

УДК 537.521  
 EDN: XRYSD

PACS: 51.50.+v

## О характеристиках положительного столба тлеющего разряда при низком давлении инертного газа

© С. А. Майоров<sup>1,\*</sup>, Р. И. Голятина<sup>2</sup>, Е. С. Дзлиева<sup>3</sup>, В. Ю. Карасев<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН), Москва, 125412 Россия

\* E-mail: mayorov\_sa@mail.ru

<sup>2</sup> Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва, 119991 Россия

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034 Россия

Статья поступила в редакцию 25.06.2025; после доработки 5.08.2025; принята к публикации 11.08.2025

Шифр научной специальности: 1.3.9

**Выполнен анализ кинетических характеристик электронов и ионов при их дрейфе в инертных газах в условиях экспериментов с пылевой плазмой в разряде постоянного тока в трубке диаметром 2 см, давлении газа 0,33 Торр и токе 1,5 мА. Методом динамики многих частиц с розыгрышем столкновений по процедуре Монте Карло вычислены скорость дрейфа электронов, энергетический коэффициент Таунсенда, средняя энергия, коэффициент ионизации и доля энерговклада на возбуждение и ионизацию газа для случаев однородного и стратифицированного разрядов. Получены оценки потенциала стенки и плотности плазмы, проведено сравнение с экспериментом. Рассчитаны характеристики ионной компоненты, сделаны оценки влияния распыления никелевого катода на временные характеристики разряда.**

**Ключевые слова:** тлеющий разряд; диффузия; подвижность; функция распределения; метод Монте-Карло; ионизация; инертные газы; распыление катода; нагрев газа.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-4-51-58

### Введение

Целью настоящей работы является анализ экспериментов с пылевой плазмой, результаты которых представлены в работе [1]. В этой работе в стоячих стратах в тлеющем разряде пылевые ловушки формировались в разных инертных газах при одинаковых параметрах разряда: газоразрядная трубка с радиусом  $R = 1$  см, давление  $p = 0,33$  Торр и ток  $i = 1,5$  мА. Для всех инертных газов получены данные о размере удерживаемых в гравитационно-электростатической ловушке пылевых частиц. Обнаружены весьма значительные изменения среднего размера полидисперсных частиц из кварца: от 6,3 мкм в гелии до 3,0 мкм в ксеноне. Это указывает на очень большое изменение характеристик плазмы положительного столба в разряде с различными плазмообразующими газами при одинако-

вых значениях параметров подобия  $pR = 3,3 \times 10^{-4}$  Торр·см и  $i/R = 1,5 \times 10^{-3}$  А·см [2–5].

Рассмотрим основные факторы, влияющие на пылевую подсистему при одинаковом токе и давлении различных газов в трубке фиксированного диаметра:

1) при изменении сорта газа меняется напряжение между анодом и катодом, значение средней напряженности электрического поля в положительном столбе и функция распределения электронов по энергии, определяющая все кинетические характеристики электронной подсистемы;

2) пылевые частицы левитируют в страте с сильно неоднородным электрическим полем и эффект нелокальности может быть очень значителен;

3) ионная компонента определяет не только силу увлечения, действующую на пылинки, но также и необходимую для поддер-

жания самостоятельного разряда частоту ионизации из-за рекомбинации ионов на стенках трубки;

4) распыление катода приводит к появлению в благородном газе паров металла, которые более легко ионизируются и могут за довольно короткий промежуток времени значительно менять ионный состав плазмы.

В эксперименте [1] в положительном столбе содержались пылевые частицы, но условия были таковы, что они не оказывали сколько-нибудь существенного влияния на характеристики газоразрядной плазмы. Эта ситуация типична для исследований пылевых систем в разрядах постоянного тока при пониженном давлении газа. В постановке задачи о дрейфе ионов, электронов не учитывается влияние пылевых частиц на характеристики газоразрядной плазмы.

