

РЕЗУЛЬТАТЫ Z-ПИНЧ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ВЗРЫВАЕМЫМИ ПРОВОЛОЧНЫМИ ЛАЙНЕРАМИ С ВАРЬИРУЕМЫМ МЕЖПРОВОЛОЧНЫМ РАССТОЯНИЕМ

RESULTS OF Z-PINCH EXPERIMENTS WITH PRELIMINARY EXPLODED WIRE LINERS AND VARIED DISTANCE BETWEEN WIRES

*П. Б. Репин, А. Г. Репьев, М. Ш. Ибрагимов, 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 РФЯЦ-ВНИИЭФ
State Corporation Rosatom, RFNC-VNIIEF

Сообщается о проведении серии экспериментов по запитке цилиндрических многопроволочных лайнеров в геометрии Z-пинча импульсами тока амплитудой 2 МА с временем нарастания 1 мкс с использованием предимпульса тока амплитудой ~10 кА. В отличие от проведенной ранее серии экспериментов использовались лайнеры с уменьшенным вдвое до 2,3 мм межпроволочным расстоянием.

Проведен сравнительный анализ результатов экспериментов с использованием предимпульса и без него при одинаковом межпроволочном расстоянии в обоих экспериментах, и экспериментов с увеличенным межпроволочным расстоянием с использованием предимпульса и без него.

This paper describes an experimental series on cylindrical multi-wire liners powering in Z-pinch geometry. The liners were powered by the current of 2 MA amplitude, rise time of 1 μ s using current pre-pulse of ~10 kA amplitude. As opposite to the previous experimental series, we used the liners with twice decreased (up to 2.3 mm) distance between the wires. This paper also presents comparative analysis of the results of experiments with pre-pulse and without it. These experiments were carried out with the liners that had usual and increased distance between the wires in the array.

В настоящее время широко исследуется имплозия цилиндрическихборок 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). Одна из проблем, с которой сталкиваются исследователи Z-пинчей, это магнитогидродинамическая неустойчивость сходящейся к оси плазмы, которая, в конечном счете, приводит к уширению импульса РИ. Подавление этой неустойчивости должно увеличить мощность МРИ. Для уменьшения гидродинамических возмущений было предложено использовать короткий (~10нс) импульс тока, предваряющий ток основного генератора [2]. Идея авторов [2] заключалась в том, чтобы основной драйвер установки нагружался не на принципиально дискретную структуру проволочного лайнера, а на более однородное в азиму-

тальном направлении плазменное образование, сформированное в процессе предварительного электровзрыва лайнера.

Работы в этом направлении ведутся в нескольких лабораториях [3–7]. В большинстве экспериментов использовался предимпульс тока малой (менее 1 мкс) длительности амплитудой более нескольких сот ампер в пересчете на одну проволочку. Эти исследования дали отрицательный результат, то есть предимпульс тока ухудшал условия генерации импульса МРИ. Обратный вывод сделан исследователями на установке Sphinx, изучавшими влияние предимпульса тока небольшой амплитуды и мультимикросекундной длительности [7]. При использовании предимпульса зарегистрировано увеличение мощности генерируемого импульса МРИ в шесть раз и улучшение однородности пинча в осевом направлении.

Результаты работы [7] возобновили интерес к исследованиям в этой области, в том числе и в

РФЯЦ-ВНИИЭФ, где используются установки на основе взрывомагнитных генераторов с токовыми импульсами, временные параметры которых близки к характеристикам установки Sphinx (время нарастания тока ~ 1 мкс).

Результаты, представленные в данном докладе, получены на электрофизической установке, обеспечивающей в нагрузке ток амплитудой ~ 2 МА при времени нарастания ~ 1 мкс. Более подробное описание установки представлено в [8]. В качестве нагрузки используются цилиндрические проволочные лайнеры $\varnothing 60\text{--}70$ мм высотой 15...31 мм, состоящие из 45–96 вольфрамовых проволочек $\varnothing 6\text{--}9$ мкм. Предымпульс тока начинается на 1 мкс раньше основного токового импульса и к его началу имеет амплитуду ≈ 12 кА.

В экспериментах регистрировались параметры импульсов МРИ при помощи вакуумных рентгеновских диодов (ВРД), полупроводниковых фотодиодов (ППД) и сцинтилляционных детекторов (СД). Использование методик, основанных на разных физических принципах, повышает достоверность измерений. 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.

