

О перспективах генерации мощных импульсов МРИ на установке ГАММА*

Н. В. Завьялов, В. С. Гордеев,
А. В. Гришин, А. Л. Мозговой,
С. Т. Назаренко, А. П. Орлов,
В. С. Павлов, С. Ю. Пучагин

Представлены результаты 3D электродинамических, 0D оптимизационных и 2D радиационных магнитогидродинамических расчетов, проведенных с целью оценки ожидаемых характеристик выходного импульса МРИ при работе установки ГАММА на единую лайнерную нагрузку.

Введение

В ИЯРФ РФЯЦ-ВНИИЭФ создается 16-модульная установка ГАММА, предназначенная для генерации мощных импульсов тормозного излучения длительностью 40 нс при работе каждого модуля на свой автономный вакуумный диод. Согласно результатам экспериментальной отработки типового модуля при граничной энергии электронов ≤ 2 МэВ можно рассчитывать на суммарный ток пучков не менее 12 МА и выходную электрическую мощность ~ 24 ТВт. Установку ГАММА, как и другие установки такого класса, целесообразно использовать также для генерации коротких импульсов мягкого рентгеновского излучения (МРИ). В промежуточном 4-модульном варианте установки, который планируется реализовать на первом этапе, можно рассчитывать на амплитуду тока в оптимизированном лайнере $\sim 3,6$ МА, кинетическую энергию лайнера ~ 50 кДж, мощность излучения ~ 4 ТВт при длительности импульса ~ 12 нс и эффективности преобразования запасенной электрической энергии в излучение ~ 8 %. В полномасштабной установке ток в цилиндрическом лайнере высотой 2 см ожидается на уровне 11 МА при максимальной кинетической энергии плазменной нагрузки ~ 350 кДж, мощности излучения ~ 130 ТВт, длительности импульса $\sim 4,5$ нс и эффективности преобразования энергии ~ 30 %.

Электродинамический расчет концентратора энергии для установки ГАММА-4

Основные цели расчета: определение эффективной индуктивности концентратора энергии относительно тока, текущего через лайнер; оценка токов электронных утечек и выявление их локализации. Геометрия вакуумной полости концентратора энергии показана на рис. 1. На четыре

* Доклад на Международ. науч. конф. «Харитоновские чтения». Саров, 2012 г.

входных коаксиальных порта концентратора через коаксиальные проводящие линии с импедансом 2,9 Ом подавались синхронно импульсы напряжений от четырех генераторов. Импульсы имели форму полусинусоиды с периодом 240 нс и амплитудой 2 МВ. Электромагнитные ТЕМ волны, распространяясь от входных портов вдоль вакуумной межэлектродной полости концентратора, сходятся на неподвижном лайнере, расположенном на оси симметрии системы в нижней части концентратора. Лайнер в данной постановке представляет собой идеально проводящий цилиндр диаметром и высотой 2 см. Эмиссия заряженных частиц в вакуумную полость отсутствует.

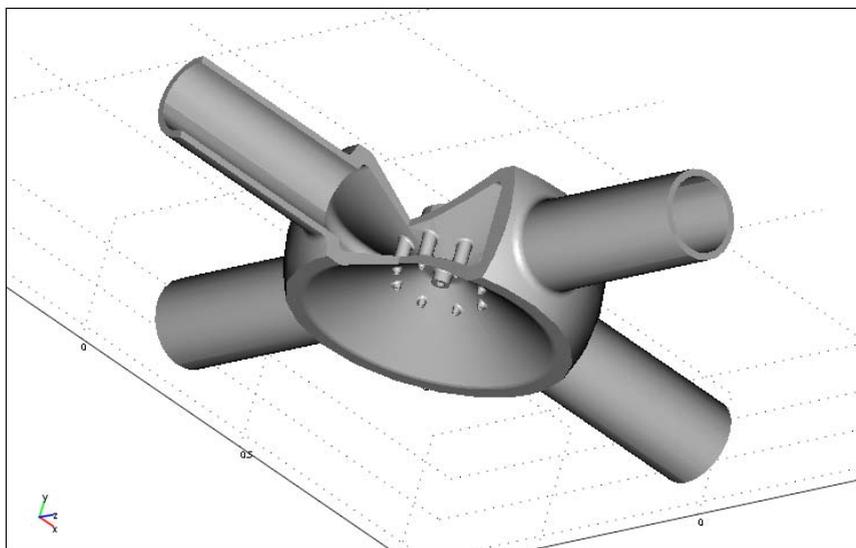


Рис. 1. Геометрия вакуумной области концентратора энергии

Задача решалась в 3D варианте в декартовой системе координат. Стенки концентратора энергии полагались идеально проводящими. Уравнения Максвелла, описывающие данную задачу, введением векторного потенциала магнитного поля $\mu_0 \vec{H} = \nabla \times \vec{A}$ и «временной» калибровки

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \text{ приводятся к виду [1]}$$

$$\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} + \nabla \times (\nabla \times \vec{A}) = 0. \quad (1)$$

Система уравнений (1) решалась численно, методом конечных элементов. Расчетная область разбивалась на 80000 конечных элементов тетраэдральной формы.

