

СЖАТИЕ Z-ПИНЧА ИЗ-ЗА ПОТЕРЬ НА ИЗЛУЧЕНИЕ

В.В.Вихрев

Рассмотрена динамика сжатия Z-пинча в дейтерии при значительных потерях энергии на излучение. На конкретном примере показано, что сжатие пинча в этом случае приобретает характер коллапса, в результате которого существенно повышается плотность плазмы в пинче и нейтронное излучение из него.

Попытка выяснить роль излучения на заключительной стадии сжатия плазмы в Z-пинче была осуществлена в [1], где показано, что в случае, если ток в пинче превышает ток Брагинского [2], то излучение увеличивает сжатие плазмы в нем. Однако в работах [1] и [2] основное внимание уделено квазиравновесным состояниям Z-пинча, в то время как излучение влияет прежде всего на динамику его сжатия.

Для описания динамики Z-пинча при сжатии его из-за радиационных потерь воспользуемся моделью, разработанной в [3], в которой дополнительно учтем следующие эффекты: 1) инерцию радиального движения вещества, 2) уменьшение тока вследствие увеличения индуктивности и сопротивления плазменного шнура, 3) тепловыделение на аномальном сопротивлении, 4) вязкостное тепловыделение, 5) тормозное излучение плазмы и переход его в поверхностное излучение плазменного шнура по абсолютно черному телу, 6) давление вырожденного электронного газа, 7) термоядерное тепловыделение в плазме.

Результаты численного моделирования развития разряда в Z-пинче с учетом перечисленных эффектов представлены на рисунке, показывающем изменение параметров плазмы в координатах концентрации вещества n и температуры плазмы T . Кривая 1 на этом рисунке относится к разрядам с током в 1 Ма. Такие величины тока достигаются в установках с плазменным фокусом [4].

Вначале повышение температуры (кривая 1) происходит в результате ударного нагрева плазмы без существенного повышения плотности. При температурах от 300 эв до $8 \cdot 10^3 \text{ эв}$ происходит адиабатический нагрев плазмы, и в этой области $n \sim T^{3/2}$, что соответствует простой модели развития плазменного фокуса [3]. При температуре $\sim 10 \text{ кэв}$ происходит развал плотной плазмы в пинче из-за аномального джоулева тепловыделения в нем [5]. Плотность плазмы при температуре 10 кэв достигает максимального значения $\sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$ и затем падает. В момент наибольшего сжатия $nr = 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3} \cdot \text{сек}$. Нейтронный выход на $d-d$ -реакции за весь разряд равен $2 \cdot 10^{10}$, что соответствует экспериментально наблюдаемым данным.

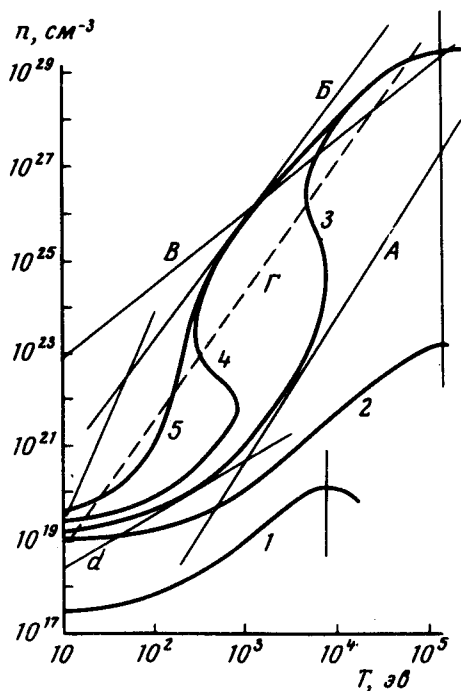


Диаграмма изменения плотности и температуры в Z-пинче: 1 — при начальном токе в 1 Ма , 2 ÷ 5 — при начальном токе в 10 Ма в разряде дейтерия с 1%-й примесью ксенона для различных начальных количеств частиц в сечении плазменного шнура: 2 — $N_1 = 5 \cdot 10^{20}$, 3 — 10^{21} , 4 — $2 \cdot 10^{21}$, 5 — $5 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$

Кривые 2 — 5 на рисунке соответствуют разрядам в дейтерии с 1%-й примесью ксенона на установке с энергетикой $2 \cdot 10^6 \text{ Дж}$ при следующих начальных условиях: радиус плазменного столба — 4 см , длина его — 1 см , индуктивность системы — 40 нГн . Начальный ток в таком разряде равен 10 Ма . Кривые 2 — 5 отличаются начальным количеством частиц в сечении плазменного столба N_1 . При $N_1 = 2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ (кривая 2) радиационное охлаждение на примеси не влияет на динамику Z-пинча и параметры плазмы изменяются подобно тому, как это происходит при токе в 1 Ма (кривая 1). Турбулентное разрушение плотной плазмы в этом случае наблюдается при температуре выше 10^5 эв , а плотность имеет возможность расти до величины $\sim 10^{23} \text{ см}^{-3}$. Ток уменьшается в процессе сжатия плазменного столба из-за увеличения индуктивности и в момент максимального сжатия равен 7 Ма . Значение nr высокотемпературной плазмы достигает $10^{13} \text{ см}^{-3} \cdot \text{сек}$, а нейтронный выход за весь разряд — 10^{14} .

