметная (до двух третей) часть полного тока при этом время нарастания сокращается с 1,270 мкс (для полного тока) до 0,4 мкс (для тока в нагрузке) то есть в 3 раза.

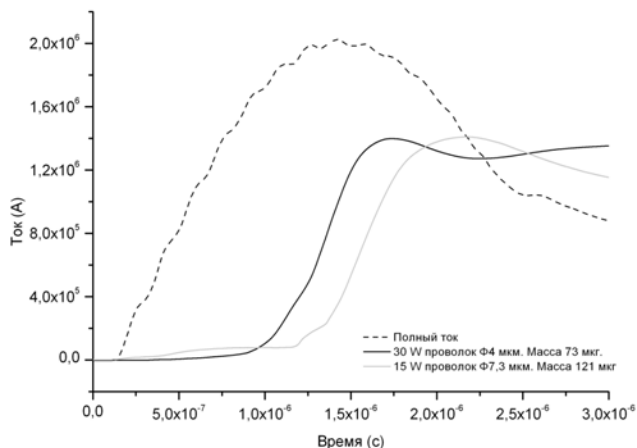


Рис. 3. Осциллограммы полного тока и токов в нагрузке в экспериментах с разными размыкателями

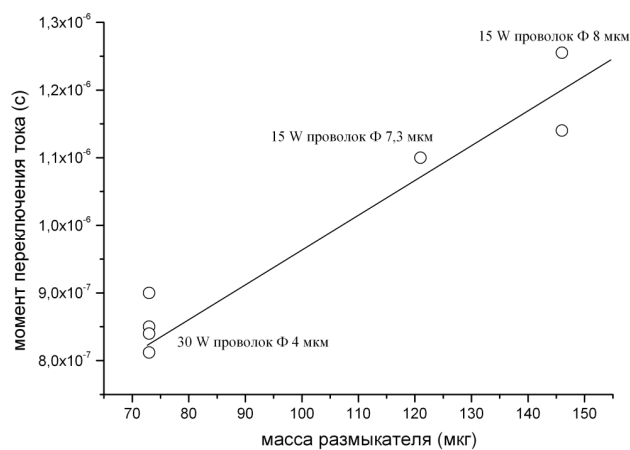


Рис. 4. Зависимость времени размыкания обратного пинча от массы лайнера

В то же время, не во всех экспериментах зарегистрированы сигналы, аналогичные представленным на рис. 3. В ряде экспериментов размыкание обратного пинча сопровождалось повторным пробоем, что приводило к затягиванию переброса тока в основной лайнер. Осциллограммы полного тока, тока в нагрузке и его производной в одном из таких экспериментов представлены на рисунке 5. Видно, что на начальном участке фронта импульса тока в нагрузке регистрируется резкий рост тока, который практически сразу прекращается. После резкого падения производной в течение некоторо-

го времени dI_5/dt остается практически постоянной, а затем опять возрастает, обеспечивая достижение тока в основном лайнере $\sim 1,4$ МА, или две трети от полного тока. Такое поведение производной тока можно трактовать следующим образом. После размыкания обратного пинча в его межэлектродном пространстве формируется повторный пробой. Плазма повторного пробоя, образуя разрядный контур, импеданс которого ниже, чем у контура основного лайнера, перехватывает большую часть общего тока, и начинает разгоняться к периферии устройства. После вылета этой плазмы из межэлектродного промежутка обратного пинча ток опять перебрасывается в основной лайнер.

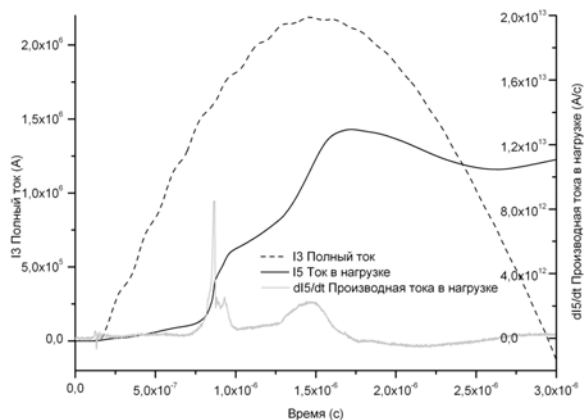


Рис. 5. Осциллограммы полного тока (I_3), тока в нагрузке (I_5) и производная тока в нагрузке (dI_5/dt)

