

УДК 537.521

DOI: 10.21779/2542-0321-2023-38-2-14-20

**М.Б. Курбангаджиева<sup>1,2</sup>, Н.А. Ашурбеков<sup>1</sup>, К.О. Иминов<sup>1</sup>, Г.Ш. Шахсинов<sup>1</sup>, К.М. Рабаданов<sup>1</sup>**

**Кинетическая модель формирования поперечной пространственной структуры наносекундного разряда в длинных экранированных трубках с полыми электродами**

<sup>1</sup> Дагестанский государственный университет; Россия, 367000, г. Махачкала, ул. М. Гаджиева, 43а; nashurb@mail.ru

<sup>2</sup> Институт физики им. Х.И. Амирханова Дагестанского федерального исследовательского центра Российской академии наук; Россия, 367030, Махачкала, ул. Ярагского, 94.

**Аннотация.** В статье приведены результаты исследования динамики формирования поперечной пространственной структуры наносекундного разряда в неоне в длинных экранированных трубках с полыми электродами при давлениях газа в диапазоне 1–40 Торр. Выполнено численное моделирование структуры и динамики развития ионизационных фронтов для условий слабой анизотропии функции распределения электронов по энергиям.

**Ключевые слова:** наносекундный разряд, неон, структура фронтов ионизации, численное моделирование.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20–32–90150 и проекта FZNZ–2020–0002.

Известно, что наносекундный электрический пробой газов в узких длинных разрядных трубках обладает рядом специфических свойств, обусловленных особенностями взаимодействия электронных потоков с диэлектрическими стенками разрядной трубки в процессе формирования и распространения волн ионизации [1–4]. При развитии наносекундного разряда в инертных газах из-за специфики их энергетических уровней в начальных стадиях разряда происходит интенсивная наработка возбужденных атомов на низлежащих энергетических уровнях, что при определенных условиях сильно влияет и на оптические спектры пропускания такой плазмы (см., например, [5]). В таких условиях для построения кинетической модели развития исследуемого типа наносекундного разряда требуется проведение анализа процессов наработки плотности электронов, возбужденных атомов, ионов одновременно с исследованием пространственно-временной динамики изменения электрического поля внутри узких диэлектрических разрядных трубок, средней энергии электронов, коэффициентов переноса и констант элементарных процессов.

В статье приведены результаты таких исследований для наносекундного пробоя неона в диапазоне давлений газа 1–40 Торр и амплитудах импульсов напряжения до 40 кВ. В общем случае моделирование развития высоковольтного наносекундного разряда с учетом динамики релаксации функции распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) представляет собой сложную задачу. Для ее решения были объединены про-

граммы Comsol Multiphysics [6] и LisbOn KInetics Больцмана (LoKI-B) [7; 8], которые могут быть использованы для решения уравнения Больцмана с целью расчета слабо анизотропной ФРЭЭ. Конкретный алгоритм таких расчетов подробно описан в [9; 10]. Численное моделирование задачи было проведено с использованием той геометрии газоразрядной системы, в которой ранее нами велись все экспериментальные исследования, т. е. была использована коаксиальная газоразрядная система, снабженная двумя внутренними полыми цилиндрическими электродами [4; 5].

Геометрическая область моделирования (рис. 1) представляет собой двумерную осесимметричную систему, соответствующую модели экранированной разрядной трубки, использованной в экспериментальных исследованиях. Длина разрядной трубки составляла величину 50 см с внутренним диаметром 1 см, диаметр металлического экрана – 3 см.

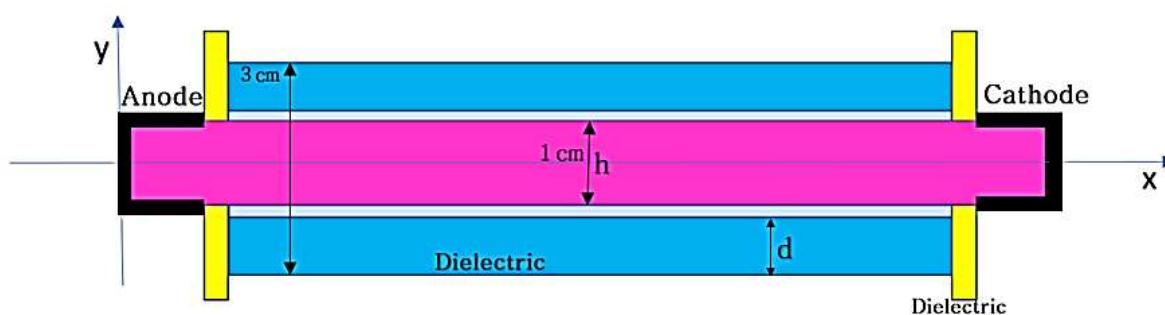


Рис. 1. Геометрия разрядной трубки в программе Comsol Multyphysics

Были использованы начальные условия:

