

НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЫ СИЛЬНОТОЧНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ РАЗРЯДОВ

Ф. А. Николаев, В. Б. Розанов, Ю. П. Свириденко

Рассмотрение сильноточных интенсивно излучающих разрядов в рамках магнитогидродинамической теории с учетом излучения приводит к заключению о возможности возникновения как силовых, так и перегревных неустойчивостей, играющих существенную роль в процессе развития этих разрядов.

Хотя детальное исследование излучающих разрядов при экстремальных токах начали проводить лишь в последнее время, имеющийся экспериментальный материал позволяет провести ряд оценок, подтверждающих справедливость развиваемых в работах /1-4/ представлений. В данной работе сравниваются теоретические результаты с экспериментальными, в том числе уже опубликованными.

Исследования плотной ($n > 10^{16}$ см⁻³), тяжелой ($A \geq 2$) плазмы (в частности, создаваемой взрывом металлических проволочек в вакууме /5-7/) показывают, что таким сильноточным разрядом присуща сложная динамика развития. Структура разряда оказывается неоднородной, наблюдаются скручивания и перетяжки разрядного шнура.

В работе /5/ экспериментально изучался разряд в плазме из лития. Разряд представлял собой прямой пинч; число частиц в шнуре на единицу длины изменялось в широком диапазоне (от $4 \cdot 10^{18}$ до $4 \cdot 10^{20}$ см⁻¹). В случае оптически непрозрачной плазмы (случай толстой проволочки, число частиц на единицу длины разря-

да $\sim 4 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-1}$) на кадрах сверхскоростной съемки отчетливо проявляется волнистость поверхности, напоминающая перетяжки (2-3 периода на всю длину разряда). Время развития этих неустойчивостей, определенное как время, за которое амплитуда перетяжек увеличивается в "е" раз, оказывается равным 8 ± 10 мксек.

Теоретический анализ для оптически непрозрачной плазмы /1/ показывает, что простой цилиндрический разряд даже в равновесном состоянии гидродинамически неустойчив, в нем могут развиваться силовые неустойчивости типа перетяжек и изгибов. В наблюдаемом в эксперименте случае коротковолновых колебаний ($k_z | r > 1$) инкремент развития основной моды неустойчивости типа перетяжек равен

$$\gamma \leq \sqrt{\frac{2|k_z|v_s^2}{r}} \quad (\text{номер моды колебаний } n = 0), \quad (1)$$

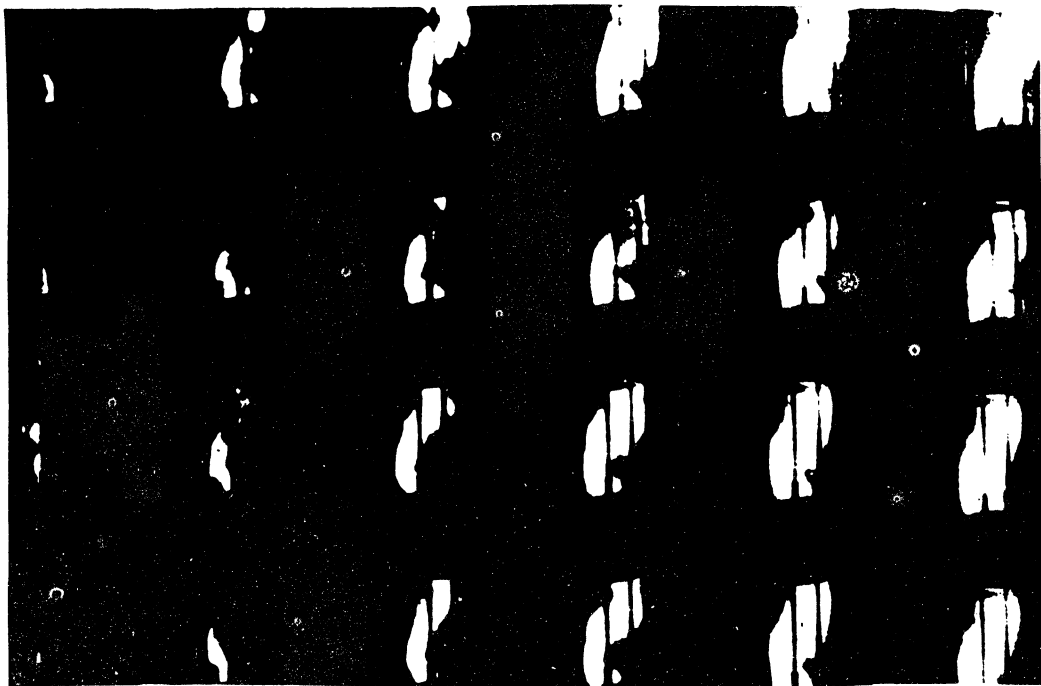
где k_z - продольное волновое число; v_s - скорость звука в плазме; r - характерный размер. Для измеренных значений параметров плазмы /5/ время развития неустойчивости, определяемое из (1), оказывается близким к наблюдаемому

