

Токовый слой в гибридном газоплазменном лайнере

В. Кокшенев, А. Шишилов, Р. Чердизов, Н. Курмаев*

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

**vak@oit.hcei.tsc.ru*

Аннотация. На мегаамперном генераторе ГИТ-12 проведены эксперименты по имплозии гибридных лайнеров с внешней плазменной оболочкой. Исследованы динамика и характеристики токовой оболочки с помощью магнитных зондов, электрофизических и оптических измерений. Гребенка из магнитных зондов в виде одновитковой петли диаметром 1.1 мм, закрытой экраном из константана толщиной 3 мкм, устанавливалась на сеточном катоде с интервалом 3 см, начиная с радиуса 3 см. Показано существенное влияние расположения магнитного зонда над катодной поверхностью на величину регистрируемого им тока. Полученный результат связан с определяющим влиянием катодной плазмы на физические процессы, проходящие в токовом слое на всех стадиях его эволюции. Величина тока в оболочке при имплозии, как минимум, до радиуса 3 см соответствует амплитуде тока на входе Z-пинча с точностью ошибки измерения (~10%). Оценка массы гибридного лайнера по модели «снежного плуга» показала, что в токовой оболочке находится часть от всей ускоряемой массы газа Z-пинча.

Ключевые слова: Z-пинч, магнитный зонд, токовая оболочка.

1. Введение

Цикл работ [1–4], проведенных на мегаамперном генераторе ГИТ-12, по имплозии в микросекундном режиме газоплазменных лайнеров указывает на то, что процесс движения вещества к оси системы в значительной мере определяется динамикой токового слоя (ТС). Использование внешней плазменной оболочки за счет формирования симметричной и компактной токовой оболочки на начальном этапе имплозии газовых лайнеров с внешнего диаметра 32 см позволило стабилизировать процесс сжатия вещества до диаметра пинча в несколько миллиметров. В результате в 1.5–2 раза увеличена энергия и мощность излучения неона в К-линиях [4] и на порядок величины возрос нейтронный выход при имплозии дейтериевого лайнера [5]. Исследования с помощью магнитных зондов (*B-dot*) сжатия лайнеров под действием импульса тока амплитудой до 4 МА и фронтом ~1 мкс показали, что и для газовых и металло-плазменных лайнеров [1] ширина токового слоя уменьшается по мере движения к оси от ~3–4 см на диаметре ~18 см до ~1–1.5 см на диаметрах 6 и 4 см с увеличением средней плотности тока с ~10 кА/см² до ~50 кА/см². Такие высокие плотности тока нельзя объяснить термо-, авто- или фотоэмиссиями. Очевидно, что на катоде образуется плотная взрывоэмиссионная плазма, которая и обеспечивает эмиссию с плотностью тока в десятки кА/см². Эта плазма высокой концентрации будет расширяться в межэлектродный зазор, а ее фронт становится эмитирующим катодом. На границе между плотной катодной плазмой и инжектированной анодной формируется двойной слой, как это имеет место в плазменных прерывателях тока [7, 8]. Динамика ТС при имплозии газоплазменных лайнеров – это суть эволюция и динамика прикатодного двойного слоя и токовой оболочки, сформированной инжектированными с катодной плазмы электронами. В данной работе приведены экспериментальные данные, связанные с функционированием токовой оболочки при имплозии газоплазменных лайнеров.

2. Эксперименты с газоплазменным лайнером

Схема эксперимента с гибридным газоплазменным лайнером приведена на Рис.1. Внешняя плазменная оболочка формировалась на диаметре 350 мм 48 ПП капиллярного типа. Кольцевое сопло на диаметре 80 мм использовалось для инъекции дейтерия, сплошная струя из аргона в центре создавалась соплом диаметром 20 мм. Для измерения формы и

