

РАСЧЕТ ИМПЛОЗИИ МНОГОПРОВОЛОЧНОГО ЛАЙНЕРА В ЭКСПЕРИМЕНТЕ С ВЗРЫВОМАГНИТНЫМ ГЕНЕРАТОРОМ В РЕЖИМЕ С УВЕЛИЧЕННОЙ МАССОЙ НАГРУЗКИ

CALCULATION OF MULTI-WIRE ARRAY IMPLOSION IN EXPERIMENT WITH MAGNETO-CUMULATIVE GENERATOR WITH OVERMASSSED LOAD

П. Б. Репин, А. Г. Репьев, А. П. Орлов, Б. Г. Репин, В. С. Покровский

P. B. Repin, A. G. Rep'ev, A. P. Orlov, B. G. Repin, V. S. Pokrovskiy

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

Russian Federal Nuclear Center –All-Russia Scientific Research Institute of Experimental Physics

В работе продемонстрированы экспериментально зарегистрированные особенности имплозии многопроволочного лайнера с массой много большей оптимальной при запитке импульсом тока от дискового взрывомагнитного генератора.

This paper presents the experimentally revealed peculiarities of the multi-wire array implosion. Used Z-pinch load with a mass more than optimal is powered by a current pulse from a disk magneto-cumulative generator.

Введение

В РФЯЦ-ВНИИЭФ на протяжении ряда лет проводятся исследования по генерации мощных потоков мягкого рентгеновского излучения (МРИ) при схлопывании цилиндрических многопроволочных лайнерных систем, запитываемых от взрывных источников тока. В экспериментах с дисковыми взрывомагнитными генераторами реализован рекордный для России ток запитки многопроволочного лайнера ~ 14 МА и генерация импульса МРИ с энергией ~ 650 кДж и длительностью ~ 70 нс [1].

В то же время в связи с однократным характером работы испытываемых изделий, для разработки устройств следующего поколения, обеспечивающих более высокие амплитуды тока в лайнерных нагрузках и, соответственно, более высокие мощности генерируемого МРИ, необходимы исходные данные, обладающие высокой достоверностью. Для получения таких данных требуются дополнительные эксперименты, направленные на оптимизацию режимов генерации МРИ и подтверждение достигнутых параметров устройств.

В данной работе представлены результаты одного из недавних экспериментов по отработке формирователей тока на основе нового поколения дисковых взрывомагнитных генераторов и взрывных размыкателей тока, работающих на имплоди-

рующие лайнерные нагрузки. К интересным особенностям относится то, что несмотря на существенно сниженную, по сравнению с расчетной, токовую запитку нагрузки, в эксперименте зарегистрирован импульс МРИ с характерной длительностью на полувысоте ~ 10 нс и энергией в несколько сотен килоджоулей.

Для трактовки полученных результатов привлекалась двумерная магнитогидродинамическая (МГД) методика FLUX-rz, разработанная в РФЯЦ-ВНИИЭФ. Расчетно-физическая модель включает перенос излучения в многогрупповом диффузионном приближении [2], а процесс абляции вещества с проволочек лайнерной нагрузки под действием протекаемого тока описывается в рамках феноменологической модели затянутого плазмообразования [3].

Экспериментальные данные

Нагрузкой являлась однокаскадная многопроволочная сборка, состоящая из 680 вольфрамовых проволочек диаметром $d = 11$ мкм и длиной $l = 1,5$ см (полная масса $M_{total} = 18,76$ мг), равномерно расположенных на цилиндрической образующей радиуса $R = 3$ см. Расстояние между проволочками составляет 0,28 мм. Места крепления проволочек на электродах разнесены на 4 уровня. Внутренний диаметр обратного токопровода цен-

трального узла 8 см. На обратном токопроводе имеется 10 диагностических пазов и 4 отверстия для расширения диагностической зоны видимости. Схематический вид взрывомагнитного генератора с лайнерной камерой и диагностическими каналами, а также фото нагрузки приведены на рис. 1. Для регистрации параметров лайнерной плазмы использован большой набор диагностических методик. Датчики методик размещались в радиальных диагностических каналах № 1–10 и осевом канале № 11. Спектрально-временные измерения параметров мягкого рентгеновского излучения были реализованы с использованием сцинтилляционных детекторов (СД), вакуумных рентгеновских диодов (ВРД) с плоскими электродами и полупроводниковых детекторов (ППД).