### Характеристики дрейфа ионов

В случае сильных полей или низких температур газа [6] отклонение функции распределения ионов от сдвинутой максвелловской может быть весьма значительным, и средняя энергия хаотического движения ионов вдоль электрического поля и поперек него могут сильно отличаться. Для учета влияния разогрева ионов при дрейфе в электрическом поле удобно ввести понятие эффективной ионной температуры:  $T_{eff} = \frac{2}{3} \langle \varepsilon \rangle =$

$= \frac{1}{3} m \langle v^2 \rangle$ , которая складывается из теплового движения ионов и энергии направленного движения, и вместе со скоростью дрейфа является усредненной (гидродинамической) характеристикой потока ионов. Именно эффективная температура ионов, как мера их средней энергии, определяет, например, ионный радиус Дебая.

Несмотря на то, что функции распределения ионов как вдоль, так и поперек направления поля сильно отличаются от максвелловского [6], имеет смысл введение двух различных температур ионов – продольной  $T_L$  вдоль поля и поперечной  $T_T$  поперек поля, как меры среднеквадратичного отклонения от среднего значения (дисперсии). При этом средняя энергия иона складывается из направленного и хаотического движения ионов с различной дисперсией по отношению к направлению дрейфа:

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{1}{2} m W^2 + \frac{1}{2} T_L + T_T,$$

где  $W$  – скорость дрейфа.

В табл. 1 для условий экспериментов работы [1] представлены результаты расчетов методом Монте-Карло [6] характеристик дрейфа однократно заряженных ионов благородных газов в однородном поле: сорт газа, значение поля  $E$ , скорость дрейфа  $W$ , энергия направленного движения, эффективная, продольная и поперечная температуры, коэффициенты продольной и поперечной диффузии.

Таблица 1

Характеристики дрейфа ионов благородных газов

Gas	$E$ , V/cm	$W$ , km/s	$\frac{1}{2} m W^2$ , K	$T_{eff}$ , K	$T_L$ , K	$T_T$ , K	$D_L$ , cm <sup>2</sup> /s	$D_T$ , cm <sup>2</sup> /s
He	8,5	1,64	646	1072	2385	416	1105	635
Ne	6	0,49	293	662	1248	368	328	249
Ar	4,5	0,16	64	377	499	316	96	92
Kr	7	0,14	105	429	626	330	59	58
Xe	5	0,07	38	344	419	307	38	34

### Характеристики дрейфа электронов

Электронная подсистема во многом определяет характеристики пылевой плазмы и, в конечном счете, размер удерживаемых в ловушке пылинок. При одинаковом токе разряда и давлении газа помимо потенциала ионизации и массы атомов меняется также напряжение на трубке и распределение электрического поля. По напряжению на положительном столбе (с учетом катодного и анодного падения напряжения) и его длине в работе [1] определены средние значения поля. Так как в экспериментах положительный столб был стратифицирован, то для каждого из газов проведен расчет дрейфа в постоянном однородном поле и в сильно неоднородном периодическом поле  $E(x) = \langle E \rangle [1 + \delta \sin(2\pi x / L)]$  с амплитудой порядка среднего значения поля  $\langle E \rangle$ . Период поля  $L$  определялся по правилу Новака [2, 7–9]:  $e \langle E \rangle = IL$ . Влияние неоднородности поля на характеристики дрейфа исследовалось в работах [10, 11].

Результаты расчетов характеристик дрейфа электронов приведены в табл. 2. Для каждого сорта газа первые две строки – дрейф в однородном ( $\delta = 0$ ) и периодическом ( $\delta = 1$ ) поле выделенного электрона (модель Bulk); следующие две строки – дрейф в однородном и периодическом поле с рекомбинацией на стенке самого энергичного электрона при акте ионизации (модель стенки SST) [12, 13]. Приведены скорость дрейфа, энергетический коэффициент Таунсенда, эффективная температура, определяемая через среднее значение энергии, потенциал стенки, доля радиационных и ионизационных потерь в энергобалансе, приведенный коэффициент ионизации.

На рис. 1–4 приведены зависимости электрического поля в страте, распределения по длине страты средней энергии, скорости дрейфа и доли энерговклада, затрачиваемой на ионизацию.

