

УДК 533.92
EDN: QQASPN

PACS: 52.80. Mg

Особенности формирования импульсного разряда в предварительно ионизированном гелии

© В. С. Курбанисмаилов¹, Г. Б. Рагимханов^{1,*}, Д. В. Терешонок², З. Р. Халикова¹,
С. А. Майоров², Х. М. Абакарова¹

¹ Дагестанский государственный университет, Республика Дагестан, Махачкала, 367025 Россия

* E-mail: gb-r@mail.ru

² Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, 125412 Россия

Статья поступила в редакцию 27.08.2025; после доработки 22.09.2025; принята к публикации 11.12.2025

Шифр научной специальности: 1.3.9

Представлены результаты экспериментального исследования импульсного газового разряда в гелии при атмосферном давлении с ультрафиолетовой предыонизацией газа в системе «сетчатый катод – плоский анод». Напряжение на разрядном конденсаторе изменялось в диапазоне 3–14 кВ. Установлено, что амплитудное значение тока монотонно возрастает от десятков единиц до ~1000 А с увеличением прикладываемого напряжения, демонстрируя почти линейную зависимость амплитудного значения тока I_{max} от прикладываемого напряжения.

Ключевые слова: импульсный газовый разряд; гелий; предварительная ионизация; аперидический режим.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-6-31-37

Введение

Исследование физических процессов в импульсных газовых разрядах при атмосферном и более высоких давлениях представляет значительный интерес как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения, в частности, для разработки эффективных источников излучения в ВУФ, УФ и видимом диапазонах, а также для накачки газовых лазеров. Существенную роль в формировании таких разрядов играют механизмы предыонизации газа, геометрия электродной системы, параметры высоковольтного импульса напряжения и свойства рабочей газовой среды.

В обзоре Осипова В. В. [1] излагается современное состояние исследований области физики мощных электрических разрядов, способных возбудить большие объемы газа. Приведены свойства и особенности самостоятельных разрядов высокого давления. Рас-

смотрены экспериментальные результаты и физические модели их формирования и контракции. Показано, что нижняя граница зажигания объемного разряда связана с катодной неустойчивостью. Отмечены трудности построения полной теории объемного разряда. При этом одной из главных причин, контракции разряда является развитие взрывных процессов на поверхности электродов-эктонов, чему посвящена обзорная работа Г. А. Месяца [2].

Обзорная работа В. Ф. Тарасенко и соавт. [3] обобщает данные по диффузным и объемным разрядам высокого давления с поперечной накачкой. Подчеркивается, что главное различие между ними обусловлено механизмом зажигания: объемный разряд требует предыонизации и однородного поля, а диффузный реализуется за счёт стримерного пробоя и убегающих электронов, особенно при малом радиусе кривизны электродов.

В серии современных исследований с использованием высоковольтных импульсов [3–7] показано, что структура и динамика разрядного канала зависят от предыстории ионизации, распределения поля и давления газа. Установлено, что при определённых параметрах схемы и газа может реализовываться колебательный режим тока, вызванный паразитной индуктивностью цепи [8–10], а пространственная структура разряда может претерпевать переход от диффузной к искровой.

В ранее приведенных нами исследованиях [11–13] подробно проанализированы электрические, оптические и спектральные характеристики импульсного разряда в гелии с УФ-предыонизацией (катод-сплошной, анод-сетчатый). В [11] проанализирован процесс контрагирования объемного разряда в гелии атмосферного давления при изменении начальных условий эксперимента. В [12] изучены особенности спектра излучения исследуемого газа и спектра материала вещества электродов при различных начальных условиях, а именно в режиме однородного горения ОР, в режиме перехода ОР в искровой канал и в режиме перехода ОР в сильнооточный диффузный режим (СДР) в импульсном разряде гелия высокого давления. В работе [13] рассмотрены экспериментальные результаты исследования спектра излучения импульсного разряда в парогазовых смесях гелия высокого давления, в котором легкоионизируемые примеси паров материала электродов (Fe, Al) появляются из-за распыления электродов при ионной бомбардировке. Показано, что пары материала электродов существенно влияют на разряд и во многом определяют его спектральные характеристики.