Интегральная по времени и спектру энергия МРИ измерялась болометрами [4]. Для регистрации пространственно-временной картины имплозии пинча в оптическом и рентгеновском диапазонах применялись электронно-оптические камеры (ЭОП) и (РЭОП) с передачей регистрируемых сигналов по оптоволоконным каналам связи. Регистрировалось также интегральное по пространству свечение лайнерной плазмы в оптическом диапазоне спектра с помощью фотодиодов. Схема расположения диагностических каналов показана на рис. 2.

Измерения производной тока в диапазоне 10^9-10^{13} А/с обеспечивались индукционными датчиками расположенными в различных сечениях формирователя тока и нагрузке.

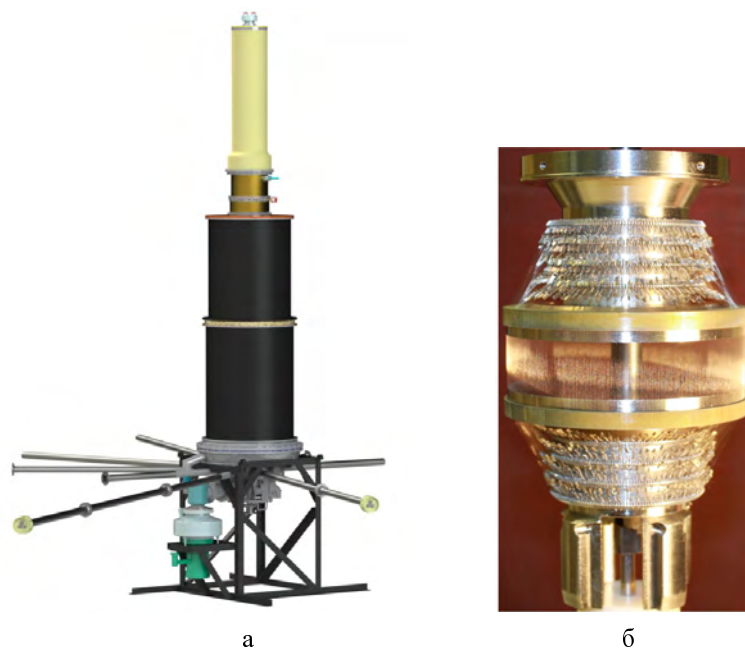


Рис. 1. Эскиз генератора – а) и фото лайнера на технологической оснастке – б)

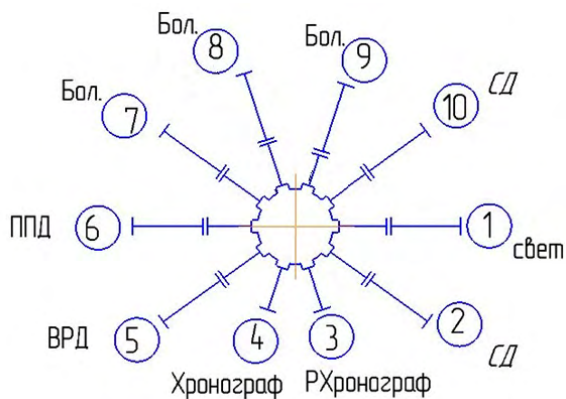


Рис. 2. Схема расположения диагностических каналов (вид со стороны формирователя тока)

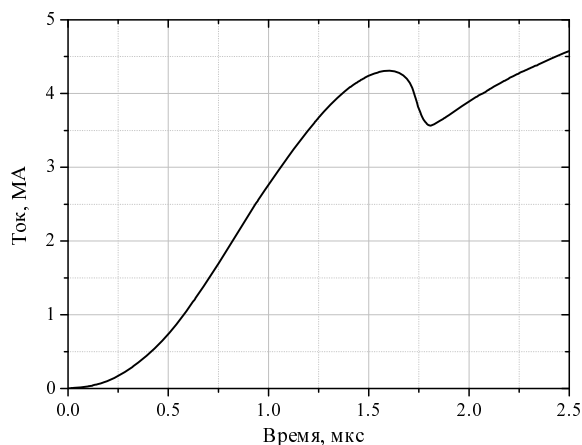


Рис. 3. Зависимость импульса тока в лайнерной камере от времени

Для дополнительных измерений тока применены магнитооптические датчики, работающие на основе эффекта Фарадея.