Полная индуктивность концентратора, включая камеру с лайнером, рассчитанная энергетическим методом, составила 21,2 нГ. Ток, текущий через лайнер, в максимуме достигал 4,2 МА. Максимальная запасенная во всем объеме концентратора энергия магнитного поля составила 190 кДж.

Оценка тока электронных утечек (рис. 2) основывалась на следующих соображениях. Так как линейные размеры электродов концентратора и радиусы кривизны их поверхностей гораздо больше размеров межэлектродного зазора, то можно смоделировать ток утечки эквивалентным шунтом, представляющим собой плоский вакуумный диод с меняющимися во времени межэлектродным зазором и площадью электродов круговой формы. Парапотенциальный ток насыщения такого диода

$$I_d[\text{A}] = 8500\gamma \ln\left(\gamma + \sqrt{\gamma^2 - 1}\right) \frac{R_d}{d_d}, \quad (2)$$

где γ – релятивистский фактор, $\gamma = 1 + eU_d/m_e c^2$; U_d – напряжение на электродах диода; d_d – межэлектродный зазор; R_d – радиус электродов.

В каждый момент времени вычислялись средние по объему значения R_d , d_d и U_d , причем только в тех областях, где выполняются одновременно два условия: 1) ларморовский радиус электронов R_L превышает межэлектродный зазор в концентраторе; 2) напряженность электрического поля превышает порог взрывной эмиссии 100 кВ/см.

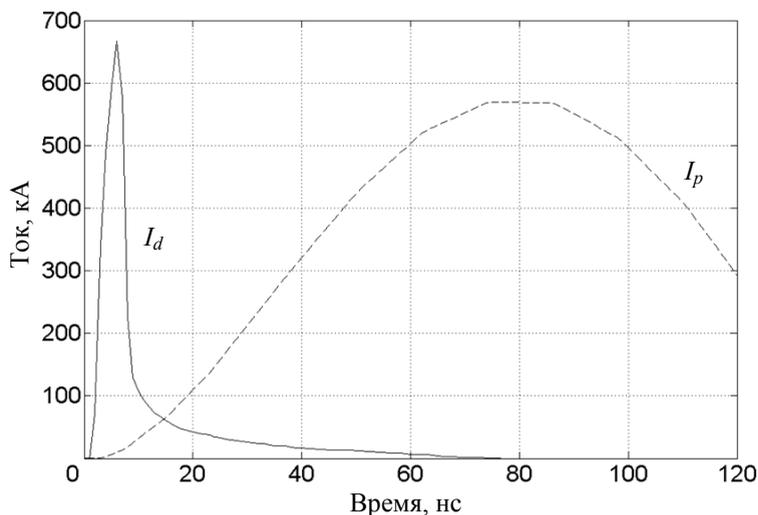


Рис. 2. Ток утечки I_d ($I_{d_{\max}} = 667$ кА) и ток через подвес I_p ($I_{p_{\max}} = 569$ кА)

Как и следовало ожидать, наличие в конструкции длинного проводящего подвеса большой индуктивности привело к тому, что существенная утечка происходит лишь на фронте волны самоизоляции электронного пучка. В максимуме ток утечек достигает 667 кА, при этом мощность утечки, получаемая как произведение тока утечки на напряжение на эквивалентном диоде, не превышает 0,34 ТВт. К моменту $t \approx 10$ нс самоизоляция устанавливается и лишь небольшие неустранимые утечки продолжают в областях с малым или нулевым магнитным полем вплоть до момента $t \approx 80$ нс. За весь полезный цикл работы концентратора электронные утечки уносят из системы не более 2,6 кДж энергии.

На рис. 3 показаны области неустранимых электронных утечек; одна находится во внешней кольцевой полости концентратора (рис. 3,а). Области утечек сконцентрированы в окрестностях линий с нулевым магнитным полем. Линии образуются пересечением двух плоскостей, горизонтальной плоскостью симметрии концентратора и вертикальными плоскостями, проходящими через биссектрисы углов между смежными МИПЛ входных портов. Другая зона утечек находится в окрестностях конволют (рис. 3,б).