В настоящей работе приведены результаты экспериментального исследования импульсного газового разряда в гелии при атмосферном давлении с ультрафиолетовой предыонизацией газа в системе «сетчатый катод – плоский анод» и проведено сравнение экспериментальных данных с расчётами параметров эквивалентной схемы.

Экспериментальная установка и измерения

На рис. 1 представлена принципиальная схема установки по исследованию импульсно-

го разряда в гелии. После зарядки конденсатора C_0 до 3–14 кВ напряжение с него подавалось на два электрода: плоский анод с радиусами $r_0 = 2$ см и сетчатый катод с расстоянием между ними $d = 1$ см. Для предварительной ионизации использовался искровой разряд.

Фотографирование интегрального свечения разряда осуществлялось с помощью беззеркального цифрового фотоаппарата Sony Alpha A7 III (ILCE-7M3B). Напряжение и ток разряда регистрировались с применением цифрового осциллографа типа Tektronix TDS 2024B с полосой пропускания 200 МГц с помощью малоомного шунта R_b и омического делителя напряжения R_1, R_2 .

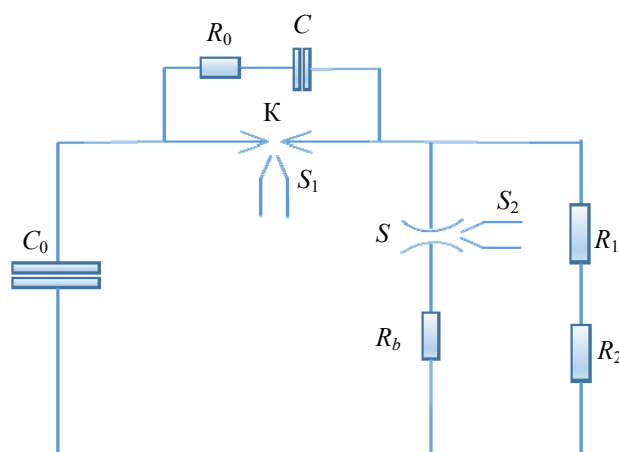


Рис. 1. Принципиальная схема установки. C_0 – разрядная емкость, R_b – балластное сопротивление, K – коммутатор, S_1 – источник предыонизации газовой среды коммутатора, S – основной разрядный промежуток, S_2 – источник предыонизации основного разрядного промежутка ($R_0 = 300$ Ом, $R_1 = 21,3$ кОм, $R_2 = 50$ Ом, $C = 4$ нФ, $C_0 = 15$ нФ)

Результаты исследования характеристик аperiodического разряда

На рисунке 2 представлены осциллограммы тока разряда при аperiodическом режиме протекания тока для двух значений прикладываемого напряжения. В аperiodическом режиме форма импульса тока изменяется в зависимости от приложенного напряжения, что указывает на сложную динамику процессов в разрядном промежутке. При малых значениях напряжения U_0 форма импульса тока носит колоколообразный характер, а при высоких значениях прикладываемого поля наблюдаются колебания.