$$n_e(t = 0, x, y) = n_i(t = 0, x, y) = n_0,$$

$$n_0 = 10^8 \text{ см}^{-3},$$

при которых плотность фоновой плазмы  $n_0$  выбиралась путем оценок остаточных зарядов на диэлектрических стенках разрядной трубки по релаксации диэлектрических свойств материала после взаимодействия с разрядом. Такие исследования показали, что релаксация диэлектрических свойств материала стенки разрядной трубки до исходных значений длилась около 40 минут, а плотность поверхностного заряда на внутренней стенке разрядной трубки имела величину порядка  $10^8 \text{ см}^{-3}$  при частотно-периодическом режиме создания плазмы с частотой следования импульсов 100 Гц.

Граничные условия также подбирались с учетом условий реального эксперимента, при этом для привязки численной модели к реальным экспериментам форма сигнала электрического потенциала, подаваемого на электроды, выбиралась из эксперимента.

Далее строилась конечно-элементарная треугольная сетка, которая дискретизирует геометрическую область моделирования на подобласти, необходимые для решения численной задачи методом конечных элементов. В ходе решения в каждой внутренней узловой точке сетки рассчитывались значения потенциала электрического поля и плотности заряженных частиц. При этом учитывались упругие и неупругие электрон-атомные и ион-атомные столкновения, которые приводили к возбуждению и ионизации атомов неона. Учитывалась гибель заряженных частиц за счет рекомбинации в объеме и на поверхности электродов и диэлектрических стенок.

В расчетах были использованы элементарные процессы с участием электронов, ионов, возбужденных атомов неона, приведенные в табл. 1.

В процессе численного моделирования были получены:

- картины пространственно-временной динамики наработки в разрядной области плотности электронов;
- картины пространственно-временной динамики наработки в разрядной области плотности ионов;
- картины пространственно-временной динамики наработки в разрядной области плотности нескомпенсированного заряда, т. е. динамика развития зарядовых структур в процессе развития разряда;
- картины пространственно-временной динамики наработки в разрядной области плотности возбужденных атомов;
- картины пространственно-временной динамики релаксации средней энергии плазменных электронов;
- картины пространственно-временной динамики распределения электрического потенциала и напряженности самосогласованного электрического поля, рассчитываемого с учетом внешнего потенциала на электродах и электрического поля, создаваемого нескомпенсированными зарядовыми структурами в разряде.

**Таблица 1. Плазмохимические реакции, которые учитывались при моделировании**

№	Реакции	$\Delta\epsilon$ (eV)	Константы реакций	Тип реакции
1	$e + Ne \rightarrow e + Ne$		ФРЭЭ	Упругое столкновение
2	$e + Ne \leftrightarrow e + Ne^*(^3P_2)$	16.62	ФРЭЭ	Возбуждение
3	$e + Ne^*(^3P_2) \rightarrow e + Ne$	-16.62	ФРЭЭ	Сверхупругое столкновение
4	$e + Ne \leftrightarrow e + Ne^*(^3P_1)$	16.67	ФРЭЭ	Возбуждение
5	$e + Ne^*(^3P_1) \rightarrow e + Ne$	-16.67	ФРЭЭ	Сверхупругое столкновение
6	$e + Ne \leftrightarrow e + Ne^*(^3P_0)$	16.72	ФРЭЭ	Возбуждение
7	$e + Ne^*(^3P_0) \rightarrow e + Ne$	-16.72	ФРЭЭ	Сверхупругое столкновение
8	$e + Ne \leftrightarrow e + Ne^*(^1P_1)$	16.85	ФРЭЭ	Возбуждение
9	$e + Ne^*(^1P_1) \leftrightarrow e + Ne$	-16.85	ФРЭЭ	Сверхупругое столкновение
10	$e + Ne \rightarrow 2e + Ne^+$	21.56	ФРЭЭ	Прямая ионизация

11	$Ne^* + Ne \rightarrow e + Ne + Ne^+$	4.945	ФРЭЭ	Ступенчатая ионизация
12	$Ne^* + Ne \rightarrow Ne + Ne$	–	$18.26 \cdot 10^{-18}$ (м <sup>3</sup> /с)	Тушение возбужденных атомов
13	$Ne^* + Ne^* \rightarrow Ne^+ + Ne + e$	–	$3.2 \cdot 10^{-16}$ (м <sup>3</sup> /с)	Хемоионизация

Отдельно были получены данные о распространении ионизационных фронтов, пространственной структуре разряда с наносекундным временным разрешением, проанализированы основные закономерности распределения характеристик разряда в поперечном сечении разрядной трубки.