Таблица 2

Характеристики дрейфа электронов

Gas		$\delta$	$W$ , km/s	$eD_{\perp} / \mu$ , eV	$T_{eff}$ , eV	$\Phi_{wall}$ , V	$\alpha_{rad}$ , %	$\alpha_{ion}$ , %	$\alpha/N$ , Å <sup>2</sup>
He	Bulk	0	187	7,4	7,73	$\infty$	55,4	30,9	0,098
		1	149	8,05	6,53	$\infty$	54,9	31,4	0,100
	SST	0	170	7,28	7,26	40,0	47,4	20,0	0,064
		1	123	8,63	5,82	39,7	49,9	21,6	0,068
Ne	Bulk	0	151	8,7	7,60	$\infty$	56,8	33,4	0,085
		1	142	9,08	6,95	$\infty$	54,1	35,5	0,091
	SST	0	145	9,81	7,29	31,8	50,3	21,6	0,055
		1	137	9,20	6,46	32,0	46,7	22,2	0,057
Ar	Bulk	0	41,3	6,45	3,96	$\infty$	92,9	5,1	0,013
		1	39,1	6,91	4,04	$\infty$	86,0	12,1	0,032
	SST	0	41,7	6,52	3,96	16,6	89,9	4,0	0,011
		1	39,4	7,69	4,02	17,4	79,9	9,0	0,024
Kr	Bulk	0	47,6	5,88	3,54	$\infty$	83,8	14,1	0,065
		1	45,1	6,16	3,54	$\infty$	75,5	21,3	0,098
	SST	0	48,2	5,25	3,52	16,0	78,6	9,6	0,044
		1	45,3	6,90	3,48	16,6	65,9	15,2	0,069
Xe	Bulk	0	26,9	4,70	2,79	$\infty$	93,3	5,5	0,021
		1	24,8	5,32	2,85	$\infty$	85,0	13,2	0,050
	SST	0	26,4	5,09	2,78	12,5	89,6	4,2	0,016
		1	24,8	4,85	2,82	12,9	79,6	9,7	0,037