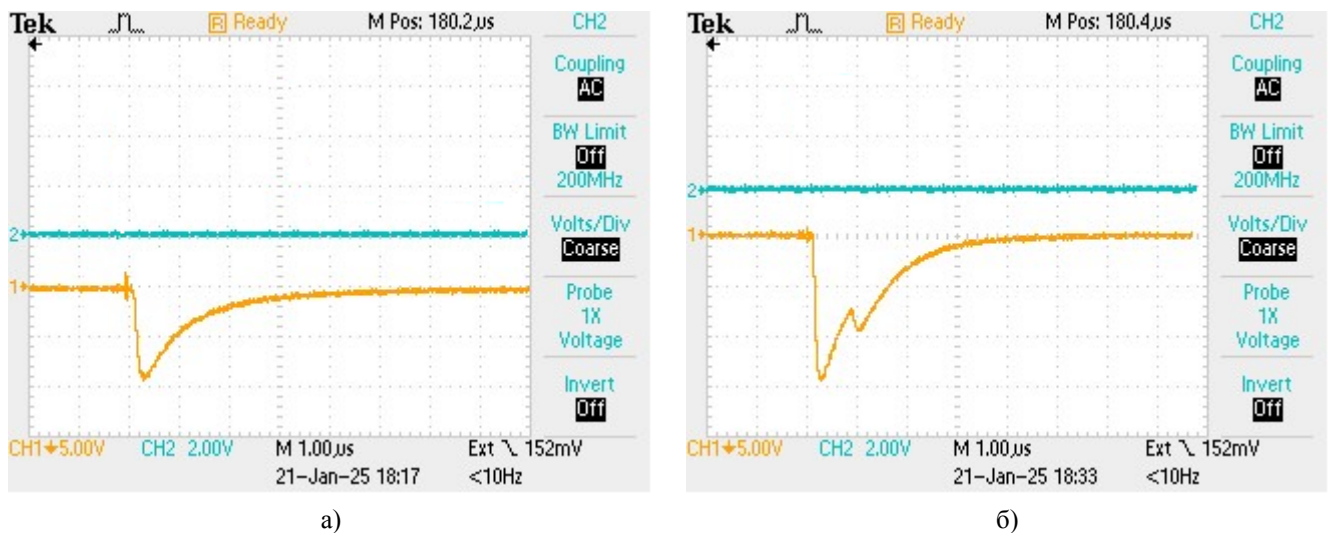


Рис. 2. Характерные осциллограммы тока разряда в аperiodическом режиме протекания тока при давлении $p = 3 \text{ атм}$ и $R_b = 2 \text{ }\Omega$: а) – $U_0 = 8 \text{ кВ}$, б) – $U_0 = 11 \text{ кВ}$

С увеличением давления газа наблюдается уменьшение амплитуды тока (см. рис. 3б) при одновременном увеличении длительности протекания разрядного тока. В случаях, когда на фоне объемного разряда формируется искровой канал, на осциллограмме тока появляются два характерных максимума (рис. 2б). Первый из них соответствует формированию

объемного разряда, а второй – переходу в искровой канал.

С увеличением амплитуды напряжения от 3 до 14 кВ наблюдается линейный рост амплитудного значения тока от десятков до сотен ампер (рис. 3а, б), причем, амплитудное значение тока повышается с уменьшением балластного сопротивления.

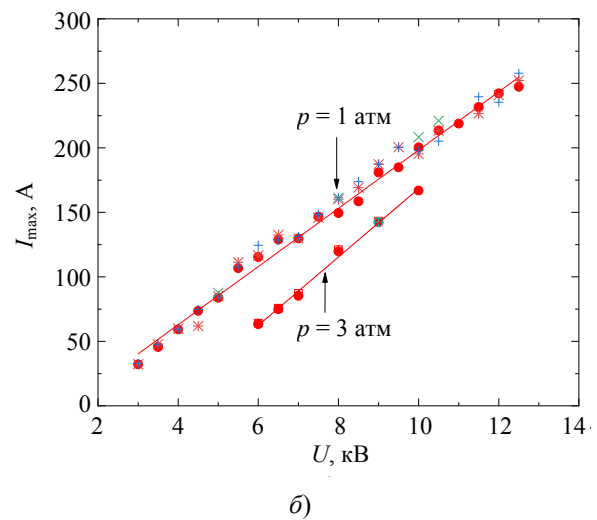
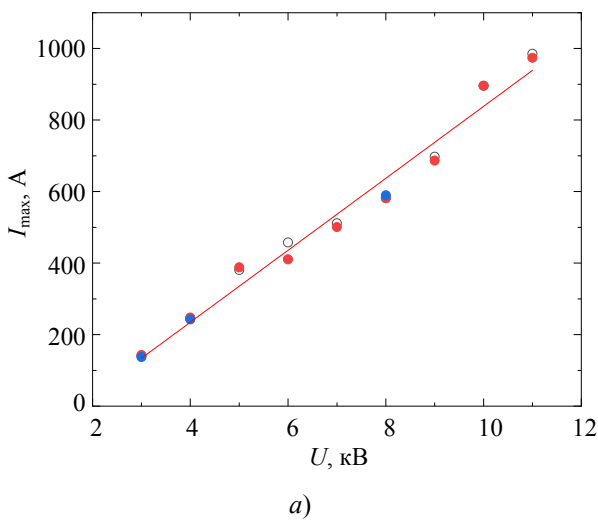