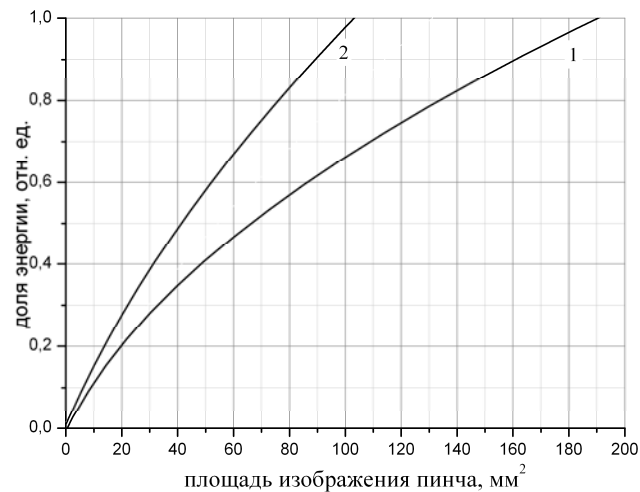


Рис. 1. Распределения излучаемой энергии по площади изображений пинча, усредненные по данным экспериментов без предымпульса (1) и по экспериментам с предымпульсом (2)

В 2011...2013 гг. в результате экспериментальных и расчетно-теоретических исследований установлено, что предварительный электровзрыв

многопроволочного лайнера токовым импульсом, начинающимся за 1 мкс до основного тока и достигающим 12 кА к его началу, не влияет на энергосодержание и форму импульса мягкого рентгеновского излучения, генерируемого Z-пинчем, но обеспечивает формирование более компактного плазменного образования в конечной стадии имплозии лайнера – диаметральный размер излучающей в рентгеновском диапазоне плазмы пинча уменьшается в 1,5...2 раза, по сравнению с экспериментами без предымпульса (см. рис. 1) [8].

Многопроволочные лайнеры, используемые в этих экспериментах имели межпроволочное расстояние, превышающее 4 мм, при этом точность установки проволочек на цилиндрической образующей электродов лайнера не контролировалась. В тоже время, известно [9], что величина межпроволочного расстояния сильно влияет на параметры генерируемого МРИ. На установках с временем нарастания ~ 100 нс оптимальная по мощности МРИ величина межпроволочного расстояния заметно меньше, чем у используемых в наших экспериментах лайнерах. В связи с этим, исследования влияния на генерацию МРИ предвзрыва лайнеров с уменьшенным межпроволочным расстоянием представляет интерес.

Результаты исследования, представленного в настоящем докладе, проведены в той же постановке, что подробно описана в [8], то есть предвзрыв лайнеров обеспечивался токовым импульсом, начинающимся за 1 мкс до основного тока и достигающим 12 кА к его началу. Амплитуда основного токового импульса составляла ~ 2 МА, время нарастания 1 мкс. Отличие в постановке экспериментов от [8] заключалось только в конструкции лайнеров. Во всех экспериментах использовались лайнеры, в которых натяжение проволочек обеспечивалось консольными пружинами. Диаметр лайнеров 70 мм, высота 15 мм, количество проволочек 96 шт. Межпроволочное расстояние составляло 2,3 мм, точность установки проволочек на цилиндрической образующей не хуже 30 мкм. Конструкция лайнера, установленного в нагрузочный узел установки представлена на рис. 2. Основные параметры лайнеров сведены в табл. 1. В таблице также представлены типовые параметры лайнера, используемого в серии экспериментов, описанной в [8].

Проведена серия из 6 экспериментов. Четыре из них с предымпульсом, два других – контрольные без предымпульса. Зарегистрированные в экспериментах осциллограммы токовых импульсов в лайнерах представлены на рис. 3. Видно, что амплитуда тока во всех импульсах примерно оди-