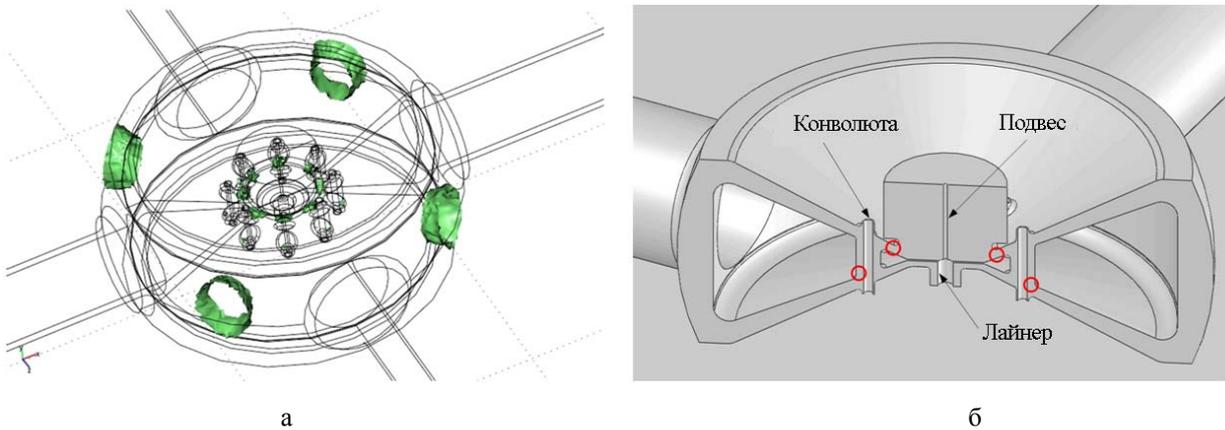


Рис. 3. Области электронных утечек: а – внешняя кольцевая полость; б – окрестности конволют

Оптимизационные расчеты на основе 0D модели

Традиционно для получения первичных ожидаемых оценок выходных параметров сложных физических установок используют упрощенные 0D модели [2, 3]. Обычно такая модель включает уравнения электрической цепи установки и уравнение движения идеального лайнера. Упрощенная схема электрической цепи установки ГАММА-4 с концентратором энергии и лайнером показана на рис. 4. Импульс напряжения $2U(t)$ от генератора через передающую линию с импедансом $Z_0 = 2,9 \text{ Ом}/4 = 0,725 \text{ Ом}$ поступает в концентратор $L_0 = 42 \text{ нГ}$ (L_0 – суммарная индуктивность с учетом изоляторов и ускорительных трубок) и лайнер $L(t)$. Для учета тока утечки в цепь введен шунт $Z(t)$.

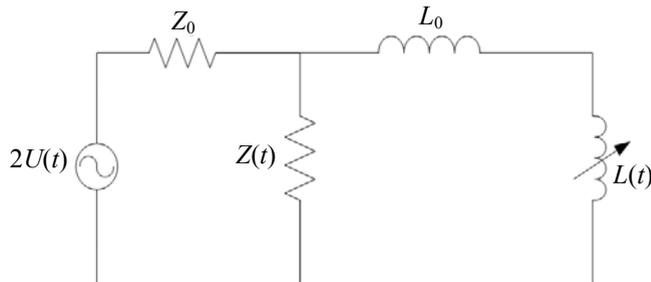


Рис. 4. Схема электрической цепи

Электрическая цепь и движение лайнера – бесконечно тонкой идеально проводящей цилиндрической оболочки под действием сил магнитного давления – описываются системой уравнений:

$$\frac{dI}{dt} = \frac{1}{L(r)} \left(I \left(\frac{hv}{r} - \frac{Z_0}{Z_0 Y(t) + 1} \right) + \frac{2U(t)}{Z_0 Y(t) + 1} \right), \quad (3)$$

$$\frac{dr}{dt} = v, \quad \frac{dv}{dt} = -\frac{h}{2m_0} \frac{I^2}{r}.$$

где I , v , r и m_0 – ток, скорость, радиус и полная масса лайнера; $L(r) = L_0 + h \ln(r_0/r)$; $h = \mu_0 l / 2\pi$; l – высота лайнера; r_0 – начальный радиус лайнера; $U(t)$ – импульс напряжения в падающей волне (рис. 5); $Y(t) = 1/Z(t)$ – полная проводимость шунта.

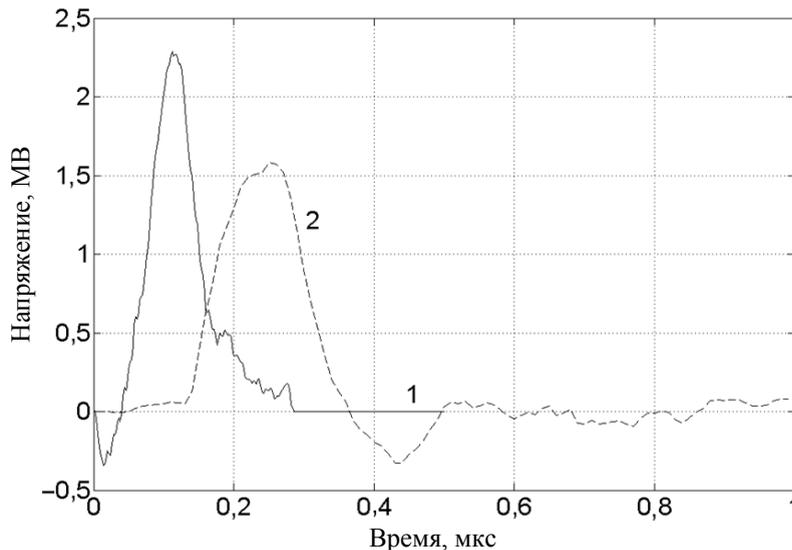


Рис. 5. Формы импульсов напряжения $U(t)$ в падающей волне: 1 – установка ГАММА; 2 – установка PTS

