Кажущаяся стабильность и критическая плотность тока в низковольтном пучковом разряде в инертных газах

© *А.Х. Бадр*[1], *А.С. Мустафаев*[1], *В.С. Сухомлинов*[2], *Г.А. Поляков*[1]

[1] Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия
[2] Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: hady93327@gmail.com

Поступило в Редакцию 20 апреля 2026 г.
В окончательной редакции 19 августа 2026 г.
Принято к публикации 23 октября 2026 г.

Исследована устойчивость низковольтного пучкового разряда в инертных газах (НПР) — одного из наиболее перспективных для разработки нового поколения приборов плазменной электроники. Рассчитаны спектры шумов плазмы и электронного пучка, которые влияют на потерю устойчивости разряда. Обнаружено, что в условиях известных экспериментов по измерению функции распределения электронов в НПР, в ходе которых считалось, что разряд находится в устойчивом состоянии, в действительности НПР конвективно неустойчив. Объяснено явление увеличения инкремента гармонических колебаний при росте тока в НПР.

Ключевые слова: токовые шумы, электронный пучок, конвективная неустойчивость.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.24.64023.9485k

Исследования закономерностей динамики электронных пучков в плазме важны для разработки новых приборов плазменной электроники, в которых применяется пучковая плазма, а именно управляемых стабилизаторов широкого назначения, источников интенсивного электромагнитного излучения, управляемых элементов электронных цепей, плазмохимических реакторов и т. п. Один из наиболее перспективных в этом отношении пучковых разрядов — низковольтный пучковый разряд в инертных газах (НПР) [1–3] в условиях, когда межэлектродное расстояние d составляет величину порядка длины пробега электрона λ_{ea} относительно упругих электрон-атомных столкновений:

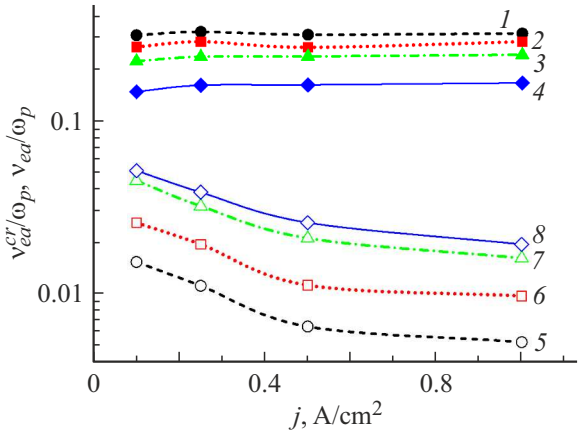
$$d \sim \lambda_{ea}. \qquad (1)$$

Однако при его практическом использовании зачастую возникают различные типы неустойчивостей относительно начальных шумов (плазменных и токовых), препятствующие применению НПР и других систем быстрый электронный пучок–газоразрядная плазма (СЭПП) в прикладных целях. Это происходит при превышении значения плотности тока, которое будем называть критическим. Указанное значение зависит от параметров НПР (сорта газа, давления, межэлектродного расстояния). В этой ситуации одним из важнейших является вопрос о причинах возникновения начальных шумов в системе и об их спектре.

Задача об устойчивости СЭПП обычно решается в одной из двух постановок: как задачи с граничными либо с начальными условиями. В первом случае при рассмотрении эволюции гармонического возмущения считается, что в системе есть локализованный в пространстве источник шумов, и комплексным полагают волновое число γ. При этом исследуется пространственная эволюция указанных возмущений. В случае НПР источник таких шумов — электронный пучок на входе из прикатодного слоя в плазму, а природа шумов — дробовой и тепловой шумы эмиссионного тока нагреваемого катода [4]. Во втором случае считается, что в начальный момент времени в объеме системы есть пространственное распределение возмущений, и комплексной считают частоту ω, а результатом решения является зависимость амплитуды возмущений от времени в каждой точке СЭПП. Источником этих шумов в НПР является плазма, а природа шумов — колебания тока и межэлектродного напряжения в НПР, обусловленные хаотическим движением электронов и ионов, а также процессами рождения и гибели заряженных частиц в плазме [5]. Как известно, неустойчивость в задаче с граничными условиями приводит к так называемой конвективной неустойчивости, а в задаче с начальными условиями может приводить к абсолютной [6,7].

