

## Зависимость мощности излучения от длины сильноточной вакуумной дуги в области вакуумного ультрафиолета

© Ю.А. Баринов<sup>1</sup>, К.К. Забелло<sup>1</sup>, А.А. Логачев<sup>1</sup>, И.Н. Полуянова<sup>2</sup>, С.М. Школьник<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Конструкторское бюро коммутационной аппаратуры, Севастополь, Россия

E-mail: zabellok@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 30 апреля 2025 г.

В окончательной редакции 11 июля 2025 г.

Принято к публикации 22 июля 2025 г.

Проведено измерение мощности излучения сильноточной вакуумной дуги длиной 8 мм в области вакуумного ультрафиолета, а также сопоставление результатов с измерениями в короткой дуге (4 мм). С увеличением длины дуги рост мощности излучения в области вакуумного ультрафиолета ( $100 \leq \lambda \leq 175$  nm) менее выражен, чем в диапазоне 175–400 nm. Это подтверждает точку зрения, что основной рост мощности излучения в дуге с развитой анодной активностью происходит за счет излучения атомных линий. Доля всей энергии, переносимой излучением, растет при удлинении дуги и в максимуме достигает 30 %.

**Ключевые слова:** вакуумная дуга, мощность излучения, низкотемпературная плазма, электромагнитное излучение, электрическая дуга.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.23.61677.7947

В вакуумных дуговых разрядах роль излучения в энергетическом балансе разряда изучена мало. Это объясняется тем, что плотность плазмы в вакуумных дугах при умеренных токах не столь велика, и потому роль излучения было принято считать незначительной. В работах по энергобалансу излучением пренебрегают еще и потому, что расчет излучения является очень сложной задачей. Лишь в нескольких работах сделаны приближенные расчеты, позволяющие оценить роль излучения в энергобалансе вакуумной дуги [1–3]. Экспериментальных работ по измерению мощности излучения вакуумных дуг в области вакуумного ультрафиолета (ВУФ) до начала настоящих исследований не проводилось.

Ранее нами были проведены измерения мощности излучения короткой (4 мм) сильноточной вакуумной дуги в области ВУФ [4–6]. Исследовалась дуга, стабилизированная однородным аксиальным магнитным полем (АМП), горящая между торцевыми электродами из медь-хромовой композиции (CuCr30) диаметром 30 мм. Было обнаружено, что при больших плотностях тока при появлении анодной активности (интенсивного испарения анода) мощность излучения в области ВУФ начинает быстро расти. И при токе  $I > 20$  kA (средняя плотность тока  $j \geq 2.9$  kA/cm<sup>2</sup>) значение мощности излучения достигает величины  $\sim 50$  kW. При увеличении тока до 25 kA (плотность тока  $j \geq 3.6$  kA/cm<sup>2</sup>) и, как следствие, значительном увеличении анодной активности мощность излучения в области ВУФ растет незначительно. В работе [4] прослежена зависимость максимальной мощности излучения в области ВУФ от тока дуги вплоть до тока  $I = 25$  kA ( $j \sim 3.5$  kA/cm<sup>2</sup>), при котором анодная активность сильно выражена. В течение импульса тока 25 kA максимальная мощность излучения  $\sim 55$  kW достигается уже через 4.5 ms и далее перестает расти. Также было высказано предположение, что перераспре-

