

О ГЕНЕРАЦИИ МОЩНЫХ ПОТОКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ И ПОЛУЧЕНИИ МЕГАБАРНЫХ ДАВЛЕНИЙ В ЛАЙНЕРНЫХ СИСТЕМАХ

В. А. Гасилов, С. В. Захаров, В. П. Смирнов

Филиал института Атомной энергии им. И. В. Курчатова
142092, Троицк, Московская область

Поступила в редакцию 4 декабря 1990 г.

После переработки 2 января 1991 г.

Рассмотрена генерация импульсов мягкого рентгеновского излучения и давления при столкновении сильноизлучающего плазменного лайнера с соосным твердым стержнем. Взаимодействие лайнера с плазменной короной, возникающей при абляции стержня, приводит к уплотнению плазмы лайнера и к увеличению интенсивности излучения и амплитуды давления в стержне.

Источники мягкого рентгеновского излучения (МРИ), основанные на применении сильноизлучающих лайнеров в качестве нагрузок электрических генераторов, позволяют получить мощные импульсы излучения^{1,2}. На установке "Ангара-5-1" с уровнем максимального тока $I_0 \approx 4$ МА получены импульсы МРИ длительностью $\Delta t = 20 \div 30$ нс и выходом энергии более 100 кДж¹. На установке "Saturn" (США) с повышением тока до 11 МА выход энергии возрос до 0,5 МДж при длительности импульса МРИ $\Delta t = 20$ нс².

Излучение МРИ обусловлено нагревом многозарядной плазмы в процессе термализации кинетической энергии сжимающегося под действием магнитного поля лайнера и джоулева нагрева плазмы в сжатом состоянии - в пинче. Длительность импульса излучения, а следовательно и мощность, определяется толщиной лайнера. Характерная толщина оболочки ограничена снизу размером скин-слоя³ и может увеличиваться в результате развития неустойчивости Рэлея - Тейлора. Кроме того, при сжатии лайнера из тяжелоионной плазмы, с большим атомным номером $A \gg 1$, передача энергии, полученной в ударной волне, от ионной компоненты электронам затруднена. Поэтому время ион-электронного обмена, пропорциональное отношению массы иона и электрона и обратно пропорциональное плотности плазмы, также может определять длительность импульса излучения, как это имеет место в неизотермическом режиме сжатия ксенонového лайнера⁴.

Мегаамперные токи, развиваемые в электрических генераторах, позволяют также получить магнитное давление мегабарного диапазона. На установке "Saturn"⁵ в металлической загрузке диаметром 0,2 см достигнуто давление 20 Мбар.

В данной работе предлагается лайнерная система, позволяющая получить короткий мощный импульс излучения и мультимегабарное импульсное давление. Система состоит из сильноизлучающего лайнера и расположенного в центре твердого стержня, диаметром примерно в десять раз меньшим диаметра лайнера.

Лайнер, ускоренный плавлением магнитного поля до скорости $V = 3 \div 5 \cdot 10^7$ см/с, сжавшись примерно в десять раз, испытывает столкновение с центральным стержнем. В процессе торможения его кинетическая энергия конвертируется в излучение, а количество движения создает импульс давления, дополнительный к давлению магнитного поля. Конечная степень сжатия лайнера (до соударения) $R_0/r_k \sim 10$ ограничивает амплитуду неустойчивости

Элея - Тейлора. А компрессия излучающего лайнера при взаимодействии лайнерной оболочки с плазменной короной стержня приводит к увеличению плотности плазмы лайнера и уменьшению его толщины, чем достигается укорочение импульса МРИ, рост амплитуд мощности излучения и давления.

Механизм компрессии лайнера обусловлен следующими процессами. При ускорении слоя многозарядной ($Z \gg 1$) сильноизлучающей плазмы температура электронов достигает нескольких десятков электрон-вольт за счет баланса радиационных потерь из плазмы и нагрева электронов током проводимости ³ или при столкновительной передаче энергии от ионов за фронтом первой ударной волны ⁴. Под действием излучения лайнера на стадии ускорения идет абляция центрального твердого стержня и образуется плазменная корона с профилем плотности близким к изотермическому - экспоненциальному. До соударения с плотным стержнем лайнер тормозится о редкую плазму короны. Это взаимодействие приводит к компрессии плазменной оболочки до формирования ударной волны торможения лайнера.