В работе [4] показано, что в НПР при наличии в спектре дробового шума пучка плазменной частоты ω_p именно этот вид шумов вносит основной вклад в потерю устойчивости НПР. Таким образом, принципиальным является вопрос о том, содержит ли спектр дробового шума пучка на границе плазмы и прикатодного слоя частоту ω_p. Это определяется структурой прикатодного слоя. Исследование данной проблемы и является одной из целей работы.

Физическая модель НПР в рассматриваемых условиях разработана в [8]. Согласно ей, в НПР существуют три группы электронов: 1) электроны пучка, сформированного ускоренными в прикатодном слое электронами, которые испускает нагретый до температуры порядка 1000 K катод; 2) упругорассеянные электроны пучка; 3) электроны плазмы. Энергии электронов первой и второй групп близки, поскольку в рассматриваемых условиях (см. (1)) электроны испытывают всего несколько



Сравнение критических ν_{ea}^{cr}/ω_p (*1*–*4*) и имеющих место в НПР ν_{ea}/ω_p (*5*–*8*) частот электрон-атомных столкновений при различных плотностях тока j и давлениях P_{He} в НПР в He. $P_{\mathrm{He}} = 0.25$ (*1*, *5*), 0.5 (*2*, *6*), 1 (*3*, *7*), 2 Torr (*4*,*8*).

упругих столкновений и потери их энергии невелики. Эти энергии составляют 15–30 eV (в зависимости от сорта инертного газа). Электроны плазмы образуются за счет редких неупругих столкновений (сечение которых существенно меньше, чем упругих) и имеют средние энергии 0.5–1 eV. Концентрация электронов пучка и упругорассеянных электронов составляет порядка 0.1 от концентрации электронов в плазме.

Данная физическая модель была использована для исследования устойчивости НПР в условиях выполнения соотношения (1). Соответствующее дисперсионное уравнение для задач с начальными и граничными условиями было получено ранее в работе [8]. Расчеты проводились для инертного газа He, поскольку именно этот вид НПР наиболее экспериментально изучен. Как известно [8], электрон-атомные столкновения в СЭПП способствуют повышению устойчивости, что связано с диссипацией энергии возмущений, распространяющихся в системе. Таким образом, существует такая частота электрон-атомных столкновений ν_{ea}^{cr}, называемая критической, что при выполнении неравенства

$$\frac{\nu_{ea}^{cr}}{\omega_p} > \frac{\nu_{ea}}{\omega_p} \qquad (2)$$

(ν_{ea} — частота электрон-атомных столкновений при данных условиях) система становится неустойчивой.

Обнаружено, что в существенной области параметров НПР, где проводились экспериментальные исследования [2,9,10], система была конвективно неустойчива, в том числе и в условиях, когда авторы данных работ считали, что НПР находится в устойчивом состоянии. В эксперименте вывод о возникновении неустойчивости делался на основании того, что электронный пучок в НПР не достигал анода по причине аномальной релаксации электронов пучка по импульсу и энергии. В действительности данная бесстолкновительная релаксация пучка наступает в результате так называемой фазовой фокусировки, когда в результате пространственного усиления возмущений пучка образуется область аномального отрицательного заряда, рассеивающего электроны пучка [11–13]. Расстояние L_f от катода НПР до этой области называется фокусом и уменьшается с ростом инкремента [11,14] так, что при нулевом инкременте (в точке потери устойчивости) выполняется соотношение $L_f \to \infty$. Аномальную (бесстолкновительную) релаксацию электронного пучка в эксперименте в НПР можно зарегистрировать только при условии выполнения неравенства

$$L_f < d. \qquad (3)$$

Таким образом, область параметров НПР, когда система уже конвективно неустойчива, но инкремент настолько мал, что выполняется

$$d < L_f < \infty, \qquad (4)$$

по аномальной релаксации определить невозможно. Как видно из рисунка, с ростом тока возрастает разница между критической и имеющей место в разряде частотами электрон-атомных столкновений. Это приводит к росту инкремента и, следовательно, к уменьшению L_f. Таким образом, при некотором токе начинает выполняться соотношение (3).