амплитуды импульса тока использовались индуктивные канавки, сигнал с которых пропорционален производной тока в месте измерения. Датчики dI_g/dt установлены на сборном электроде центрального узла (ток I_g), а датчик dI_z/dt на входе Z-пинч нагрузки (ток I_z). В наших экспериментах токи I_g и I_z были равны. Делитель напряжения регистрировал напряжение $U_l(t)$ на сборном электроде центрального узла ГИТ-12. Для измерения динамики ТС использованы магнитные зонды ($B\text{-dot}$). $B\text{-dot}$ представляли собой одновитковые петли диаметром 1.1 мм, закрытые экраном из константана толщиной 3 мкм. Зонды устанавливались на катоде внутри отверстий в сетке прозрачностью 81% на радиусах 2, 3, 6, 9 и 13 см. Для регистрации движения оболочки в оптическом диапазоне использованы хронограф ФЭР-7, 4-х кадровая камера HSFC-Pro со временем экспозиции 3 нс либо 2-х кадровый электронно-оптический комплекс Nanogate frame-9 с экспозицией 10 нс.

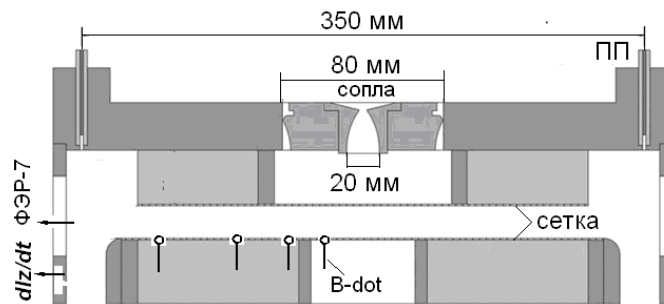


Рис.1. Схема эксперимента на генераторе ГИТ-12: ПП – 48 плазменных пушек на $\varnothing 350$ мм, сопла на $\varnothing 80$ мм и $\varnothing 20$ мм, $B\text{-dot}$ – магнитные зонды на катодном электроде, dI_z/dt – датчик тока, ФЭР-7 – хронограф.

Электрофизические измерения позволяли рассчитывать индуктивность участка схемы от сборного электрода до нагрузки $L_v(t) = \int U_l(t) dt / I_g(t)$. Величина $L_v(t)$ есть сумма двух участков цепи нагрузки $L_v(t) = L_0 + L_z(t)$, где $L_0 \cong 20$ нГн – постоянная индуктивность участка цепи от сборного электрода до Z-пинч нагрузки, а $L_z(t)$ – переменная индуктивность Z-пинч нагрузки в процессе имплозии лайнера. В то же время величина индуктивности – это суть профиль узла конструкции, который соответствует протеканию центра тяжести ТС. Величина индуктивности $L_v(t)$, полученная нами из осциллограмм тока и напряжения в момент времени, когда ток $I_{B\text{-dot}}$ магнитного зонда достигает амплитуды центра тяжести токового слоя оболочки, соответствует, с точностью ≤ 0.1 нГн, индуктивности узла нагрузки до места установления данного $B\text{-dot}$. Данный факт позволяет считать, что диагностика динамики ТС с помощью $B\text{-dot}$, соответствует процессу эволюции ТС в газоплазменной Z-пинч нагрузке. При этом важно знать, насколько точны полученные нами величины тока в ТС по мере его движения к центру. Наши измерения величин токов ТС с помощью $B\text{-dot}$, установленных на разных радиусах от оси системы, но на одном уровне (зонд над сеткой) относительно поверхности катода, показывают, что имеет место уменьшение амплитуды тока $I_{B\text{-dot}}$ магнитного зонда относительно тока генератора I_g по мере движения ТС к центру. В наших экспериментах с разными Z-пинч нагрузками, как правило, начиная с радиуса 6 см, амплитуды токов $I_{B\text{-dot}}$ с уменьшением радиуса установки $B\text{-dot}$ падают, так что $I_{B\text{-dot}}(r = 2 \text{ см}) < I_{B\text{-dot}}(r = 3 \text{ см}) < I_{B\text{-dot}}(r = 6 \text{ см}) < I_{B\text{-dot}}(r = 9 \text{ см}) \cong I_{B\text{-dot}}(r = 13 \text{ см}) \cong I_g$. Вопрос о величине тока, протекающего в сформировавшемся на оси пинче, крайне важен для понимания процесса имплозии и его влияния на характеристики излучения высокотемпературной плазмы Z-пинчей.