Рис. 3. Амплитудные значения тока разряда в аperiodическом режиме при разных условиях эксперимента: а) $R_b = 2 \text{ }\Omega$, $p = 1 \text{ атм}$, б) $R_b = 52 \text{ }\Omega$, $p = 1 \text{ атм}$ и 3 атм .

На рисунке 4 представлены интегральные картины свечения разряда в аperiodическом режиме при $R_b = 2 \text{ }\Omega$. Нижний электрод – сетчатый (катод), верхний – сплошной (анод). Как видно, при напряжении 3 кВ в условиях предварительной ионизации газа формируется объемный разряд, представляю-

щий собой совокупность диффузных каналов, привязанных к катоду. При увеличении давления газа и более высоких напряжениях возможно появление диффузных каналов – локализации тока в виде ярких узких каналов, преимущественно вблизи сетчатого катода. Начиная с 7 кВ при атмосферном давлении на

аноде появляются яркие светящиеся пятна. При увеличении напряжения $U_0 \geq 8$ кВ наблюдается развитие искровых каналов, как с катода, так и с анода; каналы могут перекрываться друг с другом, а количество анодных пятен возрастает. Характерный диаметр каналов, оценённый по свечению, составляет около 0,6–0,7 мм.

При повышении давления до 2 атмосфер наблюдается значительное количество токо-

вых каналов, преимущественно сосредоточенных в центральной части разрядного промежутка. При высоких напряжениях формируется один ярко выраженный искровой канал с диаметром около 2 мм на фоне множества диффузных каналов. При давлении 2 атм диаметр искрового канала оказывается меньше, чем при атмосферном. Видимо, этот эффект связан с усилением самосжатия в условиях повышенной плотности газа.