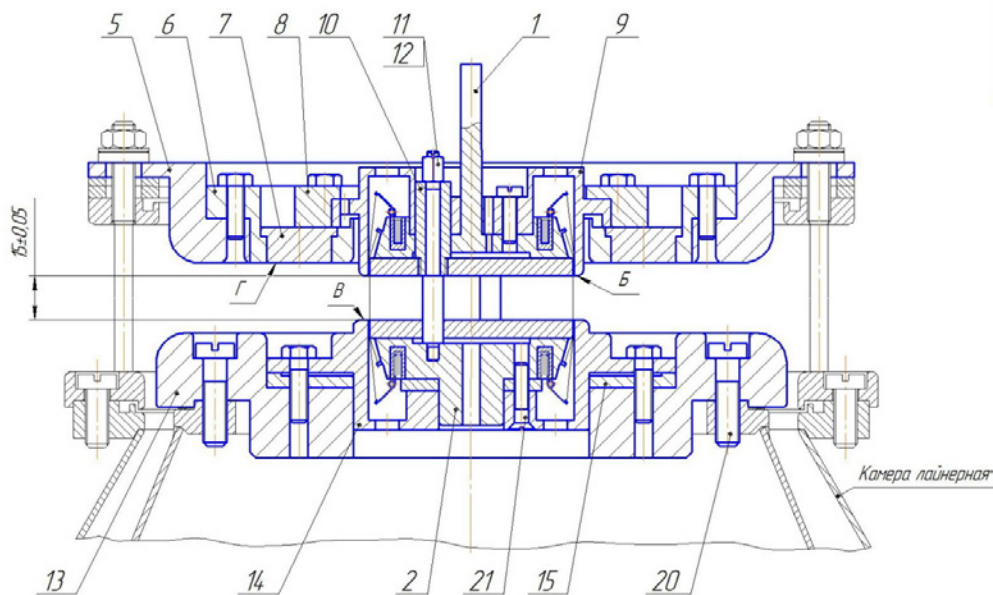


Рис. 2. Лайнер в нагрузочном узле установки: 1, 2 – электроды лайнера с блоками консольных пружин и сменными торцевыми накладками, 5, 13 – электроды установки, 6–9,14 – установочные элементы, 10–12 – технологическая оснастка, 20, 21 – крепежные элементы

наковая и составляет $\sim 2,1$ МА. Время нарастания ~ 1 мкс. Наблюдаются некоторые отличия в форме импульсов после достижения максимума. Эти отличия связаны с массой лайнеров (см. табл. 1). Импульсия токовой оболочки, сопровождающаяся увеличением индуктивности нагрузки и, соответственно, снижением тока, у более легких лайнеров начинается раньше.

Эти отличия проявляются и на сигналах, зарегистрированных рентгеновскими датчиками, представленными на рис. 4. Чем раньше начинается импlosion, тем раньше регистрируется импульс МРИ.

Как видно на рис. 4 осциллограммы, полученные с рентгеновских датчиков, достаточно сильно меняются от импульса к импульсу, как по форме, так и по амплитуде. Аналогичная ситуация

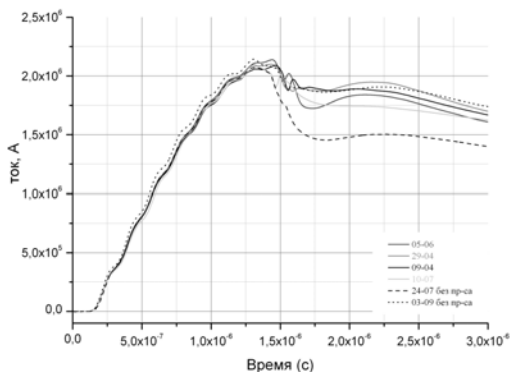


Рис. 3. Осциллограммы токовых импульсов

наблюдалась и в экспериментах, описанных в [8]. Вариации рентгеновских сигналов при неизмен-

Таблица 1

Параметры лайнеров в сериях экспериментов по исследованию влияния предимпульса

Дата	Высота лайнера, мм	Диаметр лайнера, мм	Количество проволочек, шт	Диаметр проволочки, мкм	Погонная масса лайнера, мг/см	Предимпульс
23.01.2013	31	60	45	10	0,68	1 мкс
09.04.2015	15	70	96	7,27	0,77	1 мкс
29.04.2015	15	70	96	7,27	0,77	1 мкс
05.06.2015	15	70	96	7,27	0,77	1 мкс
10.07.2015	15	70	96	6,47	0,61	1 мкс
24.07.2015	15	70	96	6,61	0,64	нет

ных начальных условиях экспериментов могут быть обусловлены двумя основными причинами. Во-первых, это не достаточно хорошая воспроизводимость процессов, приводящая к изменению от импульса к импульсу параметров лайнерной плазмы в конечной фазе имплозии. Во-вторых, как показал анализ обскурограмм, пространственное положение пинча в радиальном направлении меняется от импульса к импульсу. При неизменном положении рентгеновских детекторов это приведет к тому, что в зону их видимости будут попа-

дать неодинаковые области излучающей плазмы.