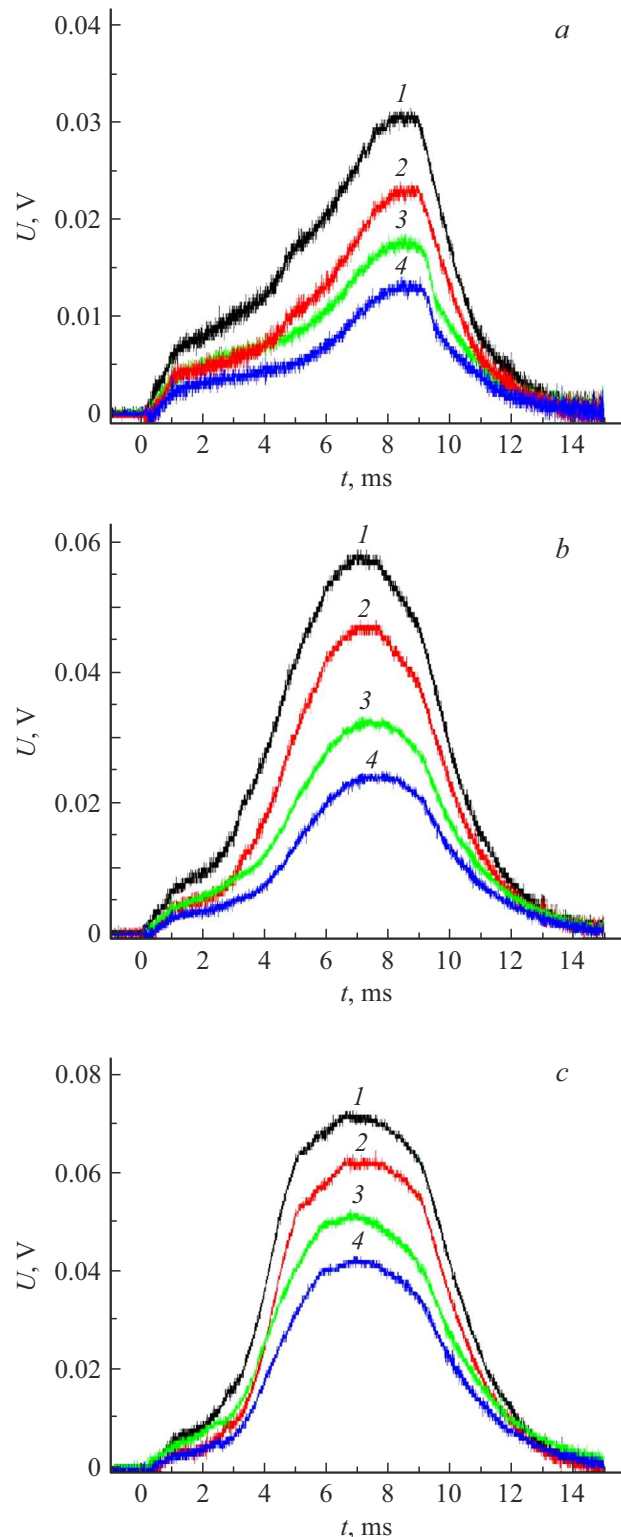
деление мощности излучения между областями ВУФ и „обычного“ ультрафиолета происходит потому, что с ростом концентрации паров металлов, появившихся в промежутке в результате кипения на поверхности электродов, начинает преобладать излучение атомных линий в диапазоне 175–400 nm. Полученная в работе [4] оценка мощности излучения в диапазоне 100–400 nm при токе  $I = 25$  kA в конце импульса достигает  $\sim 300$  kW. При этом мгновенная электрическая мощность, выделяющаяся в разряде, составляет  $\sim 900$  kW. Это значит, что в разрядах с высокой плотностью тока, в которых сильно развита анодная активность, мощность излучения (включая область ВУФ) может составлять почти 30 % от полной выделяющейся в разряде мощности.

Интерес представляют измерение излучения более длинной дуги (8 мм) и сопоставление результатов. Такие измерения были проведены в настоящей работе. Стояла задача определить, как будет меняться мощность излучения при увеличении межэлектродного промежутка — удлинении дуги. С одной стороны, при удлинении столба дуги в 2 раза можно рассчитывать на значительное увеличение мощности излучения (в области ВУФ). С другой стороны, если наше предположение верно, и основная доля мощности излучения связана с парами металла, то общая мощность излучения увеличится незначительно. С этой целью были выполнены измерения мощности излучения в условиях, аналогичных описанным выше, но с удвоенным межэлектродным промежутком. В настоящей работе рассмотрим только мощность излучения в области вакуумного ультрафиолета.

Эксперимент проводился на установке, подробно описанной ранее в [4]. Далее приведены основные характеристики установки. Эксперименты выполнены в вакуумной камере при непрерывной откачке ( $\sim 10^{-4}$  Pa). Дуга

поджигалась искусственно в центре катода и стабилизировалась однородным АМП с индукцией  $\sim 10$  мТ/кА. АМП создавалось внешними катушками (пара Гельмгольца), и его индукция была подобрана так, чтобы обеспечить практически однородное распределение тока на торцевой поверхности электродов. Использовались электроды на основе композиции CuCr30 диаметром 30 мм, расположенные вертикально на расстоянии  $h = 8$  мм один от другого. Дуга питалась импульсом тока с длительностью  $\sim 10$  мс. Излучение дуги регистрировалось тремя фотодиодами ФДУК8-УВС (АО „Техноэксан“). Фоточувствительный элемент диодов имел диаметр  $d = 3.5$  мм. Диоды были установлены внутри вакуумной камеры на расстоянии  $L = 990$  мм от ее оси напротив середины межэлектродного промежутка. С учетом вида спектральной чувствительности диодов в диапазоне  $100 \leq \lambda \leq 1100$  нм перед фотодиодами помещались светофильтры. Светофильтры были изготовлены из кристалла  $MgF_2$ , из кварца КУ1 и из цветного стекла ЖС-10 (ГОСТ 9411–91). Кристалл  $MgF_2$  пропускает излучение с длиной волны  $\lambda \geq 100$  нм, кварц КУ-1 пропускает излучение с  $\lambda \geq 175$  нм, стекло из ЖС-10 пропускает излучение с  $\lambda \geq 400$  нм. Измерения излучения в каждом режиме делались одновременно. Пропускание фильтров и спектральная чувствительность диодов представлены в [4]. Методика оценки мощности излучения дуги по интенсивности потока излучения, падающего на фотоприемник, приведена в [7], а основывалась она на данных работы [8].