Для выяснения влияния расположения $B\text{-dot}$ относительно поверхности катодной сетки был проведен эксперимент с магнитными зондами, установленными на радиусе 6 см. Четыре

зонда одинаковой конструкции располагались попарно в диаметрально противоположных направлениях по схеме: 2 зонда – в обычном стандартном положении (петля диаметром 1.1 мм полностью над сеткой), 2 зонда – либо полностью под сеткой (–1 мм), либо подняты над сеткой на +3 мм. Результат эксперимента приведен на Рис.2 и Рис.3. На осциллограммах Рис.2 видно, что амплитуда тока IK_2 , регистрируемая $B\text{-dot}$ на радиусе 6 см, увеличивается при выдвигении датчика в межэлектродный зазор. На Рис.3 приведен график зависимости доли тока зонда IK_2 на радиусе 6 см относительно тока генератора I_g в зависимости от расположения $B\text{-dot}$ относительно катодной сетки. Пунктиром показана линейная аппроксимация графика. Мы оцениваем погрешность измерения амплитуды тока $\sim 10\%$. Отдельно указанные точки 1_{+1} и 1_{+5} получены для $B\text{-dot}$ на радиусе 3 см в эксперименте с аргоновым лайнером с внешней плазменной оболочкой, 1_{+1} – стандартное положение датчика, 1_{+5} – датчик поднят на 5 мм ($h = 5$ мм). Мы считаем, что полученный результат указывает на сложную структуру ТС в прикатодной области и его эволюцию в процессе имплозии Z-пинч нагрузки. При движении ТС к центру с уменьшением радиуса токовой оболочки и увеличением амплитуды тока в ней мы фиксируем значительный рост плотности тока с ~ 10 кА/см² до ~ 50 кА/см². Это может привести к росту скорости расширения катодной плазмы и напряжения на двойном слое с увеличением его толщины [7]. В результате часть тока может протекать за пределами площади витка $B\text{-dot}$. Наличие плотной приэлектродной плазмы регистрируется и камерой HSFC-Pro [1–3].

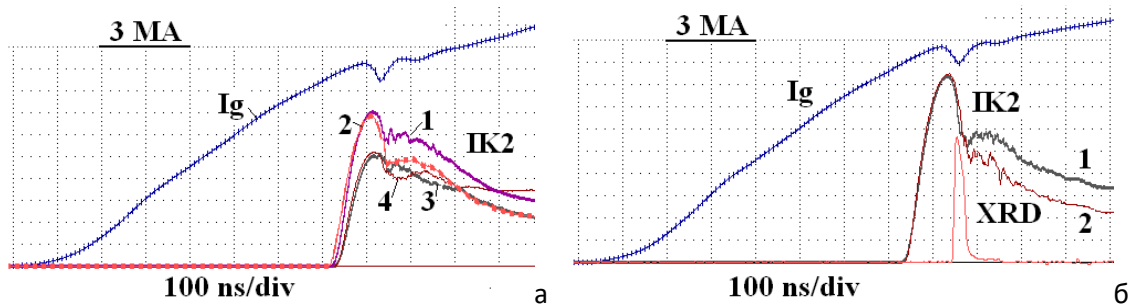


Рис.2. Осциллограммы токов на входе Z-пинча (I_g) и на $B\text{-dot}$ (IK_2) на радиусе 6 см: а – осциллограммы 1, 2 – зонды над сеткой +1 мм, 3, 4 – под сеткой; б – осциллограммы 1, 2 зонды над сеткой +3 мм, XRD – сигнал рin-диода, установленного на анодном фланце узла нагрузки на диаметре ~ 18 см.