Существенное повышение плотности плазмы в Z-пинче, а тем самым и nT высокотемпературной области плазмы, происходит из-за потерь на излучение в том случае, когда скорость потерь энергии на излучение превышает скорость ухода энергии из-за вытекания плазмы [3], т. е. при

$$Q_{\text{изл}} > \frac{5NT}{\tau}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{изл}}$ — мощность излучения с единицы длины плазменного шнура, N — количество ионов в сечении его, τ — характерное время ухода вещества из плазменного шнура. Так же как и в [3] имеем

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_l} + \frac{1}{\tau_r}, \quad (2)$$

где время ухода плазмы через торцы плазменного шнура $\tau_l = \frac{l}{2v_T}$ (l —

длина его, v_T — тепловая скорость ионов), а τ_r — в радиальном направлении, $\tau_r = ar/v_T$ (r — средний радиус шнура, a — коэффициент, показывающий во сколько раз время удержания плазмы в радиальном направлении превышает пролетное время ионов по радиусу, $a \sim 10$).

Прямые "а" и "А" на рисунке соответствуют условию (1) для тормозного излучения дейтерия с 1%й примесью ксенона в полностью ионизованной плазме при токе 10^7 а, причем прямая "а" проведена для $\tau = \tau_l$ при $l = 1$ см, а прямая "А" для $\tau = \tau_r$ при $a = 10$. Если значения n и T плазмы попадают в область над прямыми "а" и "А", то становится существенным радиационное охлаждение плазмы. Давление плазмы в пинче в этом случае падает, и пинч сжимается под действием давления магнитного поля со значительным увеличением плотности плазмы в нем. Это явление можно назвать радиационным коллапсом Z-пинча. Кривые 3, 4, 5 описывают поведение разрядов, в которых такой коллапс осуществляется.

Сжатие плазмы без повышения температуры в первую очередь препятствует переход объемного излучения плазмы в поверхностное излучение плазменного шнура по абсолютно черному телу. Граница перехода показана на рисунке прямой "Г". При параметрах плазмы выше прямой "Г" излучение плазмы запирается и происходит поверхностное излучение плазменного шнура. При излучении по абсолютно черному телу сжатие пинча может происходить только с повышением температуры, что и наблюдается на кривых 3, 4, 5 после пересечения границы "Г".

Прямая "Б" соответствует условию

$$\frac{5NT}{\tau_r} = 2\pi r \sigma T^4 \quad (3)$$

при $a = 10$, т. е. уход энергии из пинча из-за его радиального разрушения сравнивается с излучением плазменного шнура по абсолютно черному телу. Выше этой прямой сжатие пинча из-за радиационных по-

теперь невозможно. Поэтому расчетные кривые 4 и 5 на рисунке касаются снизу прямой "Б", но не пересекают ее.

Прямая "В" соответствует вырождению электронного газа. Выше этой прямой давление вырожденного электронного газа превышает давление nT . Кривые 3, 4 и 5 слегка заходят в область вырождения, однако джоулево и ядерное тепловыделение в этот момент приводит к нагреву плазмы в пинче и параметры плазмы выходят из этой области.

При температуре выше 10^5 эв пинч разрушается в результате появления в нем аномального сопротивления плазмы; температура при этом растет, а плотность плазмы убывает. Расчет показывает, что радиус плазменного шнура при радиационном коллапсе в момент максимального сжатия равен $\sim 10^{-5}$ см, величина тока в этот момент — 4 Ма, плотность достигает значения $> 10^{27}$ см $^{-3}$, температура выше 10 кэв, $nr \sim 10^{16}$ см $^{-3}$.сек, нейтронный выход за все время разряда — $8 \cdot 10^{15}$ (кривые 4 и 5) и $1,5 \cdot 10^{16}$ (кривые 3).

При радиационном коллапсе Z-пинча в смеси дейтерия с тритием термоядерный выход достигает 10^{18} нейтронов за разряд. Это означает, что в дейтериево-тритиевой смеси можно получить энергию в нейтронном излучении, равную первоначально запасенной в источнике тока ($2 \cdot 10^6$ дж). Таким образом, термоядерный реактор на Z-пинче, в принципе, возможен при энергетике в несколько мегаджоулей.

Автор благодарен сотрудникам Института атомной энергии, принимавшим участие в обсуждении радиационного коллапса Z-пинча.

Институт атомной энергии
им. И.В.Курчатова

Поступила в редакцию
5 декабря 1977 г.

Литература

- [1] J.W.Shearer. Phys. Fluids, 19, 1426, 1976.
- [2] С.И.Брагинский. ЖЭТФ, 33, 645, 1957.
- [3] В.В.Вихрев. Физика плазмы, 3, 997, 1977.
- [4] В.И.Агафонов и др. Plasma Phys. and Contr. Nucl. Fus. Res., IAEA, Vienna, 2, 21, 1969.
- [5] V.V.Vikhrev et al. Plasma Phys. and Contr. Nucl. Fus. Res., IAEA, Vienna. 3, 455, 1977.