В работе токовой цепи можно выделить два основных этапа: на первом происходит накопление энергии магнитного поля в индуктивности концентратора L_0 при неподвижном лайнере; на втором в момент $U(t) \sim 0$ происходит быстрое сжатие лайнера, часть накопленной магнитной энергии расходуется на его ускорение. Полное уравнение для токовой цепи без учета шунта принимает вид

$$L_0 \frac{dI}{dt} = -I(Z_0 + Z_{act}), \quad (4)$$

где $Z_{act} = dL(t)/dt + \Omega$ – активная часть импеданса лайнера, Ω – омическое сопротивление лайнера. Из уравнения (4) легко получить оценку времени диссипации магнитной энергии из системы:

$$\tau_{dis} = \frac{L_0}{Z_0 + Z_{act}}. \quad (5)$$

Магнитная энергия E_m , ушедшая из системы, конвертируется в кинетическую энергию лайнера $E_k = m_0 v^2 / 2$ за время τ_{dis} , поэтому мощность диссипации магнитной энергии из системы составит $P_m = E_k / \tau_{dis}$. Энергию излучения можно полагать примерно равной E_k , так как она вносит основной вклад в излучение и практически полностью конвертируется в него на стадии стагнации [4].

Для получения корректных оценок параметров импульса МРИ, выходящего из плазмы пинча, необходимо проведение расчетов сжатия лайнера в рамках радиационной магнитной гидродинамики. На данный момент можно получить лишь представление об ожидаемых параметрах импульса МРИ, сравнивая ГАММА-4 с установками такого же типа.

Наиболее близкой к ГАММА-4 по электротехническим параметрам является установка АНГАРА-5-1. На одиночных многопроволочных сборках, взятых в качестве нагрузки, на этой

установке получают коэффициенты сжатия $r_0/r \sim 10$. Ориентируясь на такой коэффициент сжатия, на базе 0D модели (3) без учета утечек $Y(t) = 0$, были проведены оптимизационные расчеты для обеих установок. Параметры 0D модели для установки АНГАРА-5-1 ($Z_0 = 2 \text{ Ом}/8 = 0,25 \text{ Ом}$, $L_0 = 20 \text{ нГ}$, $U(t) = U_m \sin(2\pi t/T)$, $U_m = 0,9 \text{ МВ}$, $T = 300 \text{ нс}$, $Y(t) = 0$) взяты из работ [2, 5]. Расчеты проводились в плоскости параметров r_0 в диапазоне 0,5–2 см и m_L в диапазоне 0,1–0,7 мг/см для лайнера высотой $l = 2 \text{ см}$. Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Расчетные параметры установок ГАММА-4 и АНГАРА-5-1

Установка	ГАММА-4		АНГАРА-5-1	
	E_k , макс.	P_m , макс.	E_k , макс.	P_m , макс.
I_{\max} , МА	3,6	3,3	4	3,6
E_k , кДж	50	45	58,6	51
P_m , ТВт	3,5	4,1	5	6,1
$C = \text{const}$	13,8	15,2	4,6	4,5
ЭПЭ, %	8,1	7,3	–	–

Расчеты показали, что в плоскости параметров (r_0 , m_L) существуют явные максимумы как для кинетической энергии лайнера E_k , так и для мощности диссипации магнитной энергии P_m . Максимумам по E_k и по P_m соответствуют определенные значения пинч-константы C , связывающей r_0 и m_L в едином выражении:

$$C = \frac{I_{\max}^2 [\text{МА}] \tau_{\text{dis}}^2 [\text{нс}]}{m_L [\text{мкг/см}] r_0^2 [\text{см}]}$$

В табл. 1 также приведены значения максимального тока в нагрузке I_{\max} и эффективность передачи энергии (ЭПЭ), запасенной в конденсаторах генераторов ГИН-1000 (640 кДж), в излучение. Из таблицы видно, что ГАММА-4 немного уступает по энергетическим параметрам установке АНГАРА-5-1. Это обусловлено, прежде всего, вдвое большей индуктивностью концентратора энергии установки ГАММА-4. В то же время амплитуда напряжения в электромагнитной волне, падающей на концентратор, в два раза выше у ГАММА-4. Если принять во внимание тот факт, что многомодульная установка ГАММА-4 может обеспечить более высокую степень синхронизации срабатывания модулей (разброс срабатывания $\Delta t \sim 3 \text{ нс}$) по сравнению с АНГАРА-5-1 ($\Delta t \sim 15 \text{ нс}$), то можно ожидать импульс МРИ с параметрами, по крайней мере не сильно уступающими получаемым на установке АНГАРА-5-1. По данным [6, 7] при использовании в качестве нагрузки одиночных многопроволочных сборок на установке АНГАРА-5-1 получали импульс МРИ мощностью до 5 ТВт, а при использовании вложенных сборок мощность МРИ достигала 7 ТВт.

Каковы ожидания относительно полной установки ГАММА-16? Наиболее близкой по электротехническим параметрам к ней оказалась китайская установка PTS (Primary Test Stand). Информация о технических и физических характеристиках этой установки широко представлена в научной периодике.