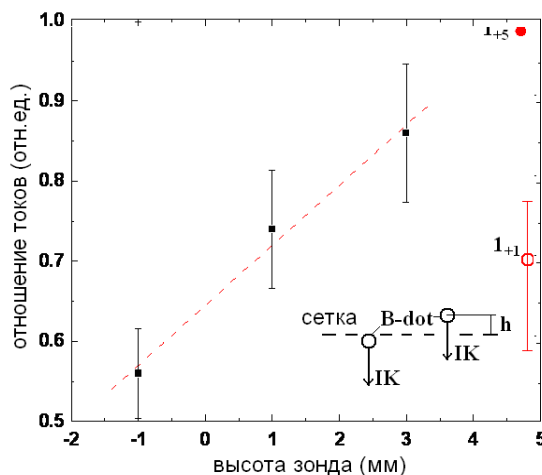


Рис.3. График отношения тока $B\text{-dot}$ к току генератора IK/I_g в зависимости от положения $B\text{-dot}$ относительно плоскости катодной сетки h . Точки 1_{+1} и 1_{+5} получены для $B\text{-dot}$ на радиусе 3 см в эксперименте с аргоновым лайнером с внешней плазменной оболочкой, 1_{+1} – стандартное положение датчика (полностью над сеткой), 1_{+5} – датчик поднят на 5 мм в межэлектродный зазор ($h = 5$ мм).

Временная развертка имплозии гибридного лайнера с помощью хронографа ФЭР-7 регистрирует появления свечения на диаметре ~ 3.5 см за 70–80 нс до формирования пинча на оси. В это время ТС шириной ~ 2 см прошел *B-dot* на диаметре 12 см, но его фронт не достиг *B-dot* на диаметре 6 см, как правило, хронограммы регистрируют расслоение сходящейся оболочки: кроме основного яркого слоя (конуса) с некоторым запаздыванием регистрируется второй менее яркий, но движущейся с большей скоростью слой (конус). Были выполнены эксперименты с изменением структуры лайнера. Основной вариант – внешняя плазменная оболочка (ПП) плюс дейтериевая оболочка (D_2) и внутренняя аргоновая (Ar) – (ПП+ D_2 +Ar) и промежуточные – (D_2 +Ar) и (ПП+Ar). На Рис.4 приведены хронограммы имплозии этих вариантов компоновки лайнера. На временных развертках 1 и 3 видно, что внешняя с большей скоростью оболочка сливается с внутренней на радиусе ~ 1 см. На хронограмме 2, при отсутствии дейтерия, такого расслоения нет. Средняя скорость ТС на промежутке между радиусами 9 см и 6 см составляет ~ 25 см/мкс, а финальная скорость сжатия – ~ 40 см/мкс. Ускорение ионов может происходить только в электрическом поле. В нашем случае в ТС возникает самосогласованное электрическое поле, обусловленное эффектом Холла и направленное к оси системы: $E_r \sim j_z B_\phi / en$. Естественно предположить, что кинетическая энергия ионов в ТС соответствует разности потенциалов по ширине слоя ($M_i v^2 \sim 2eU$). Тогда для D_2 ($A = 2$) при $v = 25$ см/мкс $U \sim 0.65$ кВ, а для $v = 40$ см/мкс $U \sim 1.7$ кВ, а для Ar ($A = 40$) соответственно – $U \sim 13$ –30 кВ.

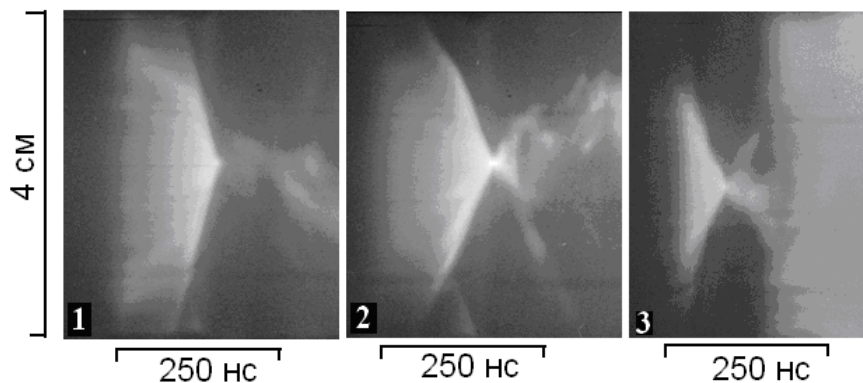


Рис.4. Хронограммы имплозии газоплазменных лайнеров для разных вариантов компоновки: 1 –выстрел #2931 (48ПП+ D_2 +Ar), 2 – #2934 (48ПП+Ar), 3 – #3059 (D_2 +Ar).

