

Микроканальная структура искрового разряда в промежутке острие—плоскость при различных давлениях воздуха

© А.А. Тренькин, К.И. Алмазова, А.Н. Белоногов, В.В. Боровков, Е.В. Горелов, А.С. Долотов

Российский Федеральный ядерный центр, Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
607190 Саров, Нижегородская обл., Россия
e-mail: alexey.trenkin@gmail.com

Поступило в Редакцию 17 июля 2022 г.
В окончательной редакции 9 августа 2022 г.
Принято к публикации 10 августа 2022 г.

С применением скоростной съемки и метода теневого фотографирования исследованы структура свечения и микроструктура искрового разряда в промежутке острие (катод)—плоскость длиной 1.5 мм в воздухе в диапазоне давлений от 300 до 760 Торг. Установлено наличие микроканальной структуры разряда в указанном диапазоне давлений — разряд представляет собой совокупность большого количества каналов микронного диаметра. Показано, что с понижением давления эволюция микроструктуры и свечения разряда запаздывает относительно начала пробоя, однако их морфология сохраняет подобие при различных давлениях.

Ключевые слова: искровой разряд, микроструктура, метод теневого фотографирования, скоростная съемка.

DOI: 10.21883/JTF.2022.11.53439.184-22

Введение

Исследования разрядов в воздухе ведутся на протяжении длительного времени, но остаются весьма актуальными и по сей день. Помимо чисто научного интереса, это связано с рядом других причин. Во-первых, воздух является естественной атмосферой, в которой возникают различные электрические явления природного (например, молнии) и техногенного (например, короткие замыкания) происхождения. Во-вторых, воздух при различных давлениях является рабочей средой в некоторых газоразрядных технологиях, имеющих практическое значение.

При исследованиях разных типов разрядов в воздухе атмосферного давления была обнаружена микроструктура, когда канал представляет собой совокупность большого числа микроканалов (филаментов) [1–6]. Установлено, что микроструктура возникает в начальной фазе разряда, а ее формирование, по-видимому, происходит за счет неустойчивости фронта волны ионизации [1,7–13]. Было также показано, что наличие микроструктуры может обеспечивать ряд специфических эффектов, отсутствующих в бесструктурных (однородных) каналах, таких, как генерация высокоэнергичных электронов в микроканалах, ускорение головок микроструктурированных каналов, повышенные значения температуры электронов и др. [4,14,15].

В этой связи представляет научный и практический интерес расширение условий реализации газовых разрядов с целью определения наличия в них микроструктуры. В настоящей работе представлены результаты исследования искрового разряда в диапазоне давлений

от 300 до 760 Торг. Отметим, что данный диапазон соответствует интервалу высот от поверхности земли до, примерно, 7 км, в котором реализуются молниевые разряды [16].

1. Экспериментальная аппаратура и методики

Схема экспериментального стенда представлена на рис. 1. Часть элементов схемы подробно описаны в [3,4]. Генератор импульсов напряжения обеспечивал на выходе импульс отрицательной полярности амплитудой 25 кВ и длительностью фронта по уровню 0.1–0.9 около 7 нс. Через кабельную линию импульс подавался на разрядный промежуток. Измерение на-

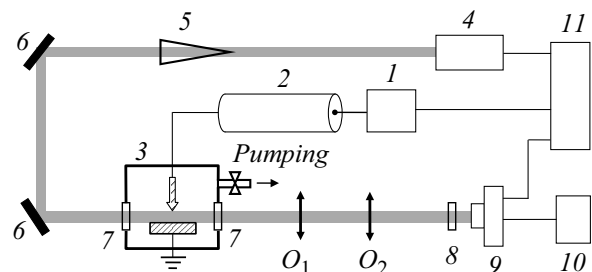


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 — генератор импульсов напряжения, 2 — кабельная линия, 3 — вакуумная камера с электродной системой, 4 — источник зондирующего сигнала (лазер), 5 — коллиматор, 6 — поворотное зеркало, 7 — окно, O_1 и O_2 — объективы, 8 — светофильтры, 9 — электронно-оптический регистратор, 10 — персональный компьютер, 11 — блок синхронизации.

пряжения и тока осуществлялось на выходе генератора импульсов напряжения соответственно емкостным делителем и резистивным шунтом. Временные разрешение делителя и шунта — не хуже 1 ns. Регистрация сигналов производилась осциллографом с полосой пропускания 500 MHz и скоростью оцифровки 2 GS/s.

Электродная система имела геометрию „острие–плоскость“. Осесимметричный острый электрод изготовлен из нержавеющей стали; его длина 50 mm, диаметр 14 mm, угол при вершине 36° , радиус кривизны 0.15 mm. В качестве плоского электрода использовался электрод, изготовленный из алюминиевого сплава, с рабочей частью, близкой по форме к шаровому сегменту диаметром 4.5 cm толщиной 1.5 cm. Межеlectродный зазор составлял 1.5 mm.