В докладе представлены только те экспериментальные результаты, которые используются при численном моделировании имплозии лайнера. Характерная кривая импульса тока приведена на рис. 3. В связи с отклонением от штатной работы генератора максимальная амплитуда тока протекающего через нагрузку составила $I_{max} \approx 4,3$ МА с временем нарастания $\tau \approx 0,9$ мкс (по уровню $0,1 \dots 0,9$), что значительно ниже амплитуды (~ 14 МА) импульса тока, используемого в обычном режиме имплозии лайнерных сборок с подобной массой.

Однако, даже при такой запитке нагрузки, различными диагностическими методиками зарегистрированы параметры МРИ свидетельствующие о хорошем качестве имплозии. Так сигналы сцинтилляционной методики стоящей в радиальном канале № 10 показали длительность на половине импульса МРИ $\tau \approx 10,6$ нс за серебряным фильтром толщиной 1,5 мкм, $\tau \approx 9,6$ нс за медным

фильтром толщиной 1,47 мкм и $\tau \approx 9,7$ нс за алюминиевым фильтром толщиной 4,2 мкм. Зарегистрированные сигналы изображены на рис. 4.

Следует отметить, что сигналы МРИ за всеми фильтрами имеют двухпиковую структуру. Кроме того, соотношение амплитуд S_1 и S_2 этих пиков на всех сигналах сохраняется ($S_1/S_2 \approx 2,1$). Данный факт можно трактовать таким образом, что в ходе пинчевания плазмы на оси лайнерной камеры одновременно формируются два плотных плазменных образования с близким спектральным составом излучения, но разной площадью излучающей поверхности.

В трех радиальных каналах № 7–9 располагались высокочувствительные болометры с малым временем отклика для измерения интегральных параметров МРИ лайнерной плазмы в условиях взрывных экспериментов с повышенным уровнем электромагнитных помех. Пересчет показаний болометров в предположении, что тело пинча представляет собой равномерно излучающий по закону Ламберта цилиндр, показал значения интеграль-