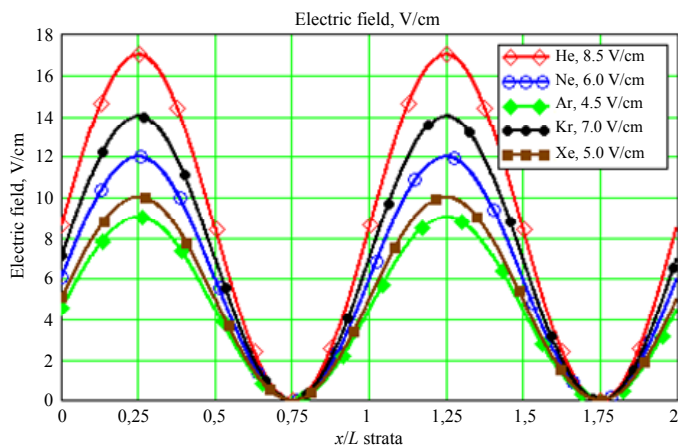


Рис. 1. Зависимость электрического поля по длине страты

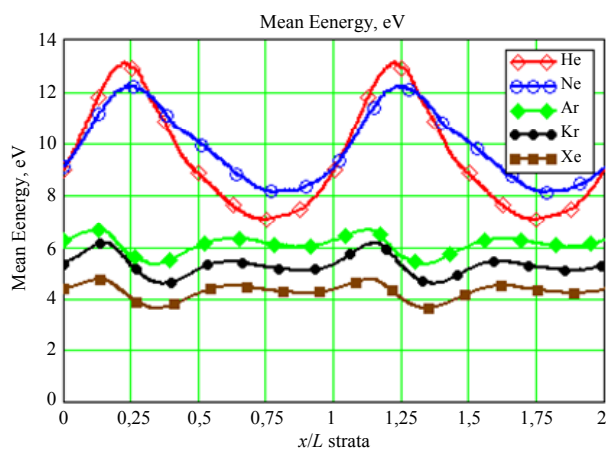


Рис. 2. Распределение средней энергии по длине страты

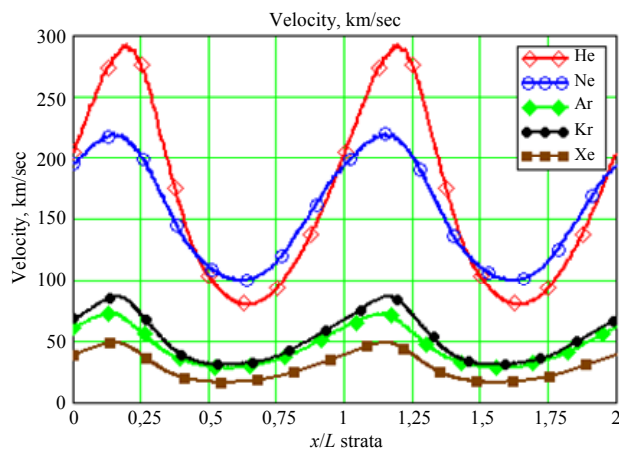


Рис. 3. Зависимость скорости дрейфа электронов

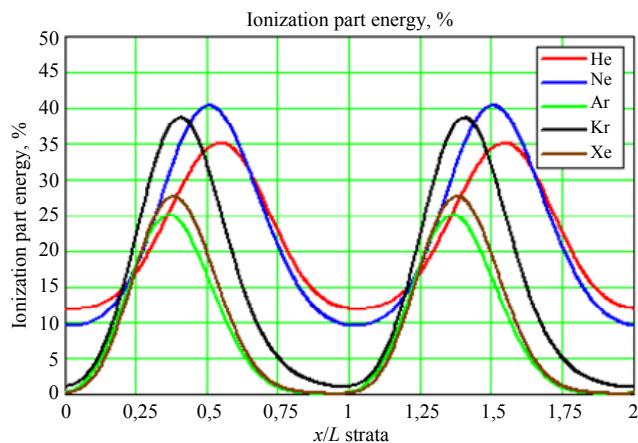


Рис. 4. Доля энергии, затрачиваемой на ионизацию

Анализ табличных данных свойств электронной компоненты газоразрядной плазмы в благородных газах при одинаковом давлении и токе показывает, что наиболее сильное влияние неоднородности поля проявляется в характеристиках разряда, обусловленных неупругими процессами: возбуждением атомов и их ионизацией. Для легких инертных газов (гелий и неон) влияние стратификации на ионизацию и светимость очень незначительно – порядка 1%, но скорость дрейфа и средняя энергия электронов в стратифицированном разряде значительно ниже – на десятки %. Для тяжелых инертных газов ситуация радикально меняется. Основная доля энергии затрачивается на возбуждение атомов и в режиме объемного высвечивания (характерного для рассматриваемого типа разряда) уходит из плазмы в виде излучения. Скорость дрейфа в однородном поле для всех газов выше, в наибольшей мере это проявляется для легких газов без эффекта Рамзауэра – гелия и неона. Неоднородность поля практически не влияет на величину потенциала стенки.

### О нагреве газа

Джоулево тепло частично затрачивается на нагрев газа. Полагая, что вся энергия затрачивается на нагрев газа и отводится теплопроводностью через кварцевые стенки газоразрядной трубки, получим оценку сверху для величины нагрева внутренней поверхности трубки:  $\Delta T_{wall} = i < E > \Delta R_{tube} / 2\pi R \lambda_{glass}$  (толщи-

на стенки  $\Delta R_{tube} = 1$  мм, теплопроводность кварца  $\lambda_{glass} = 1,32$  Вт/м град). Соответствующие значения величины  $\Delta T_{wall}$  приведены в табл. 3, и они составляют малую долю градуса К.

Для оценки нагрева газа воспользуемся известным решением уравнения теплопроводности для зависимости температуры газа от радиуса:  $\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \lambda \frac{dT}{dr} \right) = Q(r)$ , где  $Q(r)$  – мощность, выделяемая в единице объема в виде тепла [2]. В приближении параболической зависимости  $Q(r) = Q(0)(1 - r^2 / R^2)$  и  $\lambda(r) = \lambda_0 = const$  решение имеет вид:

$$T(r) = T(R) + \frac{3}{16} \frac{Q(0)}{\lambda} R^2 \left( 1 - \frac{4}{3} \frac{r^2}{R^2} + \frac{1}{3} \frac{r^4}{R^4} \right).$$

Средняя по сечению трубки передача энергии от электронов атомам равна  $\langle Q(r) \rangle = 2 \int_0^R Q(0)(1 - r^2 / R^2) 2\pi r dr / \pi R^2 = \frac{1}{2} Q(0)$ .