$$t_{\text{теор}} = 1/\gamma \approx 3 \cdot 10^{-6} \text{ сек}$$

$$(v_s \approx 9 \cdot 10^5 \text{ см/сек; } r = 2 \text{ см}).$$

В случае "тонких" проволочек ($\phi_{\text{нач}} = 0,1 \text{ мм}$, $N = 4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-1}$) исследуемая плазма становится оптически прозрачной. Перетяжки не наблюдаются, однако отчетливо прослеживается скручивание шнура (Рис. 1). Время развития скручивания равно (5 ± 8) мксек. Шаг винта, равный 14 см , близок к длине камеры, но определяется параметрами плазмы и не зависит от межэлектронного расстояния. Это подтверждается исследованием длинного разряда ($l = 90 \text{ см}$), в котором при близких параметрах плазмы шаг винта оставался прежним /6/.

На фотографиях как короткого, так и длинного раз-



Р и с. 1. Покадровая съемка импульсного разряда в литиевой плазме. Выдержка кадра 2 мксек, диаметр проволоочки 0,1 мм. Длина разряда 14,5 см; емкость накопительной батареи $C_0 = 1800$ мкф, зарядное напряжение на батарее $V_0 = 5$ кв. Длительность импульса ~ 100 мксек.

ряда проявляется "облачная" структура, различаются яркие и темные области, свидетельствующие о локальных перегревах плазмы. Время развития перегретых областей составляет ориентировочно 5 мксек.

Теоретическое рассмотрение /2/ показывает, что действительно, прозрачной плотной плазме присущи силовые неустойчивости типа изгиба и скручивания. Отсутствие в таком разряде перетяжек, связанных с раскачкой колебаний поверхности, обусловлено спаданием температуры и плотности прозрачного разряда от центра шнура к краю. Инкремент развития возмущения типа изгибов и винтов ($m \neq 0$) равен

$$\gamma = \sqrt{\frac{2}{m}} |k_z| v_s \quad (\text{в длинноволновом приближении, } |k_z| r < 1), \quad (2)$$

где m - азимутальное модовое число. Для рассматриваемого случая $m = 1$ (на кадрах фотосъемки виден один жгут) время развития равно $t_{\text{теор}} = \frac{1}{\gamma} \geq 2 \cdot 10^{-6}$ сек,

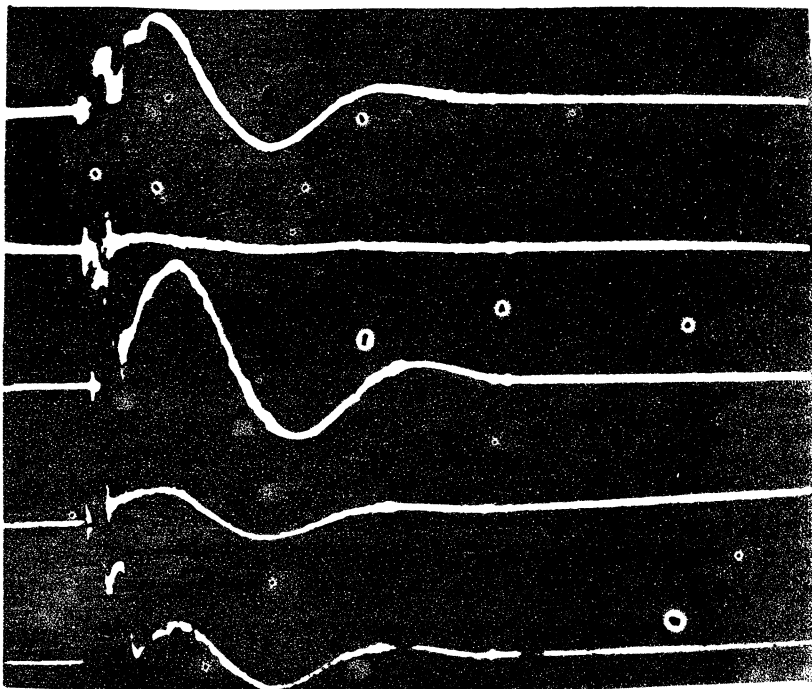
что согласуется с экспериментом ($t_{\text{эксп}} = 5+8$ мксек).