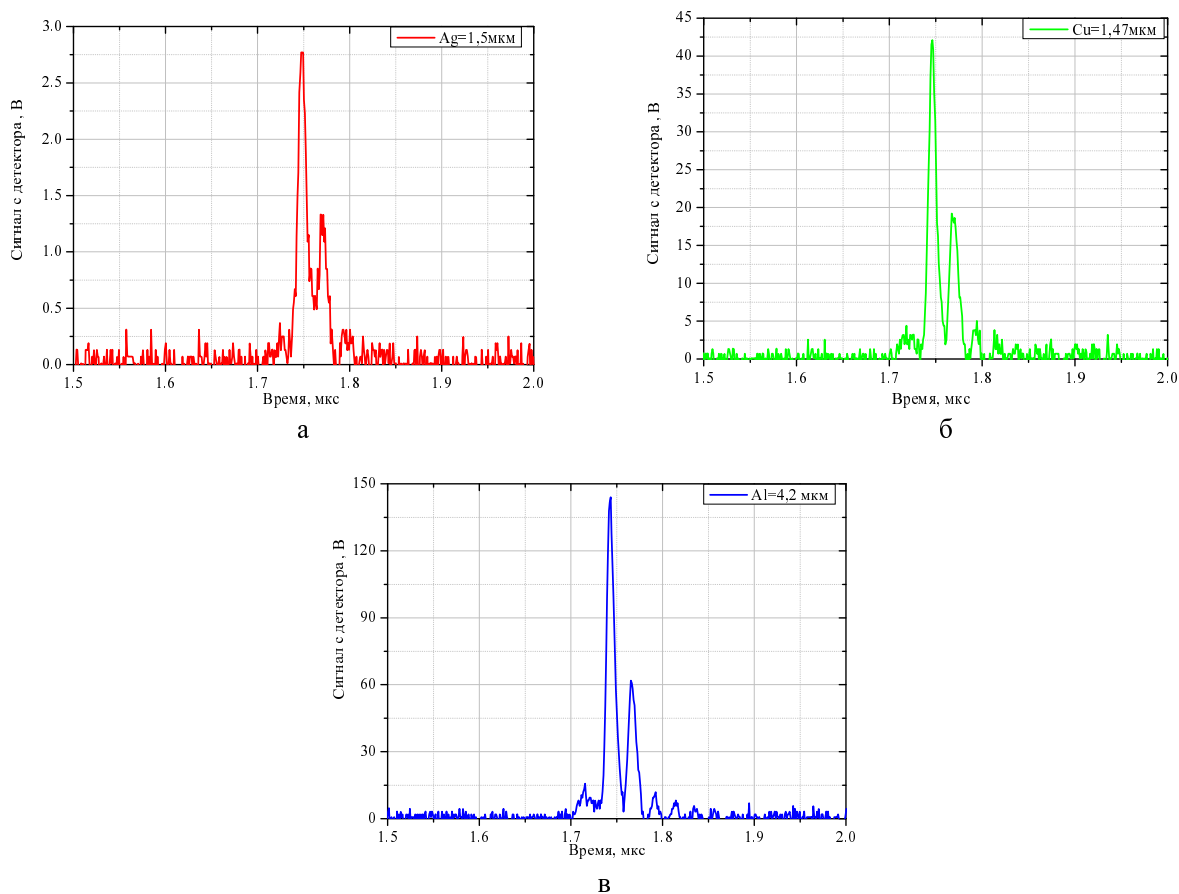


Рис. 4. Сигналы импульсов МРИ, регистрируемые сцинтилляционными датчиками расположенными за: а – серебряным, б – медным и в – алюминиевым фильтрами

ной по спектру и времени энергии, излучаемой пинчом, ~200 кДж.

Результаты моделирования

Моделирование эксперимента осуществлялось в рамках 2D МГД кода FLUX-rz с расчетом переноса теплового излучения в многогрупповом (100 спектральных групп) диффузионном приближении. Расчетное «попадание» на зарегистрированные импульсы МРИ осуществлялось одновременно на все три датчика СД методики в одном МГД расчете. Для этого в каждой расчетной энергетической группе проводилась свертка выходящего из Z-пинча излучения со средним по группе значением спектрального коэффициента пропускания конкретного фильтра в соответствии с таблицами Хенке [5]. Варьирование скорости плазмообразования и относительной амплитуды случайных аксиальных возмущений интенсивности абляции нагрузки позволило добиться соответствия расчета с экспериментом по длительности первого пика импульса МРИ за каждым фильтром, а также воспроизвести его местоположение во времени. Предварительные расчеты показали, что в процессе имплозии участвует не вся масса многопроволочной сборки. Так при значении скорости плазмообразования ~26,4 мкг/(нс·см²), характерной для данного типа генераторов и используемой нагрузки, приблизительно лишь треть начальной массы проволочек принимает участие в радиальной имплозии. Для более точного моделирования сжатия токо-плазменной оболочки в данном эксперименте была выполнена серия расчетов выхода МРИ в зависимости от доли участвующей массы.