Электродная система размещалась соосно внутри металлической вакуумной камеры цилиндрической формы. Диаметр камеры 310 mm, высота 800 mm. Ввод и вывод лазерного излучения осуществлялись через окна камеры, изготовленные из стекла марки КУ-1 диаметром 80 mm и толщиной 15 mm. Система вакуумирования обеспечивала рабочее давление газа в камере от атмосферного до единиц Torr.

В составе стенда использовалась система оптической регистрации разряда. Система включала в себя источник зондирующего излучения — твердотельный лазер (длина волны 532 nm, длительность импульса на полувысоте 6 ns), коллиматор, объективы, светофильтры и цифровую электронно-оптическую камеру. Плоскопараллельный пучок лазерного излучения, проходя через область разряда перпендикулярно оси электрода–острия, регистрировался электронно-оптической камерой. В области формирования разряда поперечный размер лазерного пучка составлял примерно 1 cm и имел гауссов профиль. В связи с наличием вакуумной камеры в настоящих экспериментах в отличие от проведенных ранее [3,4] оптическая схема была изменена добавлением второго объектива. Объектив O_1 , расположенный на двойном фокусном расстоянии от разрядного промежутка, строил его изображение в масштабе 1 : 1. Затем объектив O_2 переносил это изображение с увеличением (масштаб 10 : 1) на фотокатод электронно-оптического регистратора.

На базе этой системы реализована методика теневого фотографирования. Экспозиция каждого кадра определялась длительностью импульса лазера. Временная привязка кадров осуществлялась относительно момента пробоя, а характеризующее их время соответствует началу кадра.

В экспериментах по фотографированию собственного свечения разряда лазер не использовался. Экспозиция кадра электронно-оптического регистратора составляла 40 ns. При фотографировании ранних стадий разряда (на временах менее 40 ns) часть времени экспозиции опережала начало формирования разряда. При-

вязка кадра собственного свечения разряда определялась моментом закрытия затвора электронно-оптической камеры.

Система регистрации работала в однокадровом режиме — один кадр за импульс. Сдвигом момента запуска лазера и электронно-оптического регистратора относительно момента пробоя обеспечивалась визуализация различных стадий разрядного процесса. Разрешающая способность оптической системы составляла $5 \mu\text{m}$ на три пикселя.

2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

По результатам проведенных ранее исследований [3] разряда в воздухе атмосферного давления отметим основные его характеристики. После пробоя промежутка в разрядной цепи возникал колебательный процесс с экспоненциальным затуханием тока и напряжения. Период колебаний составлял $0.6 \mu\text{s}$, амплитуда тока и время его затухания соответственно — 1 kA и $1.2 \mu\text{s}$. При этом на осциллограммах выделялись два характерных момента времени: появление напряжения на разрядном промежутке t_U и пробой. За момент пробоя t_{br} был принят момент начала роста тока и соответственно спада напряжения.

В экспериментах [3] была зарегистрирована следующая динамика пространственной структуры начальной фазы разряда. В предпробойной стадии возникают слабо светящийся диффузный канал и катодные пятна, затем в интервале от 5 до 15 ns происходит распространение светящихся образований от катода и замыкание промежутка однородным ярко светящимся каналом. Тенеграммы показывают, что канал представляет собой скопление большого числа микроканалов, которые на фотографиях свечения разряда не разрешимы. Микроструктура регистрируется на тенеграммах с первых наносекунд после пробоя.

На рис. 2 представлены начальные фрагменты осциллограмм напряжения U и тока I при различных давлениях. В промежутке времени от 0 до 60 ns происходит распространение электрических сигналов по кабельной линии. Рост напряжения и спад тока в интервале между t_U и t_{br} соответствует отражению волны напряжения на изначально разомкнутом конце кабельной линии. Видно, что напряжение и ток разряда, реализуемого при указанных давлениях, не имеют существенных отличий.

На рис. 3 представлены фотографии свечения разряда при давлении 300 Torr в различные моменты времени. Выполним сравнение динамики свечения зарегистрированной здесь при давлении 300 Torr и при давлении 760 Torr, подробно исследованной в [3].

В морфологическом плане разряд развивается одинаково, однако наблюдается задержка фаз развития с понижением давления. Так, катодные пятна без развития

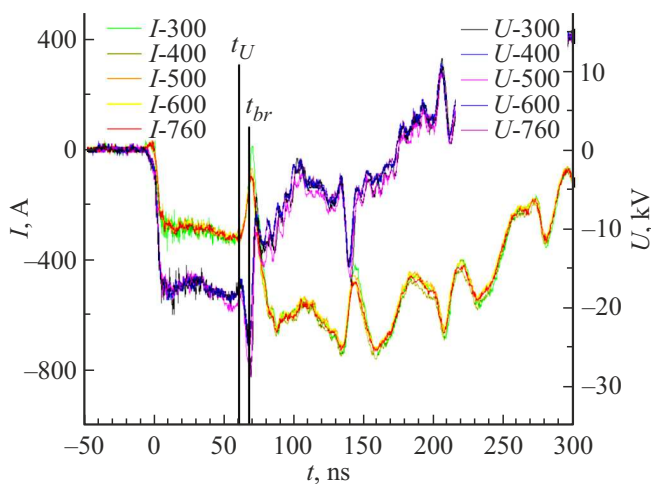


Рис. 2. Начальные фрагменты осциллограмм напряжения U и тока I при различных давлениях (t_U — момент появления напряжения на разрядном промежутке, t_{br} — момент пробоя).

