

## ОБРАЗОВАНИЕ ПЛАЗМЕННОГО ПРЕДВЕСТНИКА ПРИ СХЛОПЫВАНИИ МНОГОПРОВОЛОЧНЫХ ЛАЙНЕРОВ

*И.К.Айвазов, В.Д.Вихарев, Г.С.Волков,  
Л.Б.Никандров, В.П.Смирнов, В.Я.Царфин*

Приведены результаты исследования начального этапа схлопывания многопроволочных лайнеров. Изучена динамика формирования плазменного предвестника, измерена скорость движения радиальных потоков  $((2 \div 3) \cdot 10^7$  см/с), установлен электродинамический характер их ускорения. проведено численное моделирование этого процесса.

В исследованиях по схлопыванию лайнеров  $1-7$  особый интерес представляет режим сжатия компактной оболочки  $^2$ , когда она служит эффективным обострителем мощности генератора. Однако имеются экспериментальные свидетельства  $^3, 4, 6$ , что до прихода основной массы лайнера в центр на оси появляется токонесущая плазма, ухудшающая компактность сжатия.

Целью нашей работы было получение экспериментальных данных динамики сжатия лайнера на начальном этапе. В экспериментах использовался лайнер из  $4 \div 24$  медных или алюминиевых проволочек с погонной массой проволоки  $M = 15 \div 30$  мкг/см. Проволочки располагались по цилиндрической образующей радиусом  $R = 1,5 \div 0,75$  см. Амплитуда тока через каждую проволочку достигала 500 кА.

Анализ полученных результатов показывает, что в зависимости от амплитуды тока через лайнер и параметра  $MR^2$  за  $15 \div 40$  нс до схлопывания основной массы наблюдается вспышка МР излучения. Кадровые рентгеновские ЭОПограммы свидетельствуют об образовании в этот момент на оси лайнера плазменного цилиндрического канала, который является основным источником мягкого рентгеновского излучения (МР). На рис. 1 приведена ЭОПограмма, полученная на рентгеновском ЭОП е за 40 нс до прихода на ось основной массы проволочек. Видно, что проволочки к этому времени переместились как целое к оси лайнера на 2,5 мм с начального радиуса 7,5 мм. Изображение "горячих точек" на двух проволочках, направления движения которых перпендикулярны направлению наблюдения, вытянуты вдоль радиальных направлений, что позволило (с учетом длительности экспозиции) оценить значение скорости проволочек. Эта величина оказалась равной  $(1 \div 2) \cdot 10^7$  см/с. Размер осевого форплазменного образования составил около 1 мм. Для исследования динамики его образования были сняты кадровые МР обскурограммы. При этом как и в работе  $^4$ , но уже в МР излучении, видны плазменные потоки, ускоренные от отдельных неподвижных проволочек к оси лайнера. Фрагмент соответствующей кадровой ЭОПограммы показан на рис. 2. Скорость движения потоков на рис. 2 составляет  $2 \cdot 10^7$  см/с. Отношение радиальной скорости к поперечной близко к 10, что свидетельствует об электродинамическом механизме ускорения плазмы.

Анализ полученных экспериментальных данных позволяет рассматривать динамику начальной стадии схлопывания многопроволочной системы следующим образом. При протекании по одной проволочке тока порядка несколько сотен кА проволочка взрывается, и образовавшийся плазменный канал расширяется со скоростью  $(2 \div 5) \cdot 10^6$  см/с<sup>4</sup>. К моменту, когда плазма взорванных проволочек начинает смещаться к оси, она имеет поперечные размеры  $\rho \sim 0,1$  см. Из-за неоднородной плотности плазменного канала отдельной проволочки по радиусу, даже при равномерном распределении тока по сечению отдельной взорванной проволочки, ускорение плазмы к оси лайнера существенно зависит от ее расстояния до оси отдельного плазменного канала. В результате электродинамического ускорения редкой, расположенной ближе к оси лайнера плазмы, формируются радиальные сходящиеся сверхзвуковые плазменные потоки с поперечным размером порядка  $\rho$  (рис. 2), что позволяет воспользоваться одномерной МГД-моделью ускорения сплошных лайнеров<sup>8</sup> для расчетно-теоретического анализа возникновения предвестника. Результаты одного из вариантов численного расчета движения лайнера, приведены на рис. 3, где показаны радиальные распределения плотности плазмы  $n_i$  через 50, 90, 100 и 108 нс после начала тока. Видно, что к 90-й наносекунде