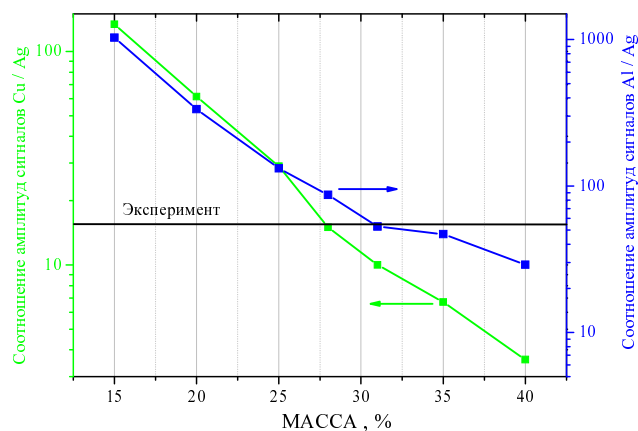


Рис. 5. Соотношения расчётных амплитуд первых пиков сигналов импульсов МРИ за различными фильтрами в зависимости от доли участвующей массы лайнера

Принцип «попадания» на результаты СД методики определялся, как и ранее, по соответствию длительностей импульсов МРИ за различными фильтрами и положениями их во времени. Анализ проведенного скейлинга позволил получить дополнительный критерий выбора оптимальной массы – по соотношению амплитуд первых пиков расчетных сигналов МРИ за разными фильтрами. Суть данной методологии легко понять из зависимостей, изображенных на рис. 5. Горизонтальной линии соответствуют экспериментальные соотношения амплитуд сигналов на момент максимального излучения. Каждой точке отвечает расчет, наиболее близко воспроизводящий показания СД методики. Результаты скейлинга указывают на то, что в процессе имплозии участвовало от 28 % до 31 % первоначальной массы нагрузки.

Оставшиеся 69–72 % вещества, вероятно, представляют так называемую скрытую массу в виде дезинтегрированных остатков кернов проволочек. Такой сценарий видится вполне правдоподобным в силу низкой скорости ввода электромагнитной энергии в нагрузку ~5 А/нс на проволочку. В частности, в [6, 7] приведены экспериментальные доказательства реализации двух принципиально различных сценариев электровзрыва одиночных проволочек в зависимости от скорости ввода тока. Так при скорости ~150 А/нс наблюдается достаточно однородный электровзрыв проводника по всей его длине. Если реализуется скорость ~20 А/нс, то между электродами происходит сильная аксиальная стратификация жидкого вещества проволочки, приводящая к существенному ухудшению электропроводности остатков керна. В случае перетяжеленной много-

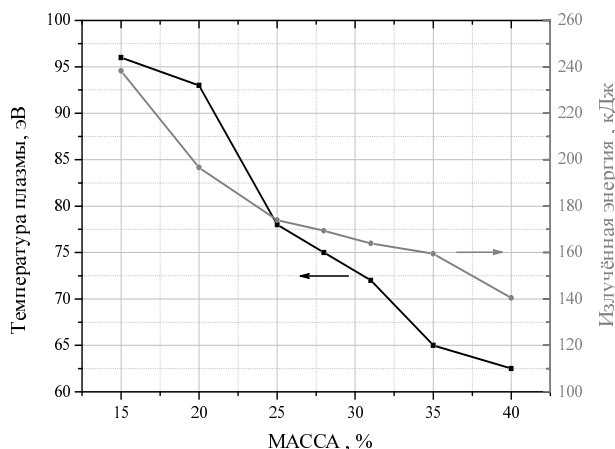


Рис. 6. Расчётный скейлинг температуры плазмы (левая ось) и излученной энергии (правая ось) от доли массы лайнера, принимающей участие в генерации импульса МРИ

проволочной сборки нарабатываемая длительное время ($\sim 1,6$ мкс) плазма формирует достаточно хорошо проводящую оболочку, способную перехватить протекающий по кернам ток. Таким образом, потеря электропроводности кернов инициирует старт имплодирующей оболочки.

На рис. 6 показаны восстановленная из расчетов температура генерируемого излучения и полная энергия импульса МРИ в зависимости от доли массы лайнера, принимающей участие в имплозии. В случае, когда эта доля составляет 28–31 % (см. рис. 5) температура излучения достигает значений 72–75 эВ, а уровень энергии импульса МРИ ~ 165 –170 кДж. Стоит отметить, что расчетная энергия оказывается несколько ниже зарегистрированной болометрической методикой.

Для наглядности ниже представлены различные расчетные зависимости характерные для 28 % массы лайнера, принимающей участие в имплозии.