Как и для предыдущих двух установок, были проведены 0D оптимизационные расчеты для ГАММА-16 и для PTS. Расчеты проводились без учета утечек $Y(t) = 0$ и были согласованы с РМГД моделями PTS по коэффициенту сжатия $r_0/r = 20$. Импеданс генератора установки

ГАММА-16 $Z_0 = 2,9 \text{ Ом}/16 = 0,181 \text{ Ом}$, индуктивность концентратора энергии по геометрическим расчетам должна составить $L_0 = 15 \text{ нГ}$. Параметры PTS ($Z_0 = 4 \text{ Ом}/24 = 0,67 \text{ Ом}$, $L_0 = 15 \text{ нГ}$, форма $U(t)$ приведена на рис. 5) были взяты из работы [3]. Расчеты проводились в плоскости параметров (r_0, m_L) в диапазоне значений r_0 от 1 до 2,5 см и m_L от 0,7 до 1,5 мг/см для лайнера высотой $l = 2 \text{ см}$. Результаты расчетов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Расчетные параметры установок ГАММА-16 и PTS

Установка	ГАММА-16		PTS	
	E_k , макс.	P_m , макс.	E_k , макс.	P_m , макс.
I_{\max} , МА	11	9,6	11,5	10,3
E_k , кДж	493	417	560	493
P_m , ТВт	134	166	93	107
$C = \text{const}$	0,76	0,7	0,7	0,65
ЭПЭ, %	19,9	16,8	7,8	6,8

Анализируя табл. 2, можно отметить явную близость установок по ряду основных характеристик. И хотя энергия, вкладываемая в нагрузку, практически совпадает, мощность импульса накачки энергии в концентратор почти вдвое выше у ГАММА-16, т. е. длительность электромагнитного импульса накачки у ГАММА-16 почти вдвое короче. Следует отметить, что запасаемая в 24 модулях установки PTS энергия составляет около 7,2 МДж, а в модулях ГАММА-16 – 2,56 МДж. Разработчики PTS на основании РМГД моделирования ожидают получить импульс МРИ мощностью ~100 ТВт.

Несложно заметить, что и экспериментальные значения мощностей импульсов МРИ, полученные на установке АНГАРА-5-1, и расчетные РМГД оценки ожидаемых мощностей МРИ на PTS очень близки к соответствующим мощностям диссипации магнитной энергии P_m . Этот факт говорит о том, что и количество, и темп вывода энергии из системы излучением зависят от электрофизических параметров установок. Исходя из этих соображений и представленных результатов 0D расчетов, можно надеяться и на более высокую мощность выхода МРИ у ГАММА-16 по сравнению с PTS. Хотелось бы отметить еще одно преимущество установки ГАММА-16 – работа с более короткими электромагнитными импульсами накачки концентратора энергии, т. е. более стабильный режим формирования и сжатия плазмы пинча по отношению к неустойчивостям Рэлея – Тейлора.

РМГД моделирование Z-пинча на установке ГАММА-16

Ниже изложены результаты численного моделирования динамического Z-пинча, запитываемого импульсом тока от 16-модульной стационарной электрофизической установки ГАММА. Расчеты процесса имплозии сплошного (в азимутальном направлении) цилиндрического вольфрамового лайнера с начальным радиусом $R_0 = 1,6 \text{ см}$, высотой $l = 2 \text{ см}$ и погонной массой $m_L = 0,82 \text{ мг}/\text{см}$, в результате которой генерируется мощный импульс МРИ, проведены с помощью разработанного в НТЦФ ВНИИЭФ двухмерного (в цилиндрических координатах $r-z$) РМГД кода FLUX-rz [8, 9].

Система одножидкостных 3-T РМГД уравнений, решаемая с помощью кода FLUX-rz на стационарной эйлеровой сетке, представлена в работе [8]. Пространственная счетная сетка состояла из квадратных ячеек со стороной 100 мкм. УРС вольфрама и усредненные по Планку

и Росселанду пробеги излучения рассчитывались в рамках модели среднего иона [10]. Значения всех используемых транспортных коэффициентов рассчитывались по формулам для идеальной невырожденной плазмы с учетом эффекта замагниченности [11]. Отличительной особенностью использованных РМГД уравнений являлся учет токов смещения в уравнениях Максвелла, что позволяло сквозным образом рассчитывать эволюцию электромагнитного поля в областях пространства с пренебрежимо малой электропроводностью, включая вакуум.

В проведенных расчетах подвод импульса электромагнитной энергии к аксиально-симметричной лайнерной нагрузке, размещаемой в цилиндрической камере, осуществлялся сбоку с использованием вакуумной магнитоизолированной передающей линии (рис. 6).