Используя приведенные в табл. 2 данные о доли энергопотерь на возбуждение и ионизацию, получаем оценку для нагрева атомов газа в центре трубки:

$$\Delta T(0) = T(0) - T(R) = 3ieE(1 - \alpha_{rad} - \alpha_{ion}) / 8\pi\lambda.$$

Приведенные в табл. 3 значения  $\Delta T(0)$  для случая периодического поля в модели со стенкой показывают, что нагрев газа в трубке составляет несколько градусов. Плотность электронов  $N_e$  определялась с помощью соотношения  $i = eN_e W \pi R^2$ .

Таблица 3

Характеристики стратифицированной газоразрядной плазмы в трубке

Gas	He	Ne	Ar	Kr	Xe
Поле, V/cm	8,5	6	4,5	7	5
Приведенное поле, Td	78,1	55,2	41,4	64,4	46,0
Strata period, cm	2,9	3,6	3,5	2,0	2,4
Wall potential, V	40,0	32,0	17,0	16,7	13,0
Electron temperature, eV	5,82	6,46	4,02	3,48	2,82
Ion temperature, K	1072	662	377	429	344
Upper limit gas heating, K	0,3	0,7	0,5	2,5	1,7
Upper limit wall heating, $\Delta T_{wall}$ , K	0,015	0,010	0,008	0,012	0,009
Free length Atom, m.f.p. mkm	940	800	560	490	420
Debye length, Electron, mkm	813	904	676	381	254
Debye length, Ion, mkm	102	85	61	39	26
Plasma density, 1/cm**3	2,4E8	2,2E8	7,6E8	6,6E8	1,2E9

Приведенные в таблице 3 общие характеристики газоразрядной плазмы соответствуют случаю дрейфа электронов в периодическом поле для модели со стенкой, которые наиболее адекватны условиям протекания тока в условиях экспериментов [1].

### О нагреве и распылении катода

Никелевый катод в работе [1] подвергается ионной бомбардировке ионами инертного газа, которые вызывают его нагрев и распыление. Простая оценка для никелевого катода массой 10 г при токе 1,5 мА дает повышение температуры на 1 К за время порядка 1 с. Но полый катод эффективно охлаждается из-за малого расстояния (порядка 1 мм) до стенок трубки, поэтому стенки трубки вблизи катода могут заметно нагреваться. Более детальное рассмотрение этого важного вопроса выходит за рамки данной работы.

После зажигания разряда концентрация и, соответственно, влияние распыленных атомов металла на характеристики плазмы пропорционально времени горения разряда, т. е. число распыленных атомов металла  $\Delta N_{Me}$  в трубке пропорционально коэффициенту распыления, потоку бомбардирующих ионов и времени бомбардировки:  $\Delta N_{Me} = \gamma(i/e)\Delta t$ . Для никелевого катода с коэффициентом распыления  $\gamma = 0,7$ , объемом трубки порядка 1 литр и токе 1,5 мА концентрация примеси 1 % будет достигнута за время порядка 20 с. Появление в рабочем газе атомов никеля с долей 1 % приводит к тому, что ионы металла начинают составлять значительную часть ионной компоненты (см. [14, 15], где рассмотрено влияние примеси атомов железа в гелии и ртути в аргоне на разряд). Смысл приведенной грубой оценки времени наработки одного процента примеси в эксперименте [1] заключается в том, что существенная доля примеси может быть достигнута за время меньше минуты. По мере наработки примеси включится обратный механизм ее удаления (например, за счет легирования катода ионами примеси) и установится некое равновесие между концентрациями примеси и рабочего газа). Поскольку концентрация примеси в работе [1] не оценивалась, то и все результаты расчетов дрейфа электронов в табл. 2 приведены для случая чистых газов.