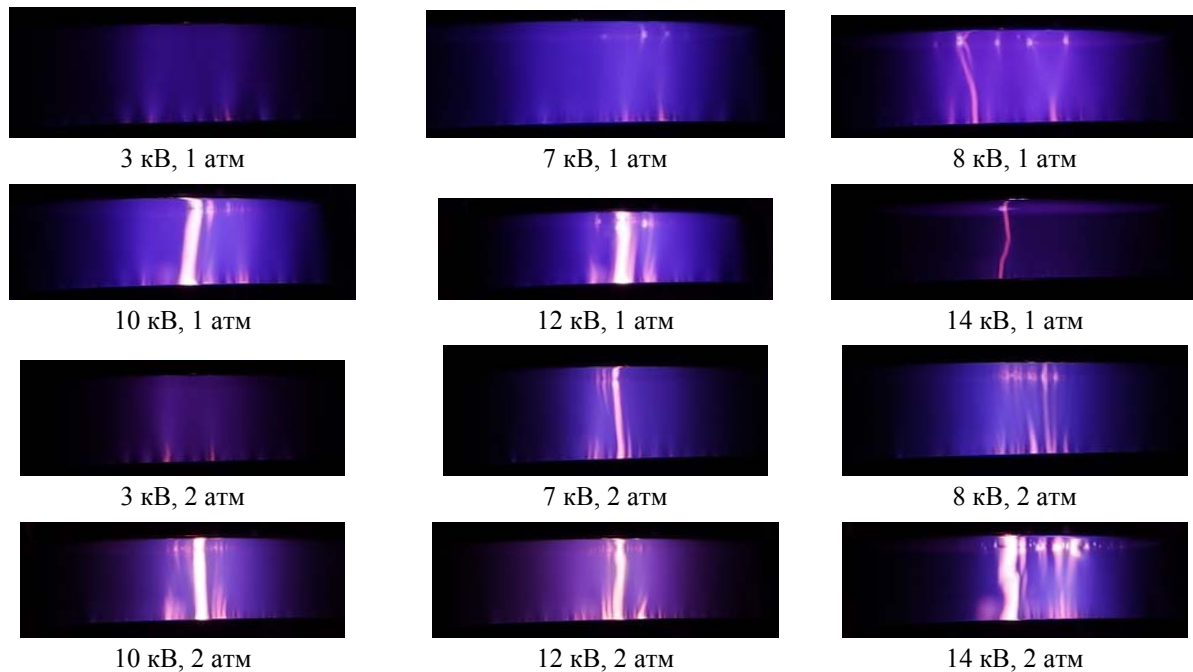


Рис. 4. Интегральные картины свечения разряда (апериодический режим), $R_b = 2$ Ом

Как было сказано выше, при увеличении прикладываемого напряжения, на осциллограмме тока наблюдаются небольшие колебания (рис. 5).

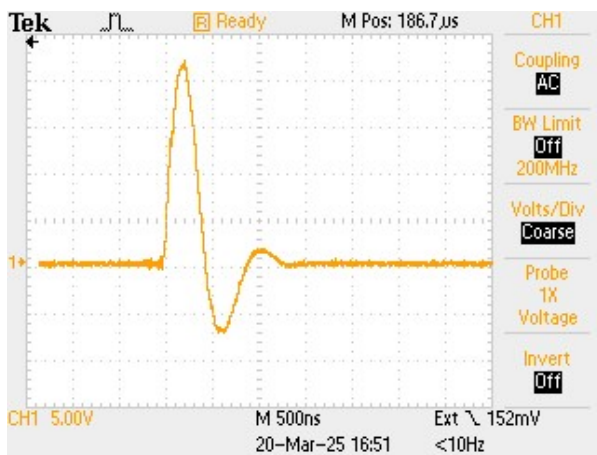


Рис. 5. Характерные осциллограммы тока разряда: $p = 1$ атм, $U_0 = 8$ кВ, $R_b = 2$ Ом

Наличие колебательного режима дает возможность для разрядного промежутка использовать замкнутый контур RLC -цепи с сопротивлением R_d , индуктивностью L_d и емкостью C_d , колебания тока I которого описываются выражением: $I(t) = I_0 e^{-\delta t} \cos(\omega t)$, где t – время, $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} = \frac{2\pi}{T}$, T – период колебаний, $I(t=0) = I_0$ – амплитуда тока, $\delta = \frac{R_d}{2L_d}$,

$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_d C_d}}$. Условие наличия колебательного режима определяется неравенством: $L_d > \frac{R_d^2 C_d}{4}$.

Если колебания начинаются после достижения определённого расстояния в коммутаторе, то можно предположить, что эф-

эффективное значение индуктивности L_d рассматриваемой цепи растет с увеличением межэлектродного зазора в коммутаторе. Это качественно согласуется с тем, что наблюдается в эксперименте. При прочих равных условиях (значения R_b и U_0) аperiodический режим сменяется на колебательный при увеличении межэлектродного зазора коммутатора.