Результаты экспериментов при длине дуги  $h = 8$  мм качественно схожи с результатами, полученными при исследовании короткой дуги ( $h = 4$  мм). На рис. 1 приведены примеры результатов измерений фотодиодами через фильтры  $MgF_2$  и КУ1 при различных токах с развитой анодной активностью в сравнении с измерениями, сделанными при длине дуги 4 мм. Выбраны характерные значения тока, при которых в разряде начинаются описанные ниже качественные изменения, вызванные анодной активностью. При относительно небольших токах  $I_a \sim 10$  кА анодная активность не наблюдается. Напряжение горения дуги  $U_a$  после завершения развития дуги практически не меняется. Форма осциллограмм напряжения на фотодиодах  $U_d$  совпадает с формой осциллограммы тока. При увеличении амплитуды тока до 14–15 кА на электродах появляются следы проявления анодной активности. При токах больше 18 кА форма осциллограмм на фотодиодах существенно меняется (рис. 1, а): спустя 3–4 мс сигнал начинает заметно расти и достигает максимума через 7–7.5 мс, а далее падает из-за уменьшения тока. При дальнейшем увеличении амплитуды тока анодная активность становится все более выраженной. Расплав появляется также и на катоде. Максимальное значение сигнала на фотодиодах растет очень быстро и достигается раньше. При токе, превосходящем 22 кА, скорость роста сигнала на фотодиодах такова, что максимальный сигнал на

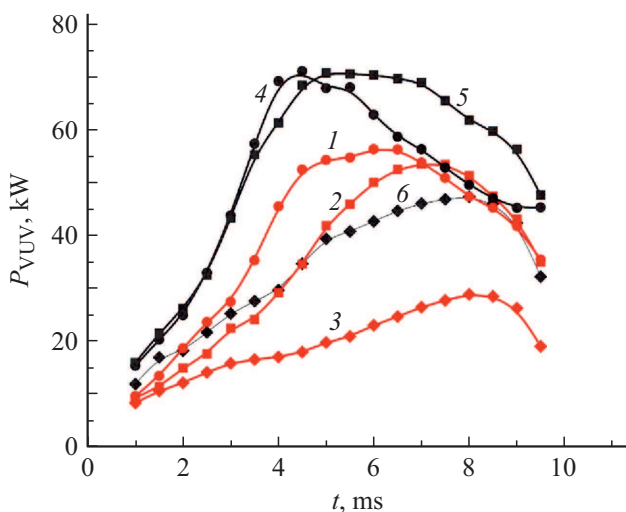


**Рис. 1.** Сигналы с фотодиодов с разными фильтрами. 1 —  $h = 8$  мм, фильтр  $MgF_2$ ; 2 —  $h = 8$  мм, фильтр КУ-1; 3 —  $h = 4$  мм, фильтр  $MgF_2$ ; 4 —  $h = 4$  мм, фильтр КУ-1.  $I = 18.5$  (а), 22.5 (б), 25 кА (с).

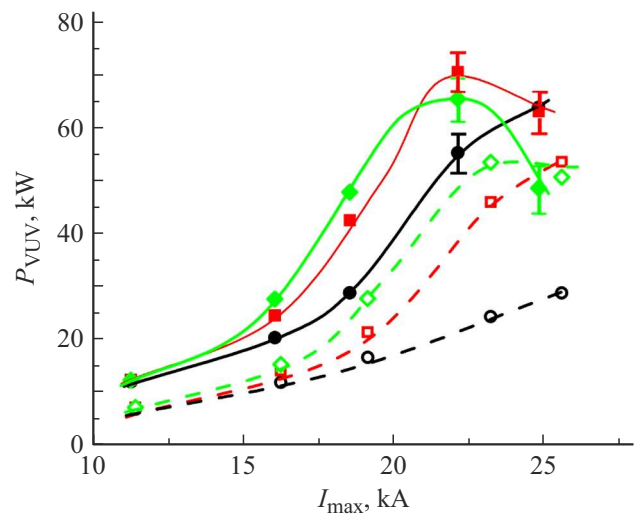
фотодиодах наблюдается уже при 3.5–4 ms от начала импульса тока.

Полученные на основе приведенных осциллограмм величины мощности излучения в области ВУФ в зависимости от времени при различных токах в дугах разной длины приведены на рис. 2. Видно, что при предельных токах (22–25 кА) максимум излучения в области ВУФ достигается максимально быстро и уже не зависит от тока. При 25 кА мощность излучения в области ВУФ, достигнув максимума, даже начинает спадать.