В запаянной трубке по мере увеличения доли атомов металла в инертном газе они начинают заметно влиять не только на характеристики плазмы положительного столба, но и на давление газа. Сделанные нами оценки показывают, что при характерных для этих экспериментов с пылевой плазмой параметрах энерговыклада порядка 1 Вт разогрев газа внутри трубки незначителен (см. табл. 3), поэтому увеличение давления газа (измеряемый непосредственно в эксперименте показатель) обусловлен примесной компонентой и разогревом газа в прикатодной области.

### Заключение

Полученные в настоящей работе характеристики газоразрядной плазмы могут быть использованы для более точного определения характеристик пылевой компоненты в экспериментах с пылевой плазмой [1]. Кроме того, с помощью параметров подобия  $pR$  и  $i/R$  эти данные могут быть полезны для оценок характеристик лавины, искрового разряда, для определения характеристик перехода от лавины к искровому разряду и определения характеристик плазмы в канале стримера [3, 4, 16, 17].

*Авторы выражают благодарность Колобому В. И. за полезные обсуждения применения параметров подобия при анализе различных типов газового разряда.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дзиева Е. С., Карасев В. Ю., Новиков Л. А., Павлов С. И., Голубев М. С., Машек И. Ч. / Журнал технической физики. 2023. Т. 93. № 10. С. 1429–1433.
2. Грановский В. Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток. – М.: Наука, 1971.
3. Базелян Э. М., Райзер Ю. П. Искровой разряд. – М.: Изд-во Моск. физ.-техн. ин-та, 1997.
4. Лозанский Э. Д., Фирсов О. Б. Теория искры. – М.: Атомиздат, 1975.
5. Polyakov D. N., Shumova V. V., Vasilyak L. M. / Plasma Physics Reports. 2017. Vol. 43. № 3. P. 397–404.
6. Майоров С. А. / Физика плазмы. 2009. Т. 35. № 9. С. 869–880.
7. Novac M. / Czech. J. Phys. B. 1960. № 10. P. 954–959.
8. Kolobov V. I., Arslanbekov R. R. / Phys. Rev. E. 2025. Vol. 111. P. 1015203–17.
9. Голубовский Ю. Б., Кудрявцев А. А., Некучаев В. О., Прохорова И. А., Цендин Л. Д. Кинетика электронов в неравновесной газоразрядной плазме. – СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского университета, 2004.

10. Майоров С. А. / КСФ. ФИАН. 2013. № 9. С. 22–32.
11. Kodanova S. K., Bastykova N. Kh., Ramazanov T. S., Maiorov S. A. / Ukr. J. Phys. 2014. Vol. 59. № 4. P. 371–374.
12. Майоров С. А., Голятина Р. И. / ТВТ. 2025. № 4 (в печати).
13. Maiorov S. A., Golyatina R. I., Kodanova S. K., Ramazanov T. S. / Plasma Physics Reports. 2024. Vol. 50. № 8. P. 1029–1041.
14. Golyatina R. I., Maiorov S. A., Ragimkhanov G. B., Khalikova Z. R. / Physical Sciences and Technology. 2020. Vol. 7. № 1. P. 15–18.
15. Maiorov S. A., Golyatina R. I. / Plasma Physics Reports. 2018. Vol. 44. № 4. P. 5–10.
16. Курбанисмаилов В. С., Голятина Р. И., Майоров С. А., Рагимханов Г. Б., Халикова З. Р., Рамазанов И. Г. / Прикладная физика. 2020. № 4. С. 24–31.
17. Kolobov V. I., Golubovskii Y. B. / Plasma Sources Sci. Technol. 2022. Vol. 31. P. 094003.

PACS: 51.50.+v

## On the characteristics of the positive column of a glow discharge at low pressure of an inert gas

S. A. Maiorov<sup>1</sup>, R. I. Golyatina<sup>2</sup>, E. S. Dzlieva<sup>3</sup> and V. Yu. Karasev<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 125412 Russia