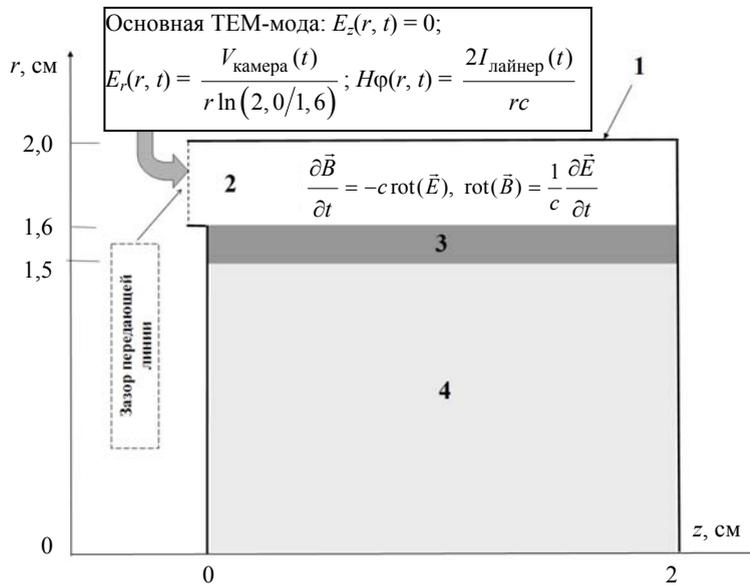


Рис. 6. Исходная конфигурация Z-пинча на установке ГАММА-16: 1 – идеально проводящие стенки лайнерной камеры радиусом $R_{\text{кам}} = 2$ см; 2 – конечный участок коаксиальной передающей линии; 3 – вольфрамовый лайнер; 4 – фоновая вольфрамовая плазма с исходными параметрами $\rho_{\text{фон}} = 10^{-7}$ г/см³, $T_{\text{фон}} = 0,1$ эВ

Радиальная толщина кольцевой плазменной оболочки 3, «вставляемой» в расчетную область в момент времени $t = 0$, полагалась равной $\Delta = 1$ мм. При этом лайнер имел неоднородную плотность $\rho(r, z) = \langle \rho \rangle (1 + A_0 \text{Rand})$, где A_0 – амплитуда начального возмущения, Rand – случайное от ячейки к ячейке число в диапазоне $(-1 \dots 1)$, $T_0 = 1$ эВ, $\langle \rho \rangle = m_L / \left(\pi (R_0^2 - (R_0 - \Delta)^2) \right) \approx 0,842$ мг/см³. Обычно при моделировании уже проведенного Z-пинч эксперимента значение амплитуды начального возмущения подбирается из условия наилучшего совпадения параметров измеренного и расчетного импульсов МРИ. В представленном численном прогнозе в соответствии с предварительной калибровкой кода FLUX-rz по Z-пинч эксперименту Shot-51 [12] было выбрано $A_0 = 1,75$ %.

Согласование уравнений Максвелла с эквивалентной электрической цепью установки ГАММА-16 (рис. 4, $Z_0 = 0,181$ Ом, $L_0 + L(t = 0) = 15$ нГ, $Y(t) = 0$, $U(t)$ на рис. 5) осуществлялось вдоль зазора вакуумной коаксиальной линии (см. рис. 6).

Результаты численного моделирования

На рис. 7 показаны кривые рассчитанного тока в лайнере и генерируемого импульса МРИ (мощность излучения, выходящего с боковой поверхности Z-пинча).

На рис. 8 приведены зависимости от времени для излученной, кинетической, электромагнитной, тепловой, их суммарной и введенной в лайнерную камеру энергий. При сравнении кривых 5 и 6 можно сделать вывод о достаточно низком дисбалансе полной энергии в процессе расчета, что свидетельствует о хорошей точности проведенного численного моделирования Z-пинча на установке ГАММА-16.

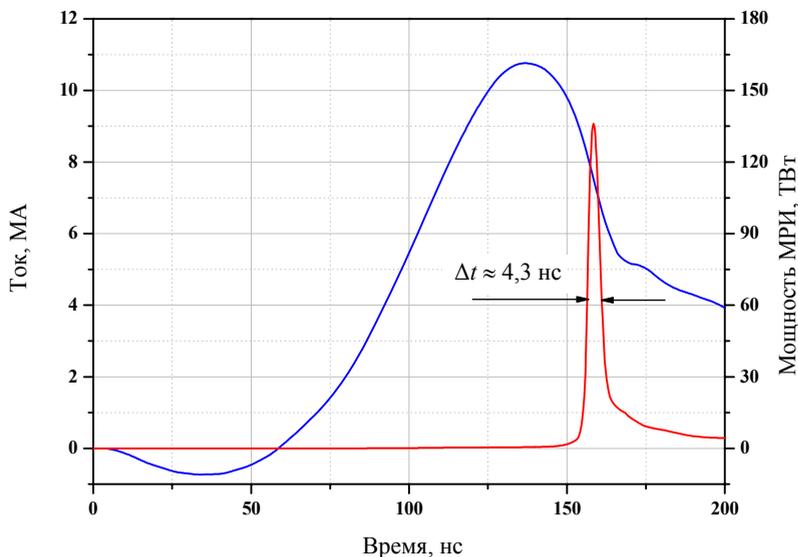


Рис. 7. Ток в лайнере и генерируемый импульс МРИ ($A_0 = 1,75 \%$)