Что касается абсолютной неустойчивости НПР в рассматриваемых условиях, то косвенным подтверждением ее отсутствия можно считать доказанную экспериментально стабильность параметров системы в фиксированной точке пространства на протяжении времени, много большего периода ленгмюровских колебаний. Однако строгое доказательство этого факта требует отдельного исследования.

Необходимо также отметить, что полученные результаты имеют важное значение не только для НПР, но и для других типов разрядов с подогреваемым катодом, когда электроны поступают с катода в разряд за счет термоэмиссии и ускоряются в прикатодном слое до энергий, существенно бóльших средней энергии электронов плазмы. Примером могут служить разряды в ксеноне при высоких давлениях с термоэмиссией из катода [15], тлеющий разряд в парах ртути, несамостоятельная дуга с накальным катодом [16] и др.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] F.G. Baksht, V.F. Lapshint, A.S. Mustafaev, J. Phys. D, **28**, 694 (1995). DOI: 10.1088/0022-3727/28/4/012
[2] А.С. Мустафаев, ЖТФ, **71** (4), 111 (2001). [A.S. Mustafaev, Tech. Phys., **46** (4), 472 (2001). DOI: 10.1134/1.1365475].
[3] A.S. Mustafaev, V.I. Demidov, I.D. Kaganovich, M.E. Koepke, A. Grabovskiy, Phys. Plasmas, **21**, 053508 (2014). DOI: 10.1063/1.4876928

[4] V. Sukhomlinov, A. Mustafaev, A. Zaitsev, N. Timofeev, J. Phys. Soc. Jpn., **91** (2), 024501 (2022). DOI: 10.7566/JPSJ.91.024501
[5] S. Kojima, K. Takayama, A. Shimauchi, J. Phys. Soc. Jpn., **9** (5), 802 (1954). DOI: 10.1143/JPSJ.9.802
[6] P.A. Sturrock, Phys. Rev., **112** (5), 1488 (1958). DOI: 10.1103/PhysRev.112.1488
[7] А.И. Ахиезер, Р.В. Половин, УФН, **104** (2), 185 (1971). DOI: 10.3367/UFNr.0104.197106a.0185 [A.I. Akhiezer, R.V. Polovin, Sov. Phys. Usp., **14** (3), 278 (1971). DOI: 10.1070/PU1971v014n03ABEH004700].
[8] V. Sukhomlinov, R. Matveev, A. Mustafaev, N. Timofeev, Phys. Plasmas, **27**, 062106 (2020). DOI: 10.1063/5.0001822
[9] Ф.Г. Бакшт, В.Ф. Лапшин, ЖТФ, **61** (6), 13 (1991).
[10] A.S. Mustafaev, V.I. Demidov, I. Kaganovich, S.F. Adams, M.E. Koepke, A. Grabovskiy, Rev. Sci. Instrum., **83**, 103502 (2012). DOI: 10.1063/1.4757111
[11] V.S. Sukhomlinov, R.J. Matveev, A.S. Mustafaev, N.A. Timofeev, Chin. J. Phys., **74**, 195 (2021). DOI: 10.1016/j.cjph.2021.06.019
[12] J.A. Davis, A. Bers, in *Proc. of Symp. on turbulence of fluids and plasmas* (Brooklyn, 1968), p. 87.
[13] R.L. Morse, C.W. Nielson, Phys. Fluids, **12**, 2418 (1969). DOI: 10.1063/1.1692361
[14] T.M. O'Neil, J.H. Winfrey, Phys. Fluids, **15**, 1514 (1972). DOI: 10.1063/1.1692361
[15] N.A. Timofeev, V.S. Sukhomlinov, G. Zissi, I.Yu. Mukharaeva, D.V. Mikhaylov, A.S. Mustafaev, P. Dupuis, D.Q. Solikhov, V.S. Borodina, IEEE Trans. Plasma Sci., **49** (8), 2387 (2021). DOI: 10.1109/TPS.2021.3093816
[16] A. Von Engel, *Ionized gases* (Clarendon Press, Oxford, 1965).