Следует отметить, что коэффициент затухания δ определяется отношением амплитуд тока с интервалом в период, т. е.

$$\delta = \frac{\ln(I_0 / I(T))}{T}.$$

Из эксперимента следует, что $\delta \approx \frac{\ln(11)}{T}$, соответственно, из определения

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} = \frac{2\pi}{T} \text{ получим } \omega \approx \omega_0.$$

В соответствии с ранее выполненными расчетами [11] концентрация электронов в разрядном промежутке в диффузном режиме при атмосферном давлении находится на уровне $n_0 \sim 10^{20} \text{ м}^{-3}$, что дает для сопротивления разрядного промежутка $R_d \approx (\pi r_0^2 e n_e \mu_e)^{-1} d \approx 5 \text{ Ом}$, где e – заряд электрона, n_e , μ_e – концентрация и подвижность, $\mu_e \approx 0,1 \text{ м}^2/(\text{с}\cdot\text{В})$ при нормальной плотности газа [14, 15].

В качестве эффективного значения емкости примем величину емкости разрядного конденсатора $C_d = C_0 = 1,5 \times 10^{-8} \text{ Ф}$. Данное предположение оправдано тем, что емкость разрядного промежутка $C_g \sim \epsilon_0 \pi r_0^2 / d \sim 1 \text{ пФ}$, так и самой плазмы $C_p \sim 2\pi \epsilon_0 d \sim 0,6 \text{ пФ}$ намного меньше величины C_0 . Тогда в соответствии с определением δ найдем индуктивность: $L_d = \frac{R_d T}{2 \ln(11)} \approx 0,84 \text{ мкГн}$. Из графика 2б

видим, что период колебаний составляет 0,8 мкс, тогда для индуктивности получаем

$$L_d = \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 / C_d \approx 1,1 \text{ мкГн}.$$

При этом величина L_d эквивалентной схемы получилась достаточно большой, что, видимо, обусловлено паразитной индуктивностью установки. Индуктивность плазмы достаточно мала:

$$L_p \sim \frac{\mu_0 d}{2\pi} = 2 \text{ нГн} (\mu_0 - \text{магнитная постоянная})$$

по сравнению с L_d . В то же время соедини-

тельный провод длиной $l = 1 \text{ м}$ и радиусом $r = 1 \text{ мм}$ обладает индуктивностью

$$L_w \sim \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln\left(\frac{l}{r}\right) \approx 1,4 \text{ мкГн},$$

которая сопоставима с оценками L_d .

Таким образом, хотя наличие паразитной индуктивности и приводит к появлению колебаний тока, но, с другой стороны, дает возможность получить диффузный разряд в гелии при атмосферном давлении и выше на временах более 1 мкс, что может быть использовано в газоразрядных приложениях.

Заключение

Таким образом, в условиях предварительной ионизации газа в диапазоне 3–14 кВ и балластном сопротивлении $2 \text{ }\Omega$ в гелии атмосферного давления обнаружены два режима горения разряда, а именно колебательный и аperiodический. Также обнаружено, что межэлектродное расстояние в коммутаторе определяет переход от аperiodического к колебательному режиму горения разряда. Для аperiodического режима протекания тока характерна практически линейная зависимость амплитудного значения тока разряда I_{max} от приложенного напряжения с характерными значениями тока от десятков до $\sim 1000 \text{ А}$. При увеличении давления газа с 1 до 3 атм амплитудное значение тока уменьшается. Оптическая диагностика показывает, что при 3 кВ формируется объёмный диффузный разряд, а начиная с 7–8 кВ возникают локальные токовые нити диаметром 0,6–0,7 мм, число которых растёт с напряжением. Но уже при 14 кВ наблюдается единичный яркий искровой канал.

На основании данного экспериментального факта и анализа условий существования колебаний тока разряда выдвинуто предположение, что межэлектродное расстояние в коммутаторе определяет значение индуктивности в эквивалентной RLC-схеме. На основании осциллограмм тока найдено эффективное значение индуктивности рассматриваемой установки.