По импульсу ускоряющей силы $d(m(t)v(t))/dt = -\mu_0 I g^2(t)/4\pi R(t) = F_{mr}$ [8] и средней скорости v_r токовой оболочки, вычисленной по показаниям магнитных датчиков на интервалах между точками установки *B-dot* на радиусах 13, 9, 6 и 3 см, оценена погонная масса $m(t)$ ускоряемого вещества лайнера в зависимости от времени $\int F_{mr} dt \sim m v_r$. На Рис.5 приведены результаты расчетов для выстрела #2922 (48ПП+ D_2 +Ar): график 1 показывает изменение массы лайнера в процессе имплозии, график 2 – начальное распределение массы по радиусу. График 3 получен из расчета, в котором величина F_{mz} определялась из токов, регистрируемых зондами *B-dot*. Обработка серии выстрелов с гибридным лайнером показала, что в ТС сосредоточена только часть из увлекаемого в ускорение вещества лайнера (~ 50 –70 %). Можно предположить, что при сверхзвуковой скорости часть массы лайнера сосредоточена в ударной волне, формирующейся на фронте ТС при превышении концентрации вещества лайнера пороговой величины $\sim 10^{16}$ см $^{-3}$, когда длина пробега атомов до ионизации и перезарядки становится меньше ширины ТС. А небольшая часть газа может оставаться за ТС, который в начальной стадии разряда на внешней границе Z-пинча является прозрачным и не работает в режиме магнитного поршня.

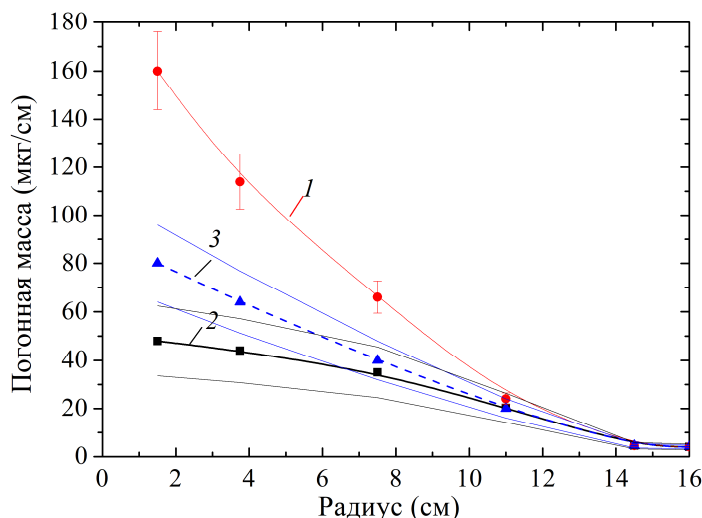


Рис.5. Графики погонной массы гибридного лайнера (48ПП+D2+Ar) (расчет по модели «снежного плуга»):
 1 – изменение массы лайнера в процессе имплозии, 2 – начальное распределение массы лайнера, 3 – масса лайнера в ТС.

Численное моделирование в рамках трехжидкостной МГД-модели указывает на возможность формирования ударной волны на фронте токовой оболочки при плотности газа $\sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$ [9]. Исследования имплозии газовых лайнеров на генераторе «Кобра» в работе [10] с использованием лазерной интерферометрии с пространственным разрешением профиля потока, температуры и электронной плотности показали, что токовая оболочка, сжимающая газовый аргоновый лайнер, имеет концентрацию электронов $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$, температуру $\sim 100 \text{ эВ}$ и толщину несколько мм. Плотная кольцевая плазменная оболочка сжимает газ к оси в режиме магнитного поршня. Авторы указывают, что глубина проникновения ионов к центру Z-пинча во всех случаях превышает толщину оболочки. Зарегистрированное в наших экспериментах опережающее фронт ТС свечение газа может быть следствием процесса инжекции ионов [10] в увлекаемый в ускорение газ. Фронт этого процесса может двигаться к оси системы со скоростью большей, чем скорость фронта ТС. Нельзя исключить и возможность формирования на фронте ударной волны токового предвестника в результате скачка скоростей и электрического поля в этой области [9].