\* E-mail: mayorov\_sa@mail.ru

<sup>2</sup> Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia

E-mail: rusudan@intemodino.com

<sup>3</sup> Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, 199034 Russia

E-mail: plasmadust@yandex.ru

Received 25.06.2025; revised 5.08.2025; accepted 11.08.2025

***The analysis of the kinetic characteristics of electrons and ions during their drift in inert gases under experimental conditions with dusty plasma in a direct current discharge in a tube with a diameter of 2 cm, a gas pressure of 0.33 Torr and a current of 1.5 mA was performed. The electron drift velocity, Townsend energy coefficient, average energy, ionization coefficient, and the fraction of energy input to gas excitation and ionization for cases of homogeneous and stratified discharges were calculated using the many-particle dynamics method with Monte Carlo collision simulation. Estimates of the wall potential and plasma density were obtained and compared with the experiment. The characteristics of the ion component are calculated and the influence of nickel cathode sputtering on the time characteristics of the discharge is assessed.***

**Keywords:** glow discharge; diffusion; mobility; distribution function; Monte Carlo method; ionization; inert gases; cathode sputtering; gas heating.

### REFERENCES

- Dzlieva E. S., Karasev V. Yu., Novikov L. A., Pavlov S. I., Golubev M. S. and Mashek I. Ch., Technical Physics **68** (10), 1328–1332 (2023).
- Granovsky V. L., Electric current in gas. Steady-state current. Moscow, Nauka, 1971 [in Russian].
- Bazelyan E. M. and Raiser Yu. P., Spark discharge. Moscow, Publishing House of Phys.-Techn. Institute, 1997 [in Russian].
- Lozansky E. D. and Firsov O. B., Theory of the spark. Moscow, Atomizdat, 1975 [in Russian].
- Polyakov D. N., Shumova V. V. and Vasilyak L. M., Plasma Physics Reports **43** (3), 397–404 (2017).
- Mayorov S. A., Plasma Physics Reports **35** (9), 802–812 (2009).
- Novac M., Czech. J. Phys. B, № 10, 954–959 (1960).
- Kolobov V. I. and Arslanbekov R. R., Phys. Rev. E **111**, 1015203–17 (2025).
- Golubovsky Yu. B., Kudryavtsev A. A., Nekuchaev V. O., Prokhorova I. A. and Tsendin L. D. Kinetics of electrons in nonequilibrium gas-discharge plasma. SPb., Publishing house of St. Petersburg University, 2004.

10. Mayorov S. A., Bulletin of the Lebedev Physics Institute **40** (9), 258–264 (2013).
11. Kodanova S. K., Bastykova N. Kh., Ramazanov T. S. and Mayorov S. A., Ukr. J. Phys. **59** (4), 371–374 (2014).
12. Maiorov S. A. and Golyatina R. I., High Temperature, № 4 (2025) (in press).
13. Maiorov S. A., Golyatina R. I., Kodanova S. K. and Ramazanov T. S., Plasma Physics Reports **50** (8), 1029–1041 (2024).
14. Golyatina R. I. and Mayorov S. A., Applied Physics, № 5, 33–27 (2011) [in Russian].
15. Golyatina R. I., Maiorov S. A., Ragimkhanov G. B. and Khalikova Z. R., Physical Sciences and Technology **7** (1), 15–18 (2020).
16. Kurbanismailov V. S., Golyatina R. I., Maiorov S. A., Ragimkhanov G. B., Khalikova Z. R. and Ramazanov I. G., Applied Physics, № 4, 24–31 (2020) [in Russian].
17. Kolobov V. I. and Golubovskii Y. B., Plasma Sources Sci. Technol. **31**, 094003 (2022).

#### Об авторах

**Майоров Сергей Алексеевич**, д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН) (Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская 13, стр. 2). E-mail: mayorov\_sa@mail.ru SPIN-код РИНЦ 9331-1751, Author ID 24761

**Голятина Русудан Игоревна**, научный сотрудник, Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН (Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38). E-mail: rusudan@intemodino.com Author ID 28890

**Дзलिएва Елена Савовна**, к.ф.-м.н., с.н.с. Санкт-Петербургский государственный университет (Россия, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб. 7/9). E-mail: plasmadust@yandex.ru

**Карасев Виктор Юрьевич**, д.ф.-м.н., профессор Санкт-Петербургский государственный университет (Россия, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб. 7/9). E-mail: plasmadust@yandex.ru SPIN-код РИНЦ 4423-2530, Author ID 31685