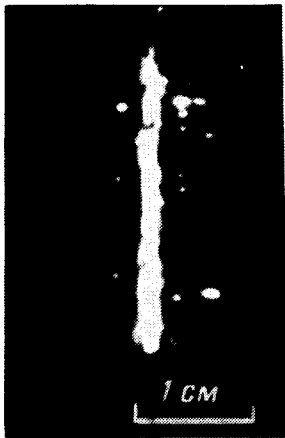


Рис. 1

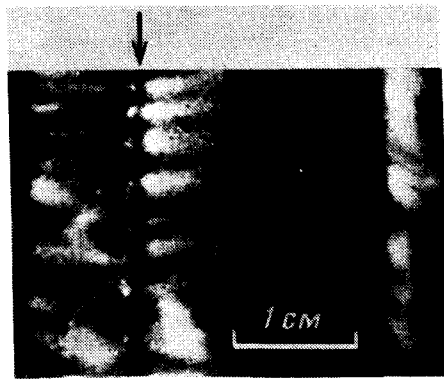


Рис. 2

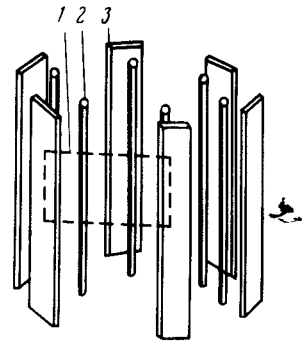


Рис. 1. Кадровое рентгеновское изображение лайнера, полученное за 40 нс до схлопывания. Длительность экспозиции 5 нс

Рис. 2. Фрагмент кадрового рентгеновского изображения начальной стадии схлопывания лайнера и рисунок, поясняющий геометрию регистрации и расположение проволочек и обратных токопроводов. Длительность экспозиции – 15 нс. 1 – обратный токопровод, 2 – проволочки лайнера, 3 – поле зрения ЭОП а

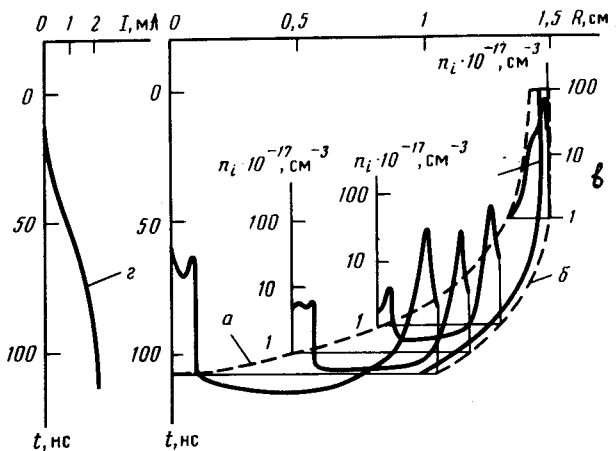


Рис. 3. Зависимость профиля плотности  $n_i$  от времени: а, б – положение внутренней и внешней границ лайнера, между кривыми а и б сосредоточена половина массы лайнера; з – ток, протекающий по лайнеру. Погонная масса лайнера – 65 мкг/см

сформировался ярковыраженный плазменный предвестник; по-существу, лайнер расслаивается на две оболочки. В дальнейшем ( $t \approx 100$  нс) возможна более тонкая радиальная структура плотности плазмы. После появления плазмы на оси ( $t \approx 110$  нс) процесс схлопывания

с длительностью 20 – 30 нс представляет собой последовательное ускорение внутренних плазменных слоев на фоне движения всей массы к центру как целого. Следует отметить, что используемое нами приближение, не учитывающее топологию магнитного поля многопроволочного лайнера, занижает длительность процесса схлопывания.

Из расчетов следует, что возникновение предвестника существенно не изменяет величину кинетической энергии, переданной в оболочку оптимальной массы <sup>8</sup>, но препятствует заметному обострению мощности. Таким образом, исследование формирования плазменного предвестника при токах через проволочку в диапазоне 150 ÷ 500 кА наглядно демонстрирует необходимость учета этого явления при анализе процессов термализации энергии электродинамически ускоренных оболочек.

#### Литература

1. *Мохов В.Н. и др.* Докл. АН СССР, 1979, **247**, 83.
2. *Алиханов С.Г. и др.* Письма в ЖТФ, 1979, **5**, 1395.
3. *Benjamin R.F. et al.* Appl. Phys. Lett., 1981, **39**, 848.
4. *Дорохин Л.А. и др.* Препринт ИАЭ, №3814/7, М., 1983, с.21.
5. *Бакулин Ю.Д. и др.* ПМТФ, 1980, №6, 7.
6. *Бакшт Р.Б. и др.* Физика плазмы, 1983, **9**, 1224.
7. *Боголюбский С.Л. и др.* Письма в ЖТФ, 1985, **11**, 1271.
8. *Конкашбаев И.К. и др.* Кн: Доклады 3-ей Всес. конф. по инж. пробл. термояд. реакторов. т. I М.: ЦНИИатоминформ, 1984, 252.

Поступила в редакцию  
17 ноября 1986 г.