3. Заключение

В проведенных на генераторе ГИТ-12 исследованиях получены экспериментальные данные о характеристиках токовой оболочки при амплитудах тока до 3 МА и микросекундном режиме имплозии гибридных лайнеров. Используемые нами в экспериментах экранированные одновитковые магнитные зонды диаметром 1.1 мм при стандартной установке (виток над поверхностью катодной сетки) показывают, что имеет место уменьшение амплитуды тока $I_{B\text{-dot}}$ относительно тока генератора I_g по мере движения ТС к центру. Одновременно увеличивается средняя плотность тока с единиц кА/см^2 до десятков кА/см^2 . Функционирование ТС с такой плотностью тока должно быть связано с образованием плотной взрывоэмиссионной катодной плазмы, расширяющейся в межэлектродный зазор, фронт которой становится эмитирующим катодом. В результате смещения границы эмиссии от электрода в плазму возможна локализация части тока вне

зоны регистрации магнитного зонда. Эксперимент с магнитными зондами, внесенными в межэлектродный зазор, подтверждает возможность такого сценария: амплитуды тока с этих $B\text{-dot}$ практически соответствуют току генератора I_g , по крайней мере, до радиуса 3 см. Магнитный зонд в межэлектродном зазоре является отрицательным фактором для процесса имплозии и формирования пинча и в эксперименте по исследованию эффективности гибридного лайнера не использовался. Регистрация свечения в моменты времени, опережающие приход ТС в данную область Z-пинча, может быть связана с процессами возбуждения и ионизации в ударной волне и с проникновением быстрых ионов за фронт ТС в область ударной волны. Выяснение механизма этого явления является нашей ближайшей задачей.

Благодарность

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-01554.

5. Литература

- [1] Kokshenev V.A., Rousskikh A.G., Shishlov A.V., Zhigalin A.S., Kurmaev N.E., Baksht R.B., Cherdizov R.K., Oreshkin V.I., *7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE)*, Tomsk, Russia, 217, 2020; doi: 10.1109/EFRE47760.2020.9241970
- [2] Shishlov A.V., Kokshenev V.A., Rousskikh A.G., Cherdizov R.K., Kurmaev N.E., Zhigalin A.S., Fursov F.I., Oreshkin V.I., *7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE)*, Tomsk, 61, 2020; doi: 10.1109/EFRE47760.2020.9242061
- [3] Cherdizov R.K., Kokshenev V.A., Shishlov A.V., Baksht R.B., Oreshkin V.I., Rousskikh A.G., Zhigalin A.S., *7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE)*, Tomsk, 55, 2020; doi: 10.1109/EFRE47760.2020.9241935
- [4] Шишлов А.В., Кокшенев В.А., Курмаев Н.Е., Лабетская Н.А., Фурсов Ф.И., Чердизов Р.К., *Изв. ВУЗов. Физика*, **62**(7), 137, 2019; doi: 10.17223/00213411/62/7/137
- [5] Klir D., Shishlov A.V., Kokshenev V.A., Kubes P., Labetsky A/Yu., Rezac K., Cherdizov R.K., Cikhardt J., Cikhardtova B., Dudkin G.N., *Plasma Phys. Control. Fusion*, **57**, 044005, 2015; doi: 10.1088/0741-3335/57/4/044005
- [6] Иваненков Г.В., *ЖТФ*, **61**(5), 46, 1991 [online]; <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/24594>
- [7] Кингсеп А.С., Севастьянов А.А., *Физика плазмы*, **17**(10), 1183, 1991.
- [8] Rousskikh A.G., Zhigalin A. S., Oreshkin V. I., *Tech. Phys.*, **61**(5), 676, 2016; doi: 10.1134/S1063784216050194
- [9] Ананин С.И., Вихрев В.В., Филиппов Н.В., *Физика плазмы*, **4**, 315, 1978.
- [10] Lavine E.S., Rocco S.V.R., Potter W.M., Angel J., Freeman E., Banasek J.T., Lawson J, Greenly J.B., Wilhelm H., Hammer D.A., Kusse B.R., *Phys. Plasmas*, **29**, 062702, 2022; doi: 10.1063/5.0084352