В качестве иллюстрации на рисунке 2 представлена характерная осциллограмма импульса напряжения, подаваемого на высоковольтный электрод, которая была использована при численном моделировании.

На рис. 3 в качестве примера приведены рассчитанные картины динамики формирования и распространения ионизационного фронта в разрядном промежутке при амплитуде импульсов напряжения на электродах  $U_0 = 28$  кВ и давлении газа 1 Торр (а) и структура разряда в поперечном сечении разрядной трубки при давлении газа 1 Торр (б) и 20 Торр (в).

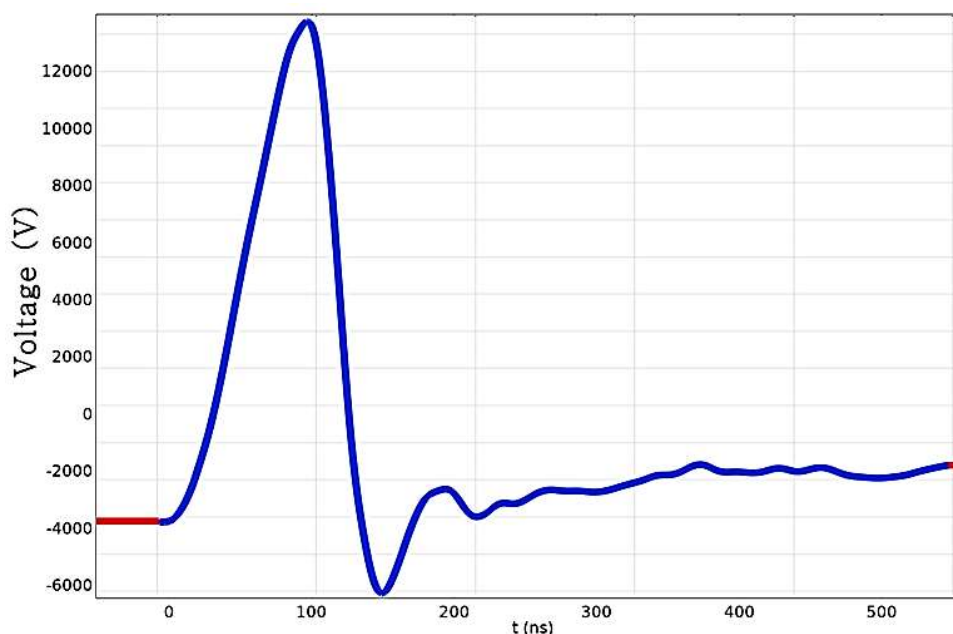


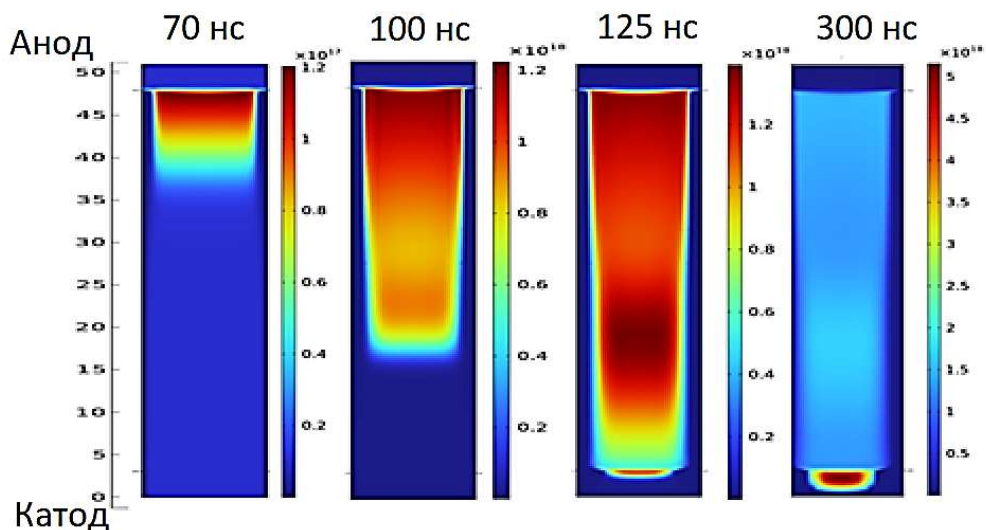
Рис. 2. Форма электрического потенциала, подаваемого на высоковольтный электрод разрядной трубки