На стадии безударного торможения сильноизлучающего лайнера за счет потерь на излучение давление в лайнере обусловлено главным образом давлением магнитного поля, и процесс сжатия оболочки может быть описан в рамках модели МГД сильноизлучающей плазмы ³. Из модели следует, что на безударной стадии торможения лайнера о разлетающуюся плазму с экспоненциальным профилем плотности с характерным размером $d = c_s t$ (c_s - скорость звука, t - время абляции стержня) лайнер сжимается до плотности

$$\rho \sim \frac{M}{2\pi r_k} \left(\frac{\sigma V}{c^2 d} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

где M - погонная масса лайнера, r_k - его радиус в конце сжатия, σ - проводимость плазмы лайнера на стадии безударного торможения. Повышение плотности лайнера в процессе компрессии приводит к росту мощности излучения и давления на конечной стадии торможения в сформировавшейся ударной волне:

$$W_{rad} \sim \frac{\rho V^3}{2}, \quad P \simeq \rho V^2. \quad (2)$$

Кратко рассмотрим результаты проведенных с помощью программного комплекса "РАЗРЯД" ⁶ расчетов по ускорению ксенонового лайнера с начальным размером $R = 1,65$ см, погонной массой $M = 140$ мкг/см при амплитуде тока $I = 2,5$ МА и соударению с молибденовым стержнем диаметром 2 мм. Лайнер ускоряется до скорости $V = 4 \cdot 10^7$ см/с. На стадии ускорения плазма лайнера неизотермична. Электронная компонента нагревается до 40 эВ. Излучение лайнера вызывает абляцию стержня, скорость разлетающейся плазменной короны достигает $3 \cdot 10^6$ см/с. Разлет сильноизлучающей плазмы в результате абляции под действием теплового излучения происходит почти изотермически. Поэтому профиль плотности разлетающейся плазмы близок к экспоненциальному. Торможение лайнера о плазму с нарастающей плотностью приводит к сжатию его по толщине. Причем на первой стадии торможения давление магнитного поля в лайнере (тепловое давление мало за счет охлаждения плазмы через излучение) обеспечивает безударное торможение. К моменту формирования МГД ударной волны плотность лайнера достигает $0,3$ г/см³. При торможении лайнера в ударной волне излучение и давление достигают максимальных значений $W/t=134,44\text{нс} = 7,7 \cdot 10^{13}$ Вт/см² и $P/t=134,44\text{нс} \approx 350$ Мбар. Область генерации излучения и давления в этот

момент сосредоточена вблизи контактной границы плазмы лайнера и стержня (рис. 1). За счет малой толщины лайнера импульсы излучения (рис. 2) и

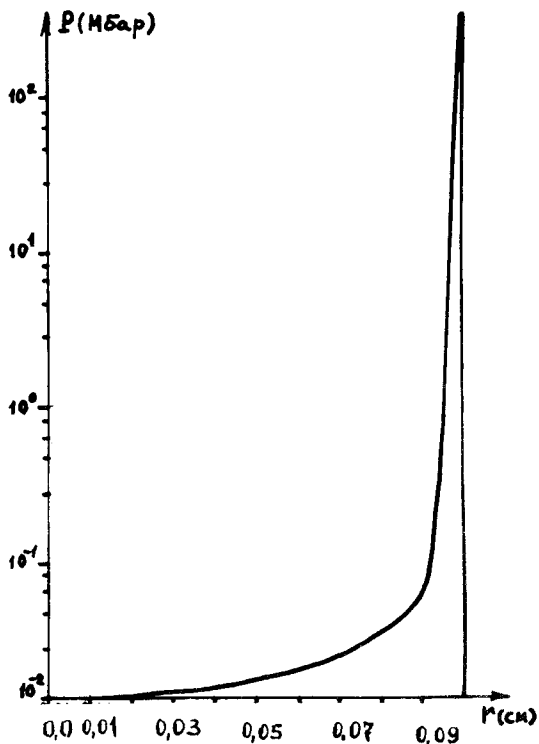


Рис. 1. Распределение давления по радиусу в момент достижения максимума при $t = 134.44$ нс (стрелкой указано положение контактной поверхности между плазмой лайнера и стержня)

