

УДК 537.523

КРИТЕРИИ РЕЖИМОВ РАСШИРЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ СИЛЬНОТОЧНЫХ РАЗРЯДОВ В ПЛОТНОМ ГАЗЕ

У. Юсупалиев

(Центр гидрофизических исследований)

E-mail: nesu@phys.msu.ru

На основе опытных данных по исследованию импульсных сильноточных разрядов в плотном газе и их обобщенных переменных установлены критерии режимов расширения таких разрядов: свободное расширение и расширение с пинчеванием.

Анализ опытных данных по исследованию динамики импульсных сильноточных разрядов (ИСР), обладающих цилиндрической симметрией, в неограниченном газе высокого давления (порядка атмосферного и выше) показывает [1–10], что такие разряды имеют два режима расширения: свободное расширение и расширение с пинчеванием. В настоящее время количественные критерии указанных режимов расширения таких разрядов не установлены. В этой связи возникает необходимость их определения, что и является целью данной работы.

Будет ли ИСР в газе на начальной стадии своего развития расширяющимся или сжимающимся зависит от величины отношения магнитного давления разрядного тока p_m к давлению плазмы p_p ($\beta^{-1} = p_m/p_p$). Если на этой стадии выполняется условие $\beta^{-1} < 1$, то разряд расширяется, а если $\beta^{-1} > 1$, то разряд под действием магнитного поля собственного разрядного тока сжимается (происходит пинчевание). Значение величины β^{-1} изменяется во время разряда вследствие осцилляции разрядного тока $J(t)$ и изменения параметров разряда (радиуса канала $R_K(t)$, скорости сжатия или расширения $V_K(t)$, плотности $\rho_k(t)$ и температуры плазмы $T_k(t)$, t — текущее время) и соответственно величина β^{-1} является функцией тока $J(t)$ и параметров разряда:

$$\beta^{-1} = f_1(J, R_K, V_K, \rho_k, T_k).$$

В свою очередь величины R_K , V_K , ρ_k , T_k зависят от начальных параметров разрядного контура и газа: начального напряжения на разрядном промежутке U ; начальной скорости нарастания разрядного тока F ; индуктивности L и емкости C разрядного контура; длины разрядного промежутка l_0 ; показателя адиабаты плазмы разряда γ_d , давления p_∞ , плотности ρ_∞ , температуры $\theta_\infty = kT_\infty$ (k — постоянная Больцмана) и показателя адиабаты окружающего разряд газа γ_∞ ; эффективного потенциала ионизации газа $I_{IF}(D_j, \beta_j, I_i, \mu_i)$ (I_i, μ_i — потенциал ионизации и доля i -го сорта атомов газа, D_j, β_j — потенциал диссоциации и доля j -го сорта молекул газа).

Существующие в настоящее время теоретические модели ИСР в газе [6–8, 11, 12] не позволяют определить зависимости величин R_K , V_K , ρ_k , T_k от указанных начальных параметров разрядного контура и газа. Поэтому для определения указанных зависимостей ИСР в работах [13–15] применялись методы теории размерности. Их применение с использованием опытных данных позволило для начальной стадии развития разряда определить функциональные связи между относительными величинами разрядного канала R_K/R_0 , V_K/c_∞ , ρ_k/ρ_∞ и указанными параметрами:

$$\frac{R_K}{R_0} = \varphi_1(\Xi, \tau), \quad \frac{V_K}{c_\infty} = \varphi_2(\Xi), \quad \frac{\rho_k}{\rho_\infty} = \varphi_3(\Xi),$$

где $\Xi = UF/(l_0 A^2)$, $\tau = t/\sqrt{LC}$ — безразмерные обобщенные переменные ИСР в газе,

$$A = \pi p_\infty \left(\frac{I_{IF}}{\theta_\infty} - \frac{1}{\gamma_d - 1} \frac{\gamma_\infty - 1}{\gamma_\infty + 1} - \frac{2\gamma_\infty}{\gamma_\infty + 1} \right),$$

$$B = \pi \rho_\infty \left(\frac{\gamma_d}{\gamma_d - 1} \frac{\gamma_\infty + 1}{2} + \frac{1}{2} \right),$$

R_0 — начальный радиус разрядного канала, c_∞ — скорость звука в газе. В этих работах также показано, что полученные зависимости удовлетворительно согласуются с опытными данными, полученными в разное время [1–8, 10].

Из данных работ [13–15] следует, что величина β^{-1} также является функцией от обобщенных переменных Ξ и τ : $\beta^{-1} = f(\Xi, \tau)$. Максимальное значение этой функции достигается при $\tau \approx \pi/2$ (в максимуме тока J) и соответственно $(\beta^{-1})_{\max} = f(\Xi, \pi/2)$. Другими словами, величина $(\beta^{-1})_{\max}$ зависит только от начальных параметров разрядного контура и газа, а следовательно, определяет всю динамику разряда, являясь его интегральной характеристикой. Тем самым обобщенная переменная Ξ может характеризовать режимы расширения ИСР.

