

ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ЭЛЕКТРОННОГО ПОТОКА С БОЛЬШИМ ν/γ
С ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАГРЕТОЙ ПЛОСКОЙ МИШЕНЬЮ.

*В.А.Грибков, А.В.Дубровский, А.И.Исаков,
Т.А.Козлова, О.Н.Крохин, В.Я.Никулин,
О.Г.Семенов, Г.В.Оклизков*

Показано, что поглощение релятивистского электронного потока с плотностью 10^{13} *вт/см²* превышает классическое при его взаимодействии с предварительно нагретой плазмой.

В работах [1,2] рассматривалась возможность увеличения энерговклада релятивистского электронного пучка в плотную плазму. В данной работе будет показано, что предварительный подогрев твердой мишени приводит к повышению коэффициента поглощения потока релятивистских электронов.

1. Исследования проводились на установке "Плазменный фокус" (ПФ)¹⁾ [3] с энергией батареи 50 кдж, напряжением зарядки 27 кв, заполняемого дейтерием при давлении 0,5 тор. Наряду со стандартными методами измерения параметров плазмы, применялось теневое и интерферометрическое пятикадровое фотографирование ее с помощью лазера на рубине (длительность импульса 1 нсек, расстояние между кадрами порядка 20 нсек), а также однокадровое шпирен-фотографирование [4].

2. Тенеграммы и интерферометрия показали, что в процессе кумуляции токовой оболочки к оси камеры со скоростью порядка $3 \cdot 10^7$ см/сек диаметр пинча уменьшается до величины порядка $1 \div 1,5$ см. Затем пинч слегка расширяется, охлаждается и без дальнейших пульсаций удерживается с постоянным диаметром $2 \div 2,5$ см с плотностью $(2 - 3) \cdot 10^{18}$ см⁻³ в течение периода времени порядка 50 - 70 нсек вплоть до обрыва токовой оболочки [5]. Оценка температуры плазмы в этот период следует из баланса магнитного и газокинетического

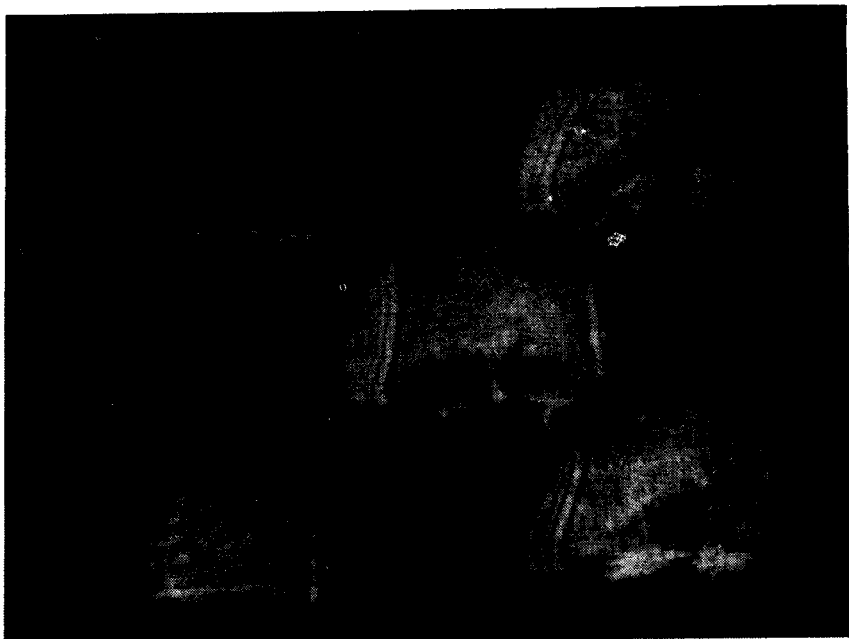


Рис. 1

¹⁾ Плазменный фокус создан совместно с ИАЭ им. И.В.Курчатова.

давлений $T \approx 150 \text{ эв}$. Кинетическая энергия кумулирующей плазменной оболочки и энергия, запасенная в магнитном поле, оказываются равными $E_{\text{кин}} \approx E_H \approx 10 \text{ кдж}$.

3. После обрыва тока в ПФ [5] образуется мощный поток электронов со средней энергией электронов $\mathcal{E}_e \approx 100 \text{ кэв}$. На рис. 1 приведена 5-кадровая тенеграмма, демонстрирующая процесс его самофокусировки [1,8]. На этой тенеграмме также хорошо видно, что до того, как этот поток сфокусировался (1-й и 2-й кадры), от медного анода внутри токовой оболочки пинча движется плазма, образовавшаяся при испарении анода за счет нагрева током, электронной и лучистой теплопроводностью из плазмы пинча и при классическом взаимодействии пучка и обратного тока с анодом в процессе самофокусировки. Из тенеграммы нетрудно рассчитать скорость движения плазмы (границы непрозрачности), которая равна $2 \cdot 10^6 \text{ см/сек}$. Поскольку скорость вблизи поверхности анода близка к звуковой, оценка температуры этой плазмы дает $T_K \leq 100 \text{ эв}$. По измерению коэффициента поглощения излучения рубинового лазера в этой плазме можно определить ее плотность — $N_e \sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$, что на порядок величины выше плотности в пинче.