Тем не менее, несмотря на вариации сигналов рентгеновских детекторов, даже при беглом рассмотрении рисунка 4 видно, что в экспериментах с предимпульсом амплитуды сигналов, как правило, выше, чем в контрольных экспериментах без использования предимпульса. Наличие достаточно большого числа детекторов, имеющих различные зоны видимости позволяет провести усреднение амплитуд сигналов и получить количественное выражение влияния предимпульса на мощность

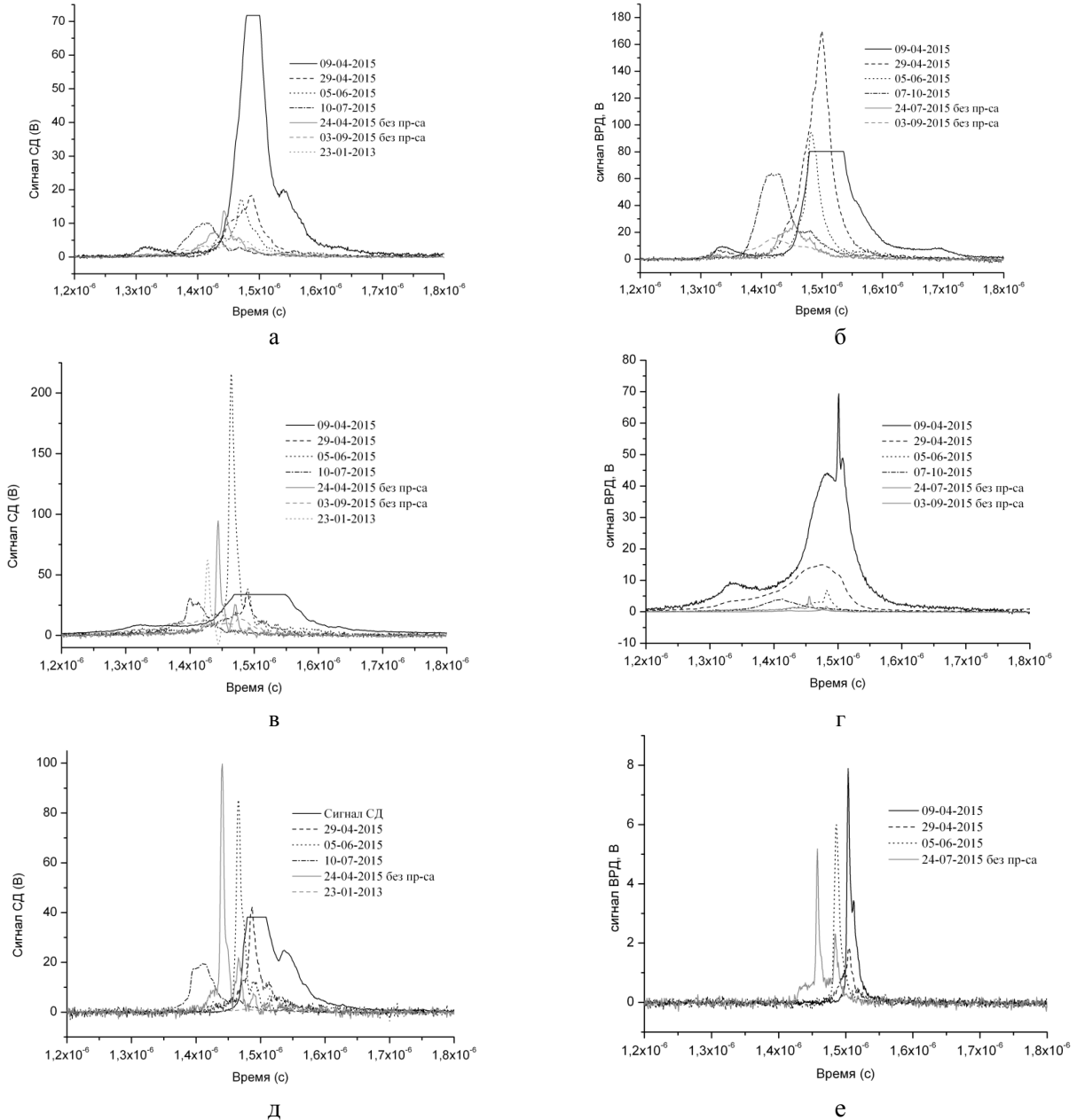


Рис. 4. Осциллограммы сигналов, зарегистрированных датчиками СД и ВРД, фильтрованными серебром (а, б), алюминием (в, г) и медью (д, е): а, в, д – сигналы СД; б, г, е – сигналы ВРД