Интересно отметить, что спад тока в нагрузке после достижения максимума, по-видимому, обусловлен ростом индуктивности контура в процессе имплозии лайнера, по завершении которого регистрируется импульс рентгеновского излучения (см. рис. 6). Эти осциллограммы получены СД детектором, фильтрованным серебром, и ВРД, фильтрованным алюминием. В зону видимости обоих детекторов попадает и основной и частично обратный пинч. На обеих осциллограммах видны небольшие пики во время резкого роста тока в нагрузке ($\approx 1,3$ мкс). Это излучение, зарегистрированное датчиками из области обратного пинча. В момент времени вблизи максимума тока ($\approx 2,1$ мкс) обоими датчиками регистрируется излучение, соответствующее пинчеванию основного лайнера. Наличие сигналов с рентгеновских детекторов (пики на $\approx 1,3$ мкс) подтверждает функционирование обратного пинча как размыкателя тока, при срабатывании которого развивается высокое напряжение и обеспечивается ускорение электронов, тормозное излучение которых и регистрируют детекторы в указанный момент времени.

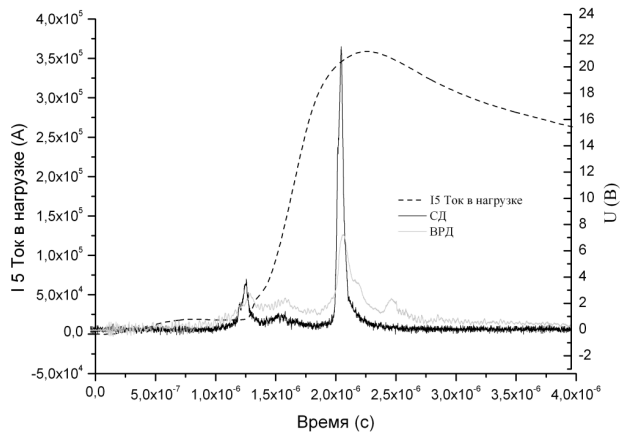


Рис. 6. Осциллограммы тока в нагрузке и сигналов с детекторов МРИ

Следует отметить, что представленная на рис. 6 осциллограмма тока в нагрузке получена с помощью пояса № 5. Обращает на себя внимание амплитуда тока на этой осциллограмме, составляющая лишь 350 кА. При этом время имплозии лайнера (время от начала импульса тока до начала импульса МРИ) не превышает $\sim 0,8$ мкс, в то время как типичное время имплозии лайнеров при амплитуде тока 2 МА в экспериментах без использования обратного пинча достигает $\sim 1,2$ мкс [3]. Это несоответствие связано с частичным заполнением щели пояса Роговского № 5 плазмой, образуя

щейся при электровзрыве основного лайнера в процессе работы обратного пинча, что занижает его амплитудные параметры. При этом временные характеристики практически совпадают с показаниями поясов № 7–8, установленных на шпильках обратного токопровода.

Таким образом, проведенное исследование продемонстрировало перспективность конфигурации обратный пинч для сокращения времени нарастания токового импульса в лайнерных нагрузках в 2 раза и целесообразность продолжения исследований в этом направлении.

Список литературы

1. В. Д. Селемир, В. А. Демидов, П. Б. Репин и др., Физика плазмы 2007, том 33, № 5, с 424–434.
2. A. J. Harvey-Thompson, S. V. Lebedev, G. Burdiak et al. Suppression of the Ablation Phase in Wire Array Z Pinches Using a Tailored Current Prepulse. Physical Review Letters 106, 205002 (2011).
3. М. Ш. Ибрагимов. Экспериментальное исследование влияния слаботокового предимпульса тока на имплозию многопроволочных лайнеров. Сборник докладов XVIII Нижегородской сессии молодых ученых (естественные и математические науки), Нижний Новгород: НИУ РАНХиГС, 2013, стр. 32–35.