4. Из электротехнического расчета индуктивного накопителя с быстрым размыкателем, нагруженного на активное сопротивление (в нашем случае — электронный поток), нетрудно, зная полную энергию, запасенную в магнитном поле, оценить энергию этого потока [7]: $E_{\text{рзп}} \approx 6 + 8 \text{ кдж}$. В нашем случае ток электронного потока $I_{\text{рзп}}$ оказывается порядка полного тока $I_{\text{пинч}}$ через пинч в этот момент времени, что доказывается измерениями по ширен-фотографированию длины фокусировки, а также инкремента и волнового числа шланговой неустойчивости, величины которых совпадают с теоретическими значениями [1] только при условии $I_{\text{рзп}} \approx I_{\text{пинч}}$. Отметим, что в нашем случае шланговая неустойчивость не приводила к обрыву потока, а точка фокусировки не смещалась со своего первоначального места на аноде.

Оценка полной энергии потока электронов по абсолютным измерениям жесткого рентгеновского (ЖР) излучения как методом ядерных эмульсий, так и фотоумножителями дает величину порядка $2 - 4 \text{ кдж}$. Минимальный диаметр сфокусировавшегося электронного потока вблизи анода составил величину $\leq 1 \text{ мм}$, что соответствует плотности потока $5 \cdot 10^{12} - 10^{13} \text{ вт/см}^2$. Важным является тот факт, что к моменту времени, когда заканчивается самофокусировка пучка, импульс ЖР излучения спадает по амплитуде практически до нуля, тогда как магнитный канал РЭП виден еще в течение $20 - 50 \text{ нсек}$ после исчезновения импульса ЖР-излучения.

5. На рис. 2 приведена 5-кадровая тенеграмма, полученная в период времени, следующий за окончанием самофокусировки РЭП. Хорошо видна ударная волна в дейтериевой плазме пинча, толкаемая "факелом", образованным при взаимодействии сфокусированного РЭП с прогретой плазмой медного анода. Рис. 3 представляет Rt -диаграмму фронта ударной волны (УВ). Ошибки обусловлены, в основном, рефракцией света на фронте УВ,

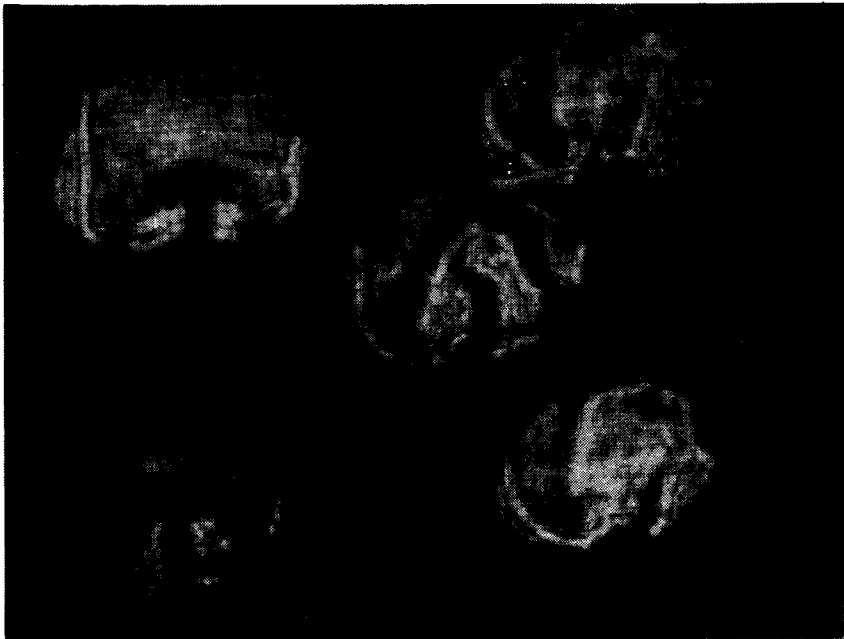


Рис. 2

Из предыдущего (см. п. 2) следует, что эта УВ является сильной (число Маха $3 \div 4$). Из Rt -диаграммы видно, что УВ выходит на режим, близкий к автомодельному ($R \sim t^{0,4}$) [8] при $R \gtrsim 1$ см. Оценка поглощенной в этом факеле энергии РЭП по теории точечного взрыва [8] дает величину:

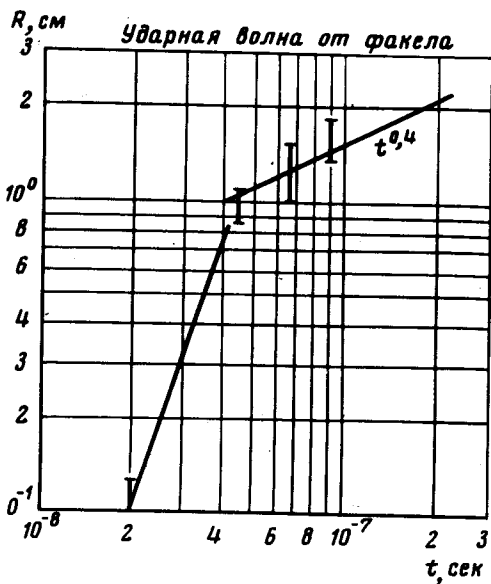


Рис. 3

$$E_{\text{Погл}} = \left(\frac{R_2 - R_1}{\xi_0} \right)^5 \frac{\rho_0}{(t_2^{2/5} - t_1^{2/5})^5} \approx 2 \text{ кДж}; \quad \left[\xi_0 = \xi_0(\gamma_0); \gamma_0 = \frac{5}{3} \right].$$

Проверка этой величины по параметрам разлета в начальный момент ($R < 1$ см), а также по измерению кинетической энергии дейтериевой плазмы за УВ при $R > 1$ см приводит к тому же значению $E_{\text{погл}}$.

Зная скорость УВ в дейтериевой плазме при $R < 1$ см, нетрудно вычислить скорость "поршня", т.е. массовую скорость медного факела [8]: $v_p \approx 3 \cdot 10^7$ см/сек. Полная испаренная масса медного факела определяется из оценки массы дейтериевой плазмы, охваченной УВ до $R = 1$ см (оценка "сверху"). Она оказывается порядка $(6 \div 7) \cdot 10^{-6}$ г.

Оценка испаренной массы из классической длины пробега электрона ($\mathcal{E}_e \approx 10^5$ эв) в меди дает величину, по крайней мере, на порядок большую (оценка "снизу" — $M_i \gtrsim 10^{-4}$ г). При выбросе такой массы из анода ПФ за 100 разрядов в аноде образовалось бы значительное отверстие (что и бывает при работе ПФ в безпинчевом режиме, т.е. без подогрева анода). В нашем же случае повреждения анодной вставки были ничтожными. Таким образом совокупность экспериментальных данных (см. таблицу).

$E_{\text{кин}}$ оболочки	$\lesssim 10$ кдж
E_H	≈ 10 кдж
$I_{\text{рэп}}$	700 ка
$\dot{I}_{\text{рэп}}$	$\gtrsim 10^{14}$ а/сек
$\mathcal{E}_{e \text{ рэп}}$	~ 100 кэв
$E_{\text{рэп}}$	6 + 8 кдж
$j_{\text{рэп}}$	100 ма/см ²
ν/γ	~ 50
$P_{\text{рэп}}$	$\sim 10^{13}$ вт/см ²
$E_{\text{рэп}}$ погл.	$\gtrsim 2$ кдж
M_i меди нагрет.	$\lesssim 7 \cdot 10^{-6}$ г
v_p	$3 \cdot 10^7$ см/сек
\mathcal{E}_i меди	~ 100 кэв/частицу
T_i меди	~ 1 кэв

а также факт резкого уменьшения интенсивности ЖР излучения в период основного нагрева и отсутствие сильного повреждения мишени свидетельствуют в пользу того, что основная энергия РЭП вкладывается в предварительно прогретую прианодную плазму за счет коллективных процессов на длине меньше или порядка 1 мм.

Авторы благодарны Н.Г.Басову за интерес к работе, а также Н.В.Филиппову, Т.И.Филипповой и В.М.Коржавину за помощь в запуске установки "Плазменный фокус".

Литература

- [1] М.В.Бабыкин, Е.К.Завойский, А.А.Иванов, Л.И.Рудаков. Доклад на IV Международной конференции по физике плазмы и УТС, Медисон, США, 1971.
- [2] В.А.Грибков, О.Н.Крохин, Г.В.Склизков, Н.В.Филиппов, Т.И.Филиппова. Письма в ЖЭТФ, **18**, 9, 1973.
- [3] Н.В.Филиппов, Т.И.Филиппова, В.П.Виноградов. Ядерный синтез, Приложение, ч.2, 577, 1962.
- [4] Н.Г.Басов, В.А.Грибков, О.Н.Крохин, Г.В.Склизков. ЖЭТФ, **54**, 1073, 1968.
- [5] V.A.Gribkov, O.N.Krokhin, G.V.Sklizkov, N.V.Filippov, T.I.Filippova. VI European Conf. on Contr. Fus. and Plasma Phys., p. 375, 1973г., Moscow.
- [6] V.A.Gribkov, Energy Storage, Compr., and Switching, Ed. by W.H.Bostick, V.Hardy, O.S.F.Zucker, Plenum Press, New York, 1976.
- [7] М.В.Бабыкин, А.В.Бартов. Препринт ИАЭ-2253, Москва, 1972.
- [8] К.П.Станюкович. Неустановившиеся движения сплошной среды, Москва, 1971.