Спектральное распределение мощности излучения, выходящего через всю цилиндрическую поверхность аксиально-симметричного Z-пинча на момент максимума интенсивности МРИ приведено на рис. 7. Там же приведена аппроксимация расчетного спектра функцией планковского вида $f_{пл}(\epsilon, T)$, учитывающей совпадение местоположе-

ния максимума распределения и равенства интегральных площадей.

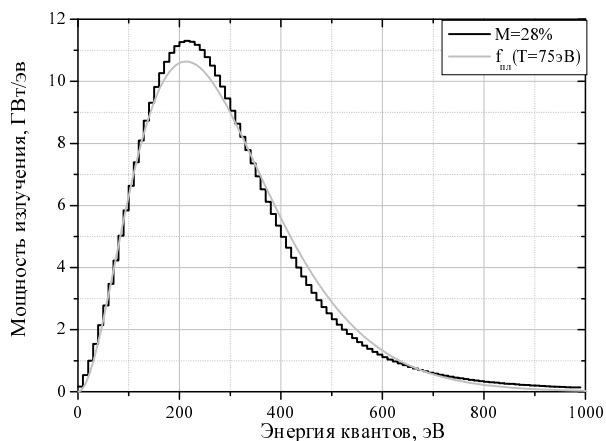
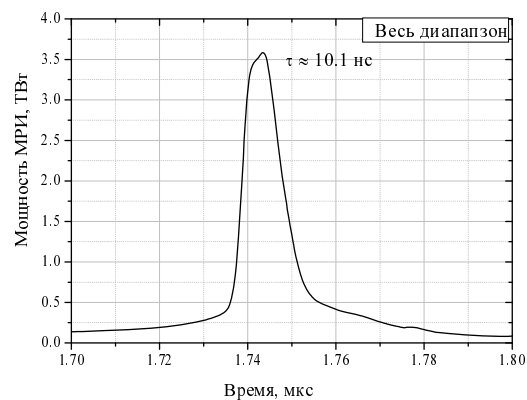


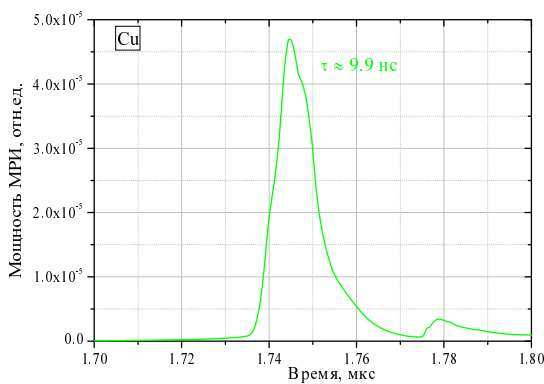
Рис. 7. Расчетное распределение спектральной мощности излучения пинча на момент максимума импульса МРИ для 28 % массы лайнера

Из представленных распределений видно, что расчетное излучение близко к планковскому виду с температурой $T \sim 75$ эВ.

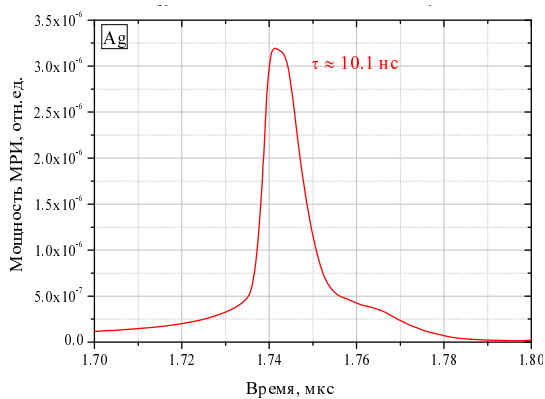
Временные зависимости мощности импульса МРИ, рассчитанные как во всем спектральном