Анализ результатов моделирования показывает, что:

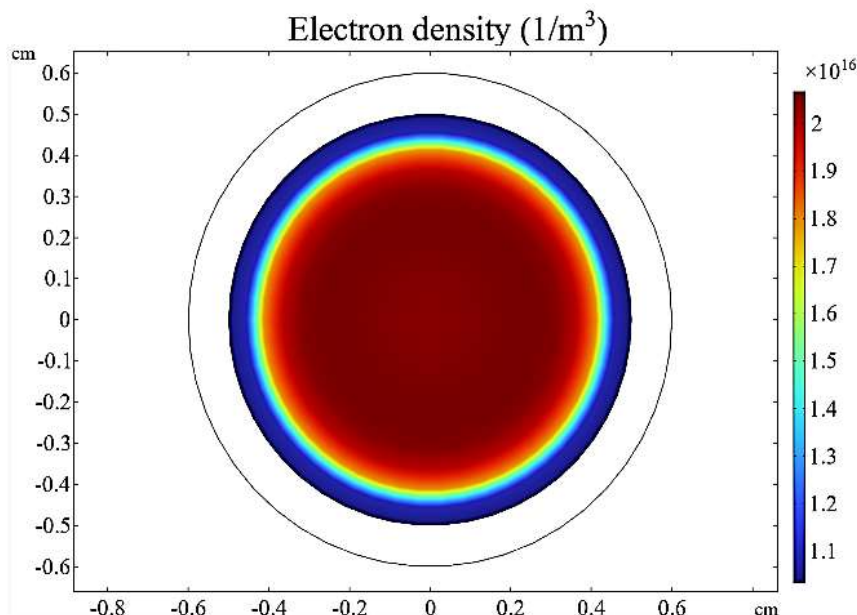
– развитие ионизационных процессов происходит в виде формирования фронта волны ионизации вблизи высоковольтного электрода и далее распространения вдоль разрядной трубки со скоростью в диапазоне  $10^8$ – $10^9$  см/с;

– с увеличением давления газа скорость распространения фронта ионизационной волны падает;

– максимальная плотность заряженных частиц, нарабатываемая в разрядном промежутке одной прямой волной ионизации при амплитудах импульсов напряжения 28 кВ, составляет величину примерно  $4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ;



а)



б)

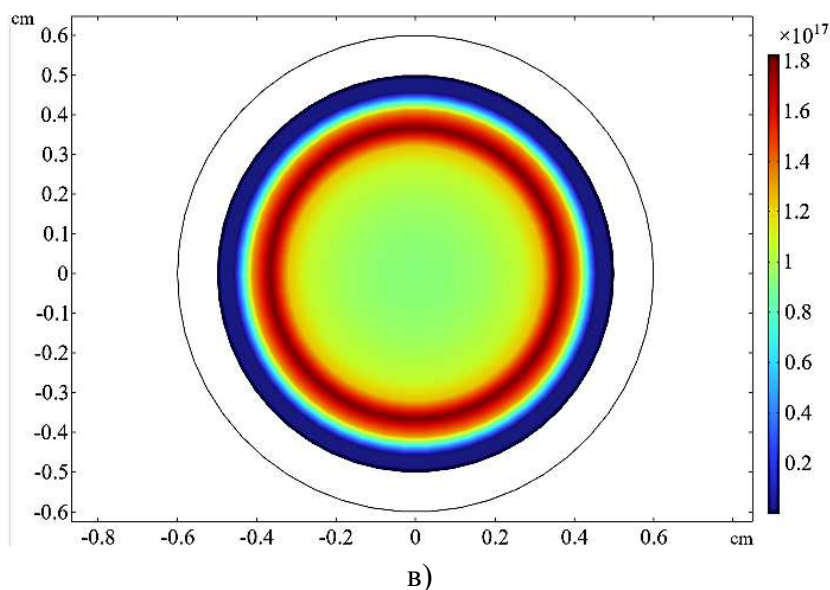


Рис. 3. Динамика формирования и распространения ионизационного фронта в разрядном промежутке при амплитуде импульсов напряжения на электродах  $U_0 = 28$  кВ и давлении газа 1 Торр (а) и структуры разряда в поперечном сечении разрядной трубки при давлении газа 1 Торр (б) и 20 Торр (в)

– с изменением давления газа существенно меняется геометрическая протяженность фронта волны ионизации;

– при давлении газа выше 15 Торр ионизация распространяется в виде цилиндрической волны, прижатой к внутренней поверхности разрядной трубки.