Сравнение полученных в настоящей работе зависимостей мощности излучения в области ВУФ от тока в различные моменты времени в дугах разной длины приведено на рис. 3. Из рисунка видно, что максимальная мощность излучения, достигаемая в импульсе, по мере развития анодной активности как в короткой, так и в длинной дуге растет экспоненциально быстро с током. Видно, что максимальная мощность излучения в области ВУФ в длинной дуге (длина увеличилась в 2 раза) незначительно превосходит мощность, излучаемую короткой дугой. Это существенно отличается от роста мощности излучения в области „обычного“ ультрафиолета [6]. Тогда был сделан вывод, что максимальная мощность излучения в длинной дуге практически в 2 раза превосходит мощность, излучаемую короткой дугой, т.е. мощность, излучаемая единицей длины дуги, не меняется, а полная мощность растет пропорционально длине дуги. Мощность излучения в области ВУФ с ростом тока и по мере развития дуги в течение импульса ведет себя совсем другим образом. Такое различие, по-видимому, связано с тем, что оба электрода при токах более 22 кА полностью расплавлены и излучение в промежутке определяется в основном излучением атомных линий испарившегося материала электродов. Следует отметить, что резонанс-



**Рис. 2.** Зависимость мощности излучения в области ВУФ от времени для разных токов и промежутков.  $h = 4$  (1–3) и 8 мм (4–6).  $I = 25$  (1, 4), 22.5 (2, 5) и 18.5 кА (3, 6).



**Рис. 3.** Зависимость мощности излучения в области ВУФ от тока дуги в выбранные моменты времени. Светлые символы (штриховая кривая) —  $h = 4$  мм, закрашенные символы (сплошная кривая) —  $h = 8$  мм.  $t = 3.5$  (кружки), 5.5 (квадраты) и 7.5 ms (ромбы). Вертикальные отрезки — разброс экспериментальных данных.

ные линии атомов меди 324.7 и 327.4 nm, а также хрома 357.9 nm лежат как раз в области „обычного“ ультрафиолета, а в области ВУФ преобладают ионные линии меди.

Доля мощности, переносимой излучением при удлинении дуги, возросла и достигла 400 kW при токе 25 кА, что составляет  $\sim 30\%$  от полной мощности, выделяющейся в дуге (1200 kW).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] E.E. Schade, D.L. Shmelev, IEEE Trans. Plasma Sci., **31** (5), 890 (2003). DOI: 10.1109/TPS.2003.818436
- [2] L. Wang, S. Jia, Y. Liu, B. Chen, D. Yang, Z. Shi, J. Appl. Phys., **107** (11), 113306 (2010). DOI: 10.1063/1.3386568
- [3] N. Wenzel, S. Kosse, A. Lawall, R. Renz, W. Hartmann, in *2012 25th Int. Symp. on discharges and electrical insulation in vacuum (ISDEIV)* (IEEE, 2012), p. 321–324. DOI: 10.1109/DEIV.2012.6412518
- [4] Ю.А. Баринов, К.К. Забелло, А.А. Логачев, И.Н. Полуянова, Е.В. Шерстнев, С.М. Школьник, Письма в ЖТФ, **50** (24), 40 (2024). DOI: 10.61011/PJTF.2024.24.59436.6419k [Yu.A. Barinov, K.K. Zabello, A.A. Logachev, I.N. Poluyanova, E.V. Sherstnev, S.M. Shkol'nik, Tech. Phys. Lett., **50** (12), 118 (2024). DOI: 10.61011/TP.L.2024.12.60370.6419k].
- [5] Ю.А. Баринов, К.К. Забелло, А.А. Логачев, И.Н. Полуянова, С.М. Школьник, Прикладная физика, № 1, 11 (2025). DOI: 10.51368/1996-0948-2025-1-11-15

- [6] Yu.A. Varinov, K.K. Zabello, A.A. Logachev, I.N. Poluyanov, S.M. Shkol'nik, in *Proc. of the 30th Int. Symp. on discharges and electrical insulation in vacuum (ISDEIV)* (Okinawa, Japan, 2023), p. 235–237.
- [7] Ю.А. Баринов, К.К. Забелло, А.А. Логачев, И.Н. Полуянова, Е.В. Шерстнев, С.М. Школьник, *Письма в ЖТФ*, **47** (3), 18 (2021). DOI: 10.21883/PJTF.2021.03.50569.18462 [Yu.A. Varinov, K.K. Zabello, A.A. Logachev, I.N. Poluyanov, E.V. Sherstnev, S.M. Shkol'nik, *Tech. Phys. Lett.*, **47** (2), 118 (2021). DOI: 10.1134/S1063785021020024].
- [8] В.Ф. Лапшин, *Прикладная физика*, № 5, 25 (2022). DOI: 10.51368/1996-0948-2022-5-25-31.