Рассмотрим связь между величиной $(\beta^{-1})_{\max}$ и переменной Ξ , используя опытные данные работ [1–10]. Обработка данных показывает, что

чем больше величина переменной Ξ , тем больше $(\beta^{-1})_{\max}$. Это значит, что с ростом величины переменной Ξ усиливается влияние магнитного давления разряда на динамику его расширения. Так, при $(\beta^{-1})_{\max} \ll 1$ магнитное давление практически не влияет на динамику их расширения: разряды в газе расширяются практически свободно. Этот случай реализуется при $\Xi \ll 1$, что характерно для искровых разрядов [1–3, 5, 7] и начальной стадии развития излучающих ИСР ($\tau \ll 1$) [4, 6, 8, 10].

При $\Xi < 1$ величина β^{-1} достигает своего максимального значения на стадии основного энерговыклада в разряд ($\tau \sim 1$) и она не превышает единицы, а при $1 \leq \Xi \leq 20$ значение $(\beta^{-1})_{\max}$ заключено в интервале $1 < (\beta^{-1})_{\max} \leq 5$. Эти случаи характерны для излучающих ИСР в плотном газе.

На стадии основного энерговыклада при $(\beta^{-1})_{\max} \leq 1$ в момент первого максимума тока начинает проявляться эффект пинчевания разряда: наблюдается небольшое снижение (до $\sim 1.5 \div 2.5$ раз) скорости расширения канала V_K по сравнению с начальной (максимальной) скоростью V_{\max} [4, 6, 8, 10].

В случае $1 \leq (\beta^{-1})_{\max} \leq 5$ ярко проявляется эффект пинчевания разряда, что подтверждается данными работ [6, 10] для ИСР в воздухе. При $p_{\infty} = 10^5$ Па в момент достижения максимума тока ($J_0 \approx 240$ кА) величина V_K составила 0.5 км/с, т.е. уменьшилась на порядок по сравнению с начальной скоростью расширения разрядного канала $V_{\max} \approx 5$ км/с. Исходя из данных, приведенных в работах [6, 10], рассчитанное значение переменной $\Xi \approx 18.5$, и в момент достижения максимума тока значение $(\beta^{-1})_{\max}$ составляет 4.7.

При $\Xi > 20$ с ростом величины переменной Ξ также растет $(\beta^{-1})_{\max}$. В этом случае на стадии основного энерговыклада под действием магнитного давления его расширение может прекратиться и в дальнейшем начаться сжатие разрядного канала, что и наблюдалось в работах [4, 6, 8, 10].

Таким образом, обобщенная переменная Ξ характеризует режимы расширения ИСР в плотном газе. При $\Xi \ll 1$ реализуется режим свободного

расширения ИСР, а при $\Xi < 1$ и $\Xi \geq 1$ — режим расширения с пинчеванием. Причем при $\Xi \geq 1$ с ростом величины переменной Ξ влияние магнитного поля на динамику расширения ИСР в плотном газе усиливается: на стадии основного энерговыклада в разряд при $\Xi \approx 18$ скорость его расширения снижается практически на порядок, а при $\Xi > 20$ его расширение может прекратиться и в дальнейшем может начаться сжатие разрядного канала.

Считаю своим долгом выразить благодарность А. Ф. Александрову и А. А. Рухадзе за помощь в работе и ценные обсуждения.

Литература

1. Гегечкори Н.М. // ЖЭТФ. 1951. **21**. С. 493.
2. Долгов Г.Г., Мандельштам С.Л. // ЖЭТФ. 1953. **24**, № 6. С. 691.
3. Bartels H., Bortfeldt J. Exploding wires. N.J., 1964.
4. Басов Н.Г., Борович Б.Л., Зуев В.С. и др. // ЖТФ. 1968. **38**. С. 2079.
5. Fisher H., Schwanzer W. // Applied Optics. 1969. **8**, N 3. P. 697.
6. Александров А.Ф., Рухадзе А.А. Физика сильноточных электроразрядных источников света. М., 1976.
7. Бобров Ю.К. // ЖТФ. 1974. **44**, № 11. С. 2340.
8. Борович Б.Л., Розанов В.Б., Зуев В.С. и др. // ВИНТИ, Итоги науки и техники. Сер. Радиотехника. 1978. **15**. С. 79.
9. Импульсные источники света / Под ред. И.С. Маршак. М., 1978.
10. Александров А.Ф., Зосимов В.В., Рухадзе А.А. и др. // Крат. сообщ. по физике ФИАН. 1970. № 8. С. 58.
11. Бобров Ю.К., Вихрев В.В. // Физика плазмы. 1988. **14**, № 10. С. 1222.
12. Колгаткин С.Н. // ЖТФ. 1995. **65**, № 7. С. 10.
13. Юсупалиев У. // Крат. сообщ. по физике ФИАН. 2005. № 9. С. 42.
14. Юсупалиев У. // Крат. сообщ. по физике ФИАН. 2005. № 12. С. 45.
15. Юсупалиев У. // Крат. сообщ. по физике ФИАН. 2007. № 9. С. 33.

Поступила в редакцию
13.07.2007