Сопоставление результатов расчета с результатами наших экспериментальных исследований показывает, что они совпадают не только качественно, но и количественно, например, для величин скорости распространения фронтов волн ионизации и поперечной структуры фронта волны ионизации [4; 11].

Полученные картины также хорошо согласуются с экспериментальными результатами: свечение плазмы вдоль стенок трубки усиливается по сравнению с центром разрядной трубки в несколько раз [11].

### Литература

1. Василяк Л.М., Костюченко С.В., Кудрявцев Н.Н., Филюгин И.В. Высоко-скоростные волны ионизации при электрическом пробое // УФН. 1994. Т. 164, № 3. – С. 263.
2. Starikovskaia S.M. Plasma-assisted ignition and combustion: nanosecond discharges and development of kinetic mechanisms // J. Phys. D: Appl. Phys. 2014. Vol. 47. – P. 353001.
3. Akishev Y., Alekseeva T., Karalnik V., Petryakov A. On the slow ionization waves forming the breakdown in a long capillary tube with helium at low pressure // Journal of Physics D: Applied Physics. 2022. Vol. 55, no. 14. – P. 145202.
4. Ашурбеков Н.А., Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А., Омарова Н.О. Кинетика возбужденных атомов и оптическое излучение при волновом механизме пробоя инертных газов // ТВТ. 2000. Т. 38, № 5. – С. 823–839.
5. Ашурбеков Н.А., Курбангаджиева М.Б., Иминов К.О., Шахсинов Г.Ш., Рабаданов К.М. Асимметрия оптических спектров пропускания импульсного разряда с

протяженным полым катодом при резонансном взаимодействии коротких полихроматических лазерных импульсов с возбужденными атомами неона // Журнал прикладной спектроскопии. 2022. Т. 89, № 6. – С. 815–819.

6. "COMSOL Multiphysics Reference Manual, version 5.5", COMSOL, Inc. – <https://www.comsol.com> (last access: August 22, 2022).

7. Tejero-del-Caz A., Guerra V., Pinhão N., Pintassilgo C.D. and Alves L.L. The LisbOn KInetics Boltzmann solver // Plasma Sources Sci. Technol. 2021. Vol. 30. – P. 065008

8. LoKI-B, <https://github.com/IST-Lisbon/LoKI/> (last access: August 22, 2022).

9. Ashurbekov N.A., Zakaryaeva M.Z., Rabadanov K.M., Iminov K.O., Kurbandagzhieva M.B., Kudryavtsev A.A. Numerical Simulation of a Partially Anisotropic Electron Distribution Function in a Pulsed Discharge with a Hollow Cathode // Physics of Plasmas. 2022. Vol. 29, no. 12.

10. Ashurbekov N.A., Iminov K.O., Rabadanov K.M., Shakhshinov G.S., Zakaryaeva M.Z. and Kurbandagzhieva M.B. Simulation of the spatio-temporal evolution of the electron energy distribution function in a pulsed hollow-cathode discharge // Plasma Sci. Technol. 2023. Vol. 25. – P. 035405. – <https://doi.org/10.1088/2058-6272/ac9aa8>

11. Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Шахсинов Г.Ш., Рамазанов А.Р. Роль высокоэнергетичных электронов при формировании нестационарных оптических спектров излучения и пропускания плазмы за фронтом высокоскоростных волн ионизации // ТВТ. 2015. Т. 53, № 5. – С. 664–675. <https://doi.org/10.7868/S0040364415030011>

Поступила в редакцию 20 мая 2023 г.

UDC 537.521

DOI: 10.21779/2542-0321-2023-38-2-14-20

### **Kinetic model of the formation of the transverse spatial structure of a nanosecond discharge in long shielded tubes with hollow electrodes**

**M.B. Kurbandagzhieva<sup>1, 2</sup>, N.A. Ashurbekov<sup>1</sup>, K.O. Iminov<sup>1</sup>, G.S. Shakhshinov<sup>1</sup>,  
K.M. Rabadanov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Dagestan State University; Russia; 367000, Makhachkala, Gadzhiyev st., 43a; [nashurb@dgu.ru](mailto:nashurb@dgu.ru)

<sup>2</sup> Amirkhanov Institute of Physics of Dagestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences; Russia, 367030, Makhachkala, Yaragsky st., 94

**Abstract.** The article outlines the dynamics of forming a transverse 3-D structure of a nanosecond neon discharge in long shielding hollow electrode tubes at gas pressures in the range of 1–40 Torr. The numerical principle is used to model the structure and dynamics of ionization fronts development under the conditions of a weak anisotropy of the electron energy distribution function.

**Keywords:** nanosecond discharge, neon, structure of ionization fronts, numerical modeling.

Received 20 May 2023