Установленные закономерности позволяют целенаправленно выбирать параметры схемы (емкость, балластное сопротивление, длина соединительных шин) для подавления

колебаний в режиме однократного импульса тока – что критически важно для накачки ВУФ/УФ-лазеров и других плазменных приложений, требующих высоких пиковых энергий без последующего затухания.

*Работа выполнена при финансовой поддержке
Российского научного фонда
(проект № 25-22-20090).*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Осипов В. В. / Успехи физических наук. 2000. Т. 170. С. 225–245.
2. Месяц Г. А. / Успехи физических наук. 1995. Т. 165. № 6. С. 601–626.
3. Тарасенко В. Ф., Панченко А. Н., Белоплотов Д. В. / Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7. № 6. С. 535–544.
4. Lu Y., Li W., Zhang J. et al. / Plasma Sources Sci. Technol. 2015. Vol. 24. № 4. P. 44005. doi: 10.1088/0963-0252/24/4/044005
5. Motallebi S., Sadighzadeh A., Safari S. A. et al. / J. Appl. Phys. 2023. Vol. 134. P. 203303. doi: 10.1063/5.0164607
6. Feng Y., Li H., Fang K. et al. / Chin. Phys. B. 2023. Vol. 32. № 4. P. 045206. doi: 10.1088/1674-1056/adc670
7. Gao M., Zhu Y., Shi J. et al. / J. Phys. D: Appl. Phys. 2023. Vol. 56. P. 255201. doi: 10.1088/1361-6463/adace
8. Li H., Wang Y., Chen M. et al. / Plasma Sources Sci. Technol. 2024. Vol. 33. P. 015001. doi: 10.1088/1361-6595/ad8308
9. Xie H., Yu H., Li Y. et al. / Plasma Res. Express. 2024. Vol. 6. P. 015009. doi: 10.1088/2058-6272/ad5ca0
10. Lu Y., Zhang J., Li W. et al. / Plasma Sources Sci. Technol. 2020. Vol. 29. P. 015012. doi: 10.1088/1361-6595/ab6da6
11. Курбанисмаилов В. С., Омаров О. А. / Теплофизика высоких температур. 1995. Т. 33. № 3. С. 346–350.
12. Курбанисмаилов В. С., Омаров О. А., Рагимханов Г. Б. и др. / Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 3. С. 234.
13. Курбанисмаилов В. С., Омаров О. А., Ашурбеков Н. А., Рагимханов Г. Б., Гаджиев М. Х. / Прикладная физика. 2004. № 3. С. 41–46.
14. Maiorov S. A., Golyatina R. I., Kodanova S. K., Ramazanov T. S. / Plasma Phys. Rep. 2024. Vol. 50. № 8. P. 1029.
15. Майоров С. А., Голятина Р. И. / Теплофизика высоких температур. 2025. Т. 43. № 3. С. 326–332.

PACS: 52.80. Mg

Features of pulsed discharge formation in pre-ionized helium

V. S. Kurbanismailov¹, G. B. Ragimkhanov^{1,*}, D. V. Tereshonok², Z. R. Khalikova¹,
S. A. Maiorov² and Kh. M. Abakarova¹

¹ Dagestan State University, Republic of Dagestan, Makhachkala, 367025 Russia

² Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences, Moscow, 125412 Russia
E-mail: gb-r@mail.ru

Received 27.08.2025; revised 22.09.2025; accepted 11.12.2025

The results of an experimental study of pulsed gas discharge in helium at atmospheric pressure with ultraviolet pre-ionization of the gas in a "mesh cathode – flat anode" system are presented. The voltage on the discharge capacitor was varied in the range of 3–14 kV. It was found that the peak current value increases monotonically from several tens to ~1000 A with increasing applied voltage, demonstrating an almost linear dependence of the peak current value (I_{max}) on the applied voltage.