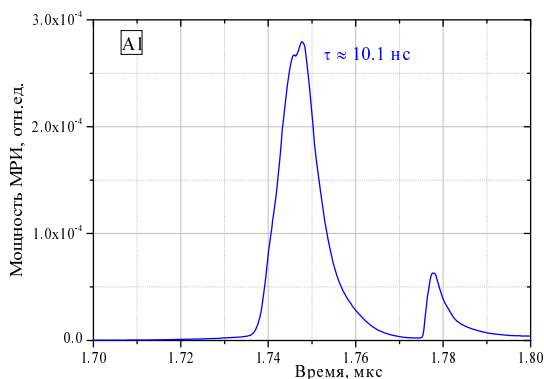
а



б



б



г

Рис. 8. Мощность расчетного импульса МРИ во всем спектральном диапазоне – (а), за серебряным – (б), медным – (в) и алюминиевым – (г) фильтрами при 28 % имплодирующей массы

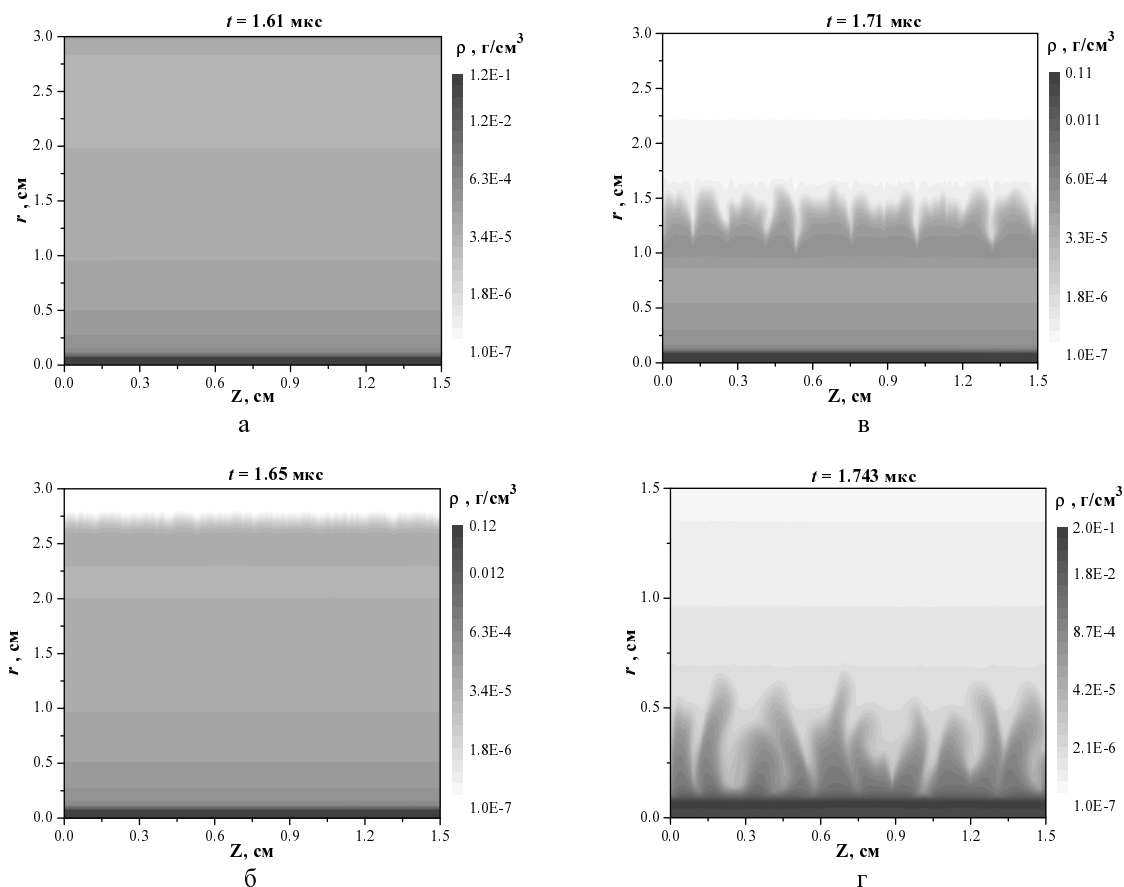


Рис. 9. Пространственное распределение плотности плазмы в последовательные моменты времени: (а) – окончание плазмообразования, (б) – начальный этап развития неустойчивости Рэлей – Тейлора, (в) – прохождение лайнером половину пути до оси, (г) – момент максимума излучения

диапазоне, так и за различными фильтрами изображены на рис. 8. Длительности импульсов МРИ на полувысоте за всеми фильтрами находятся в хорошем согласии с диагностическими измерениями. Расчетная максимальная мощность излучения составляет 3,5 ТВт.