В оптически прозрачных разрядах теория предсказывает существование и перегревных неустойчивостей /2,3/. Возможность их возникновения обусловлена тем, что энергия, выносимая излучением ($\sim \sqrt{T}$), не способна скомпенсировать нарастание флуктуаций температуры, вызванное джоулевым нагревом ($\sim T^{3/2}$). Инкремент развития перегрешной неустойчивости определяется конечной проводимостью плазмы и равен

$$\gamma = \alpha \frac{j^2}{\sigma P} = 1 \text{ мксек}, \quad (3)$$

что также удовлетворительно согласуется с экспериментом. (В выражении (3) α - численный коэффициент, равный 3 при длинноволновой неустойчивости ($\omega \ll \ll k_z v_s$); $j = 3 \cdot 10^{13}$ СГСЕ - плотность тока; $\sigma = 10^{15}$ СГСЕ - проводимость плазмы; $P = 10$ атм - газодинамическое давление).

Следует отметить близость времен развития силовых и перегревных неустойчивостей, это определяет их сильное взаимодействие. Такая конкуренция гидродинамических и перегревных неустойчивостей в плазме



Р и с. 2. Осциллограммы магнитного поля внутри плазменного шнура.

приводит к ее турбулизации, возникновению мелкомасштабных неоднородностей плотности и температуры. Справедливость предположения о турбулентном характере плазмы сильного разряда подтверждается измерениями локального магнитного поля внутри разряда.

На рис. 2 показана временная зависимость магнитного поля на расстоянии 1 см от оси камеры. На осциллограмме отчетливо видна флюктуация магнитного поля в течение первых 30 мксек; в дальнейшем плазма дости-

гает стенок камеры и стабилизируетя. Как показали предварительные измерения с литиевой прозрачной плазмой, эти флюктуации носят статистический характер.

Следует отметить, что в работе /6/ наблюдаются протяженные яркие участки по длине разряда. Сравнительно быстро возникнув (за время ~ 1 мксек), эти перегретые яркие области отчетливо просматриваются не менее 30 мксек. Наличие таких областей не объясняется в рамках развитой в работе /2/ теории, так же как длительное существование поверхностности, изгибов и скручиваний. Возможно, что наблюдаемые эффекты могут быть объяснены в рамках нелинейной теории. Существующая же теория устойчивости, будучи линейной, строго говоря, определяет только начальные скорости развития неустойчивости.

Таким образом, динамика развития сильнооточного импульсного разряда в плотной плазме ведет к развитию неустойчивостей, к сложному строению разряда. Как вид, так и инкременты развития неустойчивостей хорошо объясняются существующей теорией равновесия и устойчивости сильнооточного самосжатого разряда.

В заключение авторы выражают признательность А. А. Рухадзе за многочисленные плодотворные обсуждения.

Поступила в редакцию
17 февраля 1971 г.

Л и т е р а т у р а

1. А. А. Рухадзе, С. А. Тригер. ПМТФ, № 3, 11 (1968).
2. А. А. Рухадзе, С. А. Тригер. Препринт ФИАН № 26 (1968).
3. В. Б. Розанов, А. А. Рухадзе, С. А. Тригер. ПМТФ, № 5, 18 (1968).
4. А. А. Рухадзе, С. А. Тригер. ЖЭТФ, 56, 1029 (1969).
5. А. Д. Клементов, Г. В. Михайлов, Ф. А. Николаев, В. Б. Розанов, Ю. П. Свириденко. IX Международ-