генерируемого МРИ в виде отношения средних значений амплитуд сигналов детекторов в экспериментах с предымпульсом (Упред) к средним значениям амплитуд сигналов детекторов в контрольных экспериментах (U). Результаты такого усреднения сведены в табл. 2. В последней строке табл. 2 приведены значения Упред/U, полученные без учета эксперимента, проведенного 09.04.2015 г., в котором зарегистрированы аномально высокие амплитуды рентгеновских сигналов. При этом достоверность высокой мощности МРИ в данном эксперименте не вызывает сомнений, поскольку высокие амплитуды сигналов показали как сцинтилляционные детекторы, так и ВРД. Причина такого выпадения этого эксперимента из общей картины непонятна, что и послужило причиной рассмотрения результатов серии экспериментов, в том числе и без данных, полученных 09.04.2015 г.

Таблица 2
Отношения средних значений амплитуд сигналов различных детекторов в экспериментах с предымпульсом и без него

детектор	СД			ВРД		
	Ag	Al	Cu	Ag	Al	Cu
Упред/U	4,2	2,7	0,75	6,7	8,2	2,3
Упред/U*	2	2	0,5	5	3	0,76

* – без учета результатов эксперимента 09.04.2015 г.

Как видно из табл. 2 даже без учета результатов эксперимента 09.04.2015 г. средняя амплитуда сигналов СД и ВРД, фильтрованных серебром и алюминием, в экспериментах с предымпульсом как минимум в два раза превышает амплитуду сигналов тех же детекторов в контрольных экспериментах. В отношении данных с детекторов, фильтрованных медью следует отметить, что представленные в табл. 2 значения Упред/U имеют низкую достоверность, поскольку по техническим причинам сигналы с медных детекторов получены только в одном из контрольных экспериментов, и как раз в том (24.07.2015 г.), где и другие детекторы показали более высокие амплитуды сигналов, чем во втором контрольном эксперименте. При этом амплитуды сигналов с рентгеновских датчиков

(см. штриховые линии рис. 4), полученные в экспериментах с лайнерами с увеличенным межпроволочным расстоянием с использованием предымпульса тока, в разы меньше аналогичных сигналов в экспериментах с лайнерами с уменьшенным межпроволочным расстоянием.

Таким образом, в проведенной серии экспериментов установлено, что предварительный электровзрыв лайнера с уменьшенным до 2,3 мм межпроволочным расстоянием обеспечивает рост мощности генерируемого при имплозии лайнерной плазмы рентгеновского излучения. Для выяснения механизма влияния предвзрыва лайнера на параметры МРИ необходимы дополнительные исследования.

Список литературы

1. В. Д. Селемир, В. А. Демидов, П. Б. Репин и др., Физика плазмы 2007, том 33, № 5, с 424–434.
2. R. Spielman, C. Deeney, J. H. Hammer, Bull. Am. Phys. Soc. 43, 1909 (1998).
3. F. N. Beg, S. V. Lebedev, S. N. Bland, J. P. Chittenden, Phys. Plasmas 9, 375 (2002).
4. G. S. Sarkisov, S. E. Rosenthal, K. W. Struve, Phys. Plasmas 14, 052704 (2007).
5. G. S. Sarkisov, S. E. Rosenthal, K. W. Struve, Phys. Plasmas 14, 112701 (2007).
6. П. Б. Репин, В. Д. Селемир, В. Т. Селявский. Физика плазмы 2009, том 35, № 1.
7. H. Calamy, F. Lassalle, A. Loyen, F. Zucchini, J. P. Chittenden, F. Hamann, P. Maury, A. Georges, J. P. Bedoch, and A. Morel, Phys. Plasmas 15, 012701 (2008).
8. М. Ш. Ибрагимов. Экспериментальное исследование влияния слаботокового предымпульса тока на имплозию многопроволочных лайнеров. Сборник докладов XVIII Нижегородской сессии молодых ученых (естественные и математические науки), Нижний Новгород: НИУ РАНХиГС, 2013, стр. 32–35.
9. M. G. Mazarakis, C. E. Deeney, W. A. Stygar et al. Wire number dependence of the implosion dynamics, stagnation, and radiation output of tungsten wire arrays at Z driver. Physics of Plasmas 18, 112706 (2011).