На рис. 9 показаны расчетные пространственные распределения плотности имплодирующей массы на три последовательных момента времени. Данные рисунки отчетливо демонстрируют, что имплозия лайнера в эксперименте проходит в режиме «снежного плуга». Из распределения плотности плазмы на момент завершения фазы абляции и старта токоплазменной оболочки ($t \approx 1,61$ мкс) видно, что вещество успело заполнить все пространство лайнерной камеры, а на оси системы образовался плотный столб прекурсорной плазмы ($\rho \approx 0,12$ г/см³). К моменту времени $t \approx 1,743$ мкс токоплазменная оболочка достигает оси системы, что соответствует максимуму импульса МРИ.

Выводы

Представлены результаты имплозии многопроволочной вольфрамовой сборки запитываемой от взрывомагнитного генератора в режиме с увеличенной массой нагрузки. При токе запитки $\sim 4,3$ МА (время нарастания $\tau \approx 0,9$ мкс по уровню 0,1...0,9) экспериментально зарегистрирован импульс МРИ длительностью порядка 10 нс. Восстановленная из болометрических измерений полная излученная Z-пинчем энергия составила ~ 200 кДж.

Проведенное двумерное МГД моделирование позволило достаточно точно воспроизвести основные параметры импульсов МРИ (время имплозии, длительность на полувысоте), регистрируемых сцинтилляционными детекторами, расположенными за различными фильтрами, а также восстановить температуру плазмы пинча ~ 75 эВ при максимальной мощности излучения $\sim 3,5$ ТВт. Полная энергия импульса МРИ оказалась меньше значения, восстановленного из болометрических

измерений. Данное расхождение требует проведения дополнительных исследований.

Расчеты показали, что лишь от 28 % до 31 % массы нагрузки участвовало в имплозии. Остальное вещество, по всей видимости, представляет так называемую скрытую массу, экспериментально наблюдаемую в многопроволочных лайнерных нагрузках на различных электрофизических установках [8].

Список литературы

1. Selemir V. D., Demidov V. A. and Repin P. B. Explosive Electrophysical Complex EMIR: Current State and Perspectives // IEEE Trans. on Plasma Science, 2010. V. 38, N 8. P. 1754.

2. Repin B. G., Orlov A. P., Repin P. B., and Selemir V. D. Calculation Method of Radiation Spectral Transfer in Frameworks of Two-Dimensional Magnetohydrodynamic Code FLUX-rz // IEEE Trans. on Plasma Science, 2010. V. 38, № 8, p. 1822.

3. Repin B. G., Orlov A. P. Numerical Simulation of Multi-Wire Z-pinches Accounting For Prolonged Plasma Formation // Int. Conf. XII Khariton's Topical Sci. Readings, Dig. Tech. Papers, Sarov, Russia, 2010. P. 526.

4. Корнилов С. Ю., Маркевцев, Репин Б. Г. "Быстродействующий болометр для измерения энергии мягкого рентгеновского излучения сверхточного Z-пинча // ПТЭ, 2014. № 2, С. 97–102.

5. Henke B. L. et al. "Low-energy X-ray interaction coefficients: photoabsorption, scattering, and reflection," Atomic data and nuclear data tables, 1982. V. 27, P. 1–144.

6. Sarkisov G. S., Bauer B. S., DeGroot J. S. Homogeneous Electrical Explosion of Tungsten Wire in a Vacuum // JETP Letters, 2001. V. 73, N. 2, p.69.

7. Sarkisov G. S., McCrorey D. Imaging of Exploding Wire Phenomena // IEEE Trans. on Plasma Science, 2002. V. 30, № 1. P. 98.

8. Haines M. G. A review of the dense Z-pinch // Plasma Phys. Control. Fusion, 2011. V. 53. 093001.