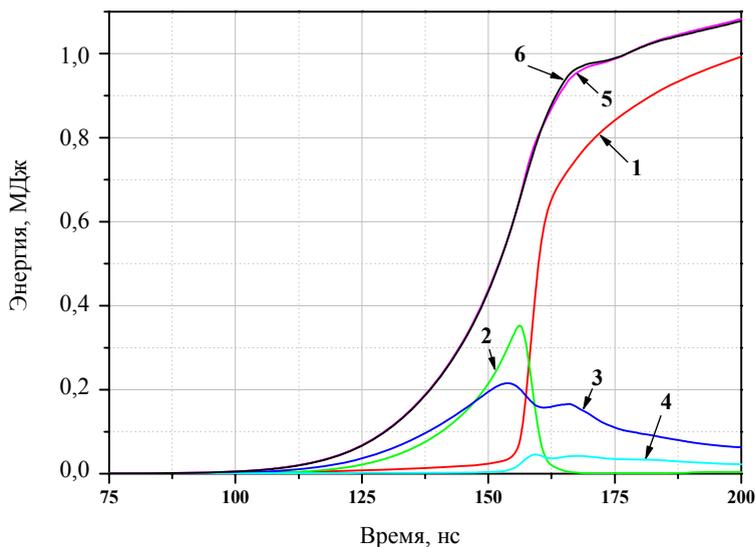


Рис. 8. Расчетные энергии: 1 – излученная; 2 – кинетическая; 3 – магнитная; 4 – тепловая; 5 – суммарная; 6 – введенная в лайнерную камеру

Пространственные распределения плотности и электронной температуры вольфрамовой плазмы на момент времени $t = 158$ нс, предшествующий на $\approx 0,4$ нс моменту максимума импульса МРИ, приведены на рис. 9.

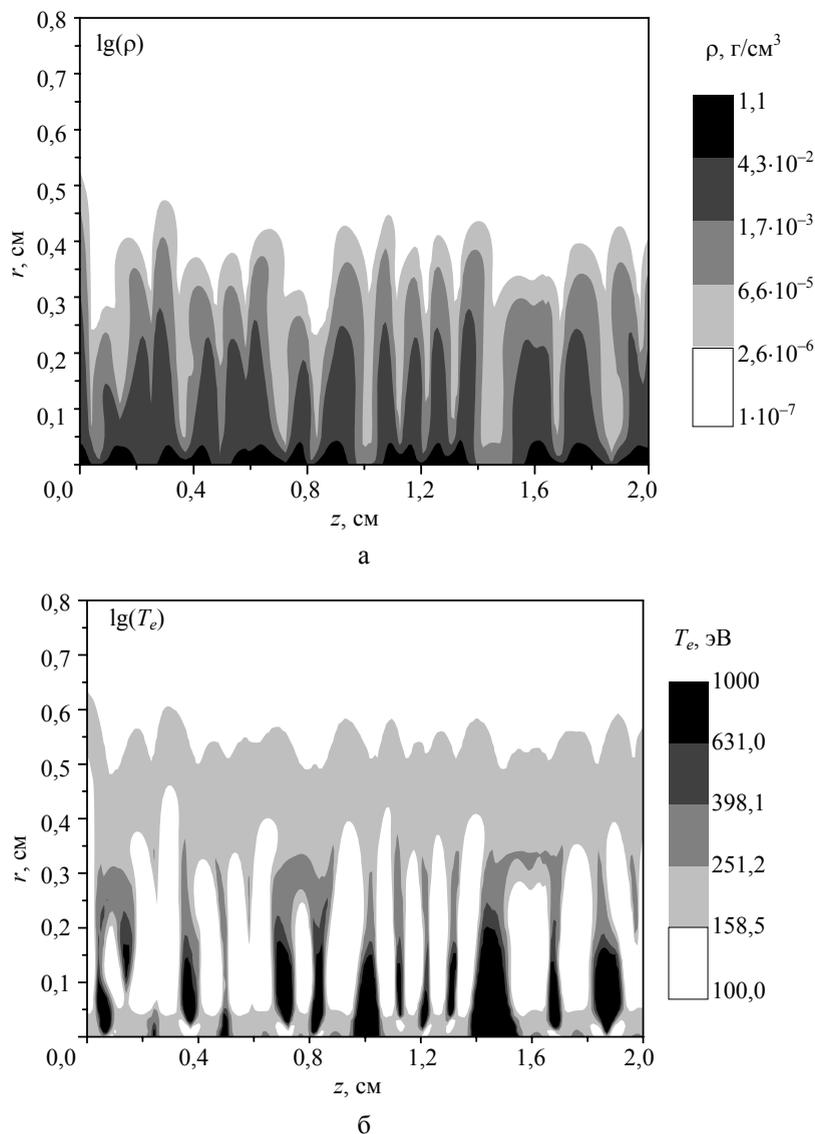


Рис. 9. Распределения плотности (а) и электронной температуры (б) вольфрамовой плазмы на момент $t = 158$ нс