Keywords: pulsed gas discharge; helium; pre-ionization; aperiodic regime.

REFERENCES

1. Osipov V. V., Usp. Fiz. Nauk **170**, 225–245 (2000).
2. Mesyats G. A., Usp. Fiz. Nauk **165**, 6, 601–626 (1995).
3. Tarasenko V. F., Panchenko A. N. and Beloplotov D. V., Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics) **7** (6), 535–544 (2019) [in Russian].
4. Lu Y., Li W., Zhang J. et al., Plasma Sources Sci. Technol. **24** (4), 044005 (2015). doi: 10.1088/0963-0252/24/4/044005
5. Motallebi S., Sadighzadeh A., Safari S. A. et al., J. Appl. Phys. **134**, 203303 (2023). doi: 10.1063/5.0164607
6. Feng Y., Li H., Fang K. et al., Chin. Phys. B **32** (4), 045206 (2023). doi: 10.1088/1674-1056/adc670
7. Gao M., Zhu Y., Shi J. et al., J. Phys. D: Appl. Phys. **56**, 255201 (2023). doi: 10.1088/1361-6463/adcace
8. Li H., Wang Y., Chen M. et al., Plasma Sources Sci. Technol. **33**, 015001 (2024). doi: 10.1088/1361-6595/ad8308
9. Xie H., Yu H., Li Y. et al., Plasma Res. Express **6**, 015009 (2024). doi: 10.1088/2058-6272/ad5ca0
10. Lu Y., Zhang J., Li W. et al., Plasma Sources Sci. Technol. **29**, 015012 (2020). doi: 10.1088/1361-6595/ab6da6
11. Kurbanysmailov V. S. and Omarov O. A., High Temperature. **33** (3), 346–350 (1995).
12. Kurbanysmailov V. S., Omarov O. A., Ragimkhanov G. B. et al., Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics) **2** (3), 234 (2014) [in Russian].
13. Kurbanysmailov V. S., Omarov O. A., Ashurbekov N. A., Ragimkhanov G. B. and Gadzhiev M. Kh., Applied Physics, № 3, 41–46 (2004) [in Russian].
14. Maiorov S. A., Golyatina R. I., Kodanova S. K. and Ramazanov T. S., Plasma Phys. Rep. **50** (8), 1029–1041 (2024).
15. Maiorov S. A. and Golyatina R. I., High Temperature **43** (3), 326–332 (2025).

Об авторах

Курбанисмаилов Вали Сулейманович, профессор, д.ф.-м.н., Дагестанский государственный университет (367025, Россия, Республика Дагестан, Махачкала, ул. М. Гаджиева, 43а). E-mail: vali_60@mail.ru SPIN-код: 3774-5509, AuthorID: 124135

Ражимханов Гаджимирза Балагланович, к.ф.-м.н., доцент, Дагестанский государственный университет (367025, Россия, Республика Дагестан, Махачкала, ул. М. Гаджиева, 43а). E-mail: gb-r@mail.ru SPIN-код: 8156-8736, AuthorID: 417790

Терешонок Дмитрий Викторович, к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур РАН (125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2). SPIN-код: 3790-9092, AuthorID: 601492

Абакарова Халимат Магомеловна, заведующая кабинетом, Дагестанский государственный университет (367025, Россия, Республика Дагестан, Махачкала, ул. М. Гаджиева, 43а). E-mail: abakarova2412@mail.ru

Майоров Сергей Алексеевич, д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур РАН (Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2). E-mail: mayorov_sa@mail.ru SPIN-код: 9331-1751, AuthorID: 24761

Халикова Заира Расуловна, Дагестанский государственный университет (367025, Россия, Республика Дагестан, Махачкала, ул. М. Гаджиева, 43а). SPIN-код: 3112-0424, AuthorID: 1031654