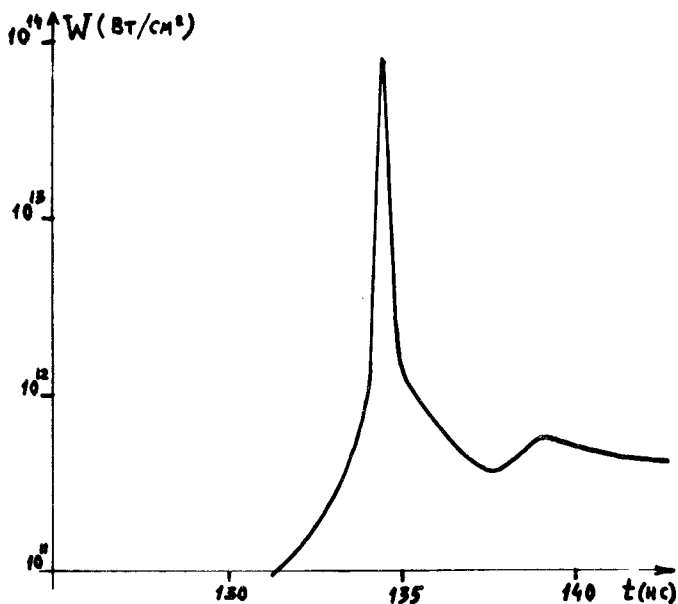


Рис. 2. Импульс излучения с единицы поверхности ксенонного лайнера

давления спадают за время $\sim 0,2$ нс. При этом излучается около 90% кинетической энергии лайнера $E_{кин} = 10$ кДж/см. В дальнейшем лайнер вместе со стержнем излучают длительное время за счет джоулева нагрева. Общая излученная энергия составляет 20 кДж/см.

После разгрузки импульса давления внутрь стержня распространяется ударная волна с давлением $P \approx 0,5$ Мбар. По мере схождения ударной волны к оси стержня за счет куммуляции давление вновь нарастает. В момент времени 590 нс давление достигает максимума, равного 6,3 Мбар, на оси. В результате разгрузки ударной волны после куммуляции материал стержня разлетается.

С увеличением амплитуды тока, протекающего по лайнеру, оптимальное значение его массы и плотность возрастают пропорционально квадрату амплитуды тока ⁷. В результате этого возрастут мощность импульса излучения и давление, пропорциональные величине плотности лайнера согласно соотношениям (2). Таким образом применение лайнеров позволит проводить исследования, например по уравнениям состояния, в мультимегабарном диапазоне давлений.

В заключение выражаем благодарность А.Ю.Круковскому и К.В.Скороварову за сотрудничество при проведении расчетов.

Литература

1. Вихарев В.Д., Захаров С.В., Смирнов В.П., Царфин В.Я. II Международная конференция по высокоплотным пинчам. Лагуна Бич, США, 1989.
2. Spielman R.P., Hammel B.A., Hanson D.L. et al. 2nd Int. Conf. on High Density Pinches. Laguna Beach, CA USA, 1989, A-1.
3. Григорьев С.Ф., Захаров С.В. Письма в ЖТФ, 1987, 13, 616.
4. Вихарев В.Д., Волков Г.С., Захаров С.В. и др. Физика плазмы, 1990, 16, 379.
5. Spielman R.P., Hussey T.W., Hanson D.L. et al. Vth Int. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics. 1989, Novosibirsk, 21.
6. Гасилов В.А., Круковский А.Ю. Комплекс программ РАЗРЯД для расчета уравнений одномерной МГД в осесимметричном случае. Препринт N78. ИПМ АН СССР, 1987.
7. Бехтев М.Б., Вихарев В.Д., Захаров С.В. и др. ЖЭТФ, 1989, 95, 1653.