По показателям плотности и температуры можно заключить, что при пинчевании на оси плазма имеет сильно неоднородную пространственную структуру. Так называемая структура «шипов и пузырей» с характерной длиной волны в аксиальном направлении $\sim 1-2$ мм развивается из начальных возмущений плотности под действием неустойчивости Рэля – Тейлора в процессе имплозии лайнера. Из результатов численного моделирования имплозии излучающего Z-пинча

в спектральном (многогрупповом диффузионном) приближении следует [9], что «вершины» более оптически плотных «шипов» как раз и определяют эффективный радиальный размер плазменного образования, ответственного за генерацию основного импульса МРИ, причем, как правило, в максимуме интенсивности генерируемое излучение имеет спектр, близкий к планковскому. Принимая это во внимание, из рис. 9 можно сделать вывод, что в максимуме интенсивности импульса цилиндрическая излучающая область имеет радиус $R_{\text{изл}} \sim 3\text{--}4$ мм, а температура излучения определяется электронной температурой «верхушек шипов» и лежит в диапазоне $T \approx 100\text{--}160$ эВ. Более точное значение пиковой температуры генерируемого излучения можно получить из соотношения

$$\sigma_{\text{СБ}} T^4 / 2\pi R_{\text{изл}} = S_{\text{max}}^{\text{rad}} \approx 136 \text{ ТВт}.$$

Для вышеуказанного интервала значений радиуса излучающего столба вольфрамовой плазмы имеем пиковую температуру излучения $T \approx 127\text{--}137$ эВ.

Для получения более точных данных о спектре генерируемого импульса МРИ необходимы расчеты переноса излучения в вольфрамовой плазме в многогрупповом (спектральном) приближении [9].

Таким образом, на основании численного моделирования Z-пинча на установке ГАММА-16 с помощью 2D РМГД кода FLUX-rz можно прогнозировать, что в результате имплозии вольфрамового лайнера с полной массой 1,64 мг ожидается генерация импульса МРИ длительностью 4–5 нс с максимальной мощностью $\sim 130\text{--}140$ ТВт и соответствующей температурой излучения $\sim 130\text{--}140$ эВ.

Список литературы

1. Ciarlet P. G. Numerical methods in electromagnetics. – North Holland: Elsevier V. B., 2005.
2. Alexandrov V. V., Frolov I. N., Grabovskii E. V. et al. Measurements of the enclosed electric power at compression of wire arrays on installation «ANGARA-5-1» // 16th IEEE Int. Pulsed Power Conf. 2007. Vol. 1. P. 332–335.
3. Ding N., Ning C., Shu X. J. et al. Design and analysis of the Z-pinch loads on the PTS facility // 17th Int. Conf. on High-Power Particle Beams. 2008. 07-P-56.
4. Ryutov D. D., Derzon M. S., Matzen M. K. The physics of fast Z-pinch // Rev. of Modern Phys. 1999. Vol. 72, N 1. P. 167–223.
5. Недосеев С. Л. Самосжатый излучающий разряд высокой мощности с холодным стартом. – М.: МФТИ, 2004.
6. Порофеев В. Ю. Рентгенографические исследования физики затянутого плазмообразования при токовом сжатии многопроволочных сборок на установке «Ангара-5-1»: Автореф. дис. ...канд. физ.-мат. наук. Троицк, ТРИНИТИ, 2006.
7. Александров В. В., Браницкий А. В., Волков Г. С. и др. Динамика гетерогенного лайнера с затянутым плазмообразованием // Физика плазмы. 2001. Т. 27, № 2. С. 99–120.
8. Репин Б. Г., Орлов А. П. Численное моделирование многопроволочных Z-пинчей с учетом затянутого плазмообразования // Труды Международ. науч. конф. «XII Харитоновские тематические научные чтения». Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2010. С. 526–531.

9. Репин Б. Г., Орлов А. П. Численное моделирование излучающих Z-пинчей в спектральном диффузионном приближении // Труды Международ. науч. конф. «XII Харитоновские тематические научные чтения». Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2010. С. 531–538.
10. Баско М. М. Уравнение состояния металлов в приближении среднего иона // Теплофизика высоких температур. 1985. Т. 23. Вып. 3. С. 483–491.
11. Брагинский С. И. Явления переноса в плазме // Вопросы теории плазмы. 1963. Вып. 1. С. 183–272.
12. Spielman R. B., Deeney C., Chandler G. A. et al. Tungsten wire-array Z-pinch experiments at 200 TW and 2 MJ // Phys. Plasmas. 1998. Vol. 5, N 5. P. 2105–2111.

On the Prospects of Generating High-Power Soft Radiation Pulses on «GAMMA» Installation

N. V. Zavyalov, V. S. Gordeev, A. V. Grishin, A. L. Mozgovi, S. T. Nazarenko,
A. P. Orlov, V. S. Pavlov, S. Yu. Puchagin

The results of 3D electro-dynamic, 0D optimization and 2D radiation magneto-hydrodynamic computations undertaken to estimate the expected characteristics of the output soft radiation pulse at «GAMMA» installation operation on a common liner load are presented.