канала искры при 300 Торг существуют вплоть до 10 ns, в то время как фазой их существования при 760 Торг является предпробойная стадия (ей отвечает знак минус в обозначении времени кадра) и 1–3 ns после пробоя. Ярко светящийся однородный канал при 300 Торг формируется к 60 ns, тогда как при атмосферном давлении он формируется на 15 ns. Также менее четкой при пониженных давлениях является граница канала при его радиальном расширении, которая при атмосферном давлении обладает более высоким контрастом, определяющим структуру цилиндрической ударной волны.

На рис. 4 представлены тенеграммы разряда при различных давлениях в интервале от 760 до 400 Торг, соответствующие примерно одинаковому моменту времени после пробоя — 10 ns. На всех тенеграммах регистрируется микроканальная структура. Диаметры микроканалов в центральной части разрядного промежутка составляют от 10 до 15 μm , а их присутствие наблюдается с первых наносекунд после пробоя. В то же время заметно некоторое запаздывание относительно пробоя фаз развития микроструктуры разряда с пони-

жением давления. Так, при давлении 400 Торг микроструктура только начинает проявляться и слабо различима по сравнению с большими давлениями. Данное обстоятельство становится особенно существенным при давлении 300 Торг.

На рис. 5 приведены тенеграммы разряда при давлении 300 Торг в различные моменты времени после пробоя. При таком давлении на ранних стадиях микроканалы на тенеграммах не наблюдаются и начинают регистрироваться, начиная с 30 ns, после пробоя. При более низких давлениях структуру разряда используемой здесь методикой теневого фотографирования зарегистрировать не удалось, что может быть обусловлено неприемлемым уменьшением плотности газа и ее градиентов, выходящим за предел чувствительности методики.

Таким образом, с учетом отмеченных во введении аспектов можно сделать следующие выводы относительно полученных результатов.

Основным из них является наличие микроструктуры искрового разряда не только при атмосферном, но и при пониженных давлениях. Данный факт иллюстрирует универсальность явления микроструктурирования разрядов, что, по-видимому, связано с основными закономерностями протекания газоразрядных процессов. В этой связи, исходя из наличия микроструктуры в относительно протяженных (до 60 см) искровых каналах лабораторных разрядов [17], результаты настоящей работы свидетельствуют о возможности наличия микроструктуры и в более масштабных явлениях атмосферного электричества, например, в молниях, поскольку исследованный здесь диапазон давлений соответствует интервалу высот, где они реализуются. Отметим, что о возможности микроструктурирования канала молнии указывалось ранее в работах [17–19].

Помимо этого, результаты настоящей работы обуславливают необходимость учета наличия микроструктуры и связанных с ней эффектов при разработках и применениях газоразрядных технологий, в которых используются искровые разряды при пониженных давлениях.

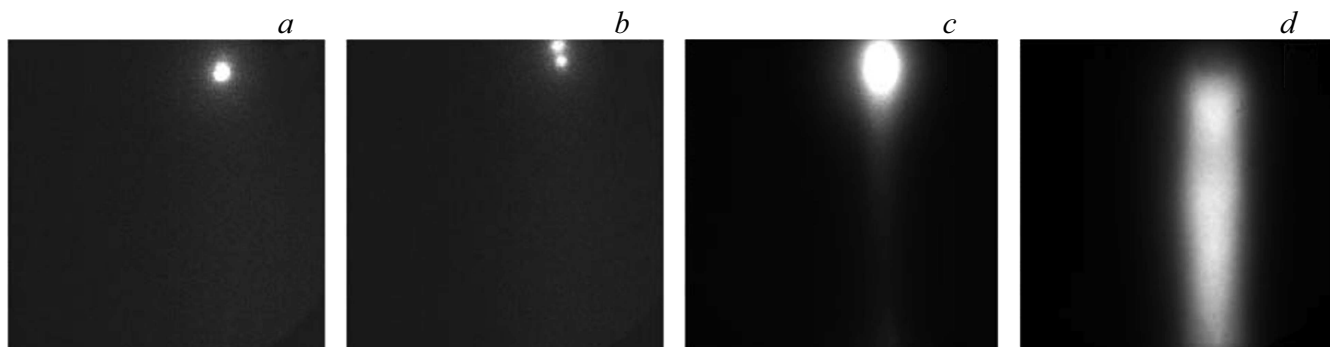


Рис. 3. Фотографии свечения разряда при давлении 300 Торг в момент времени: a — -1 , b — 10 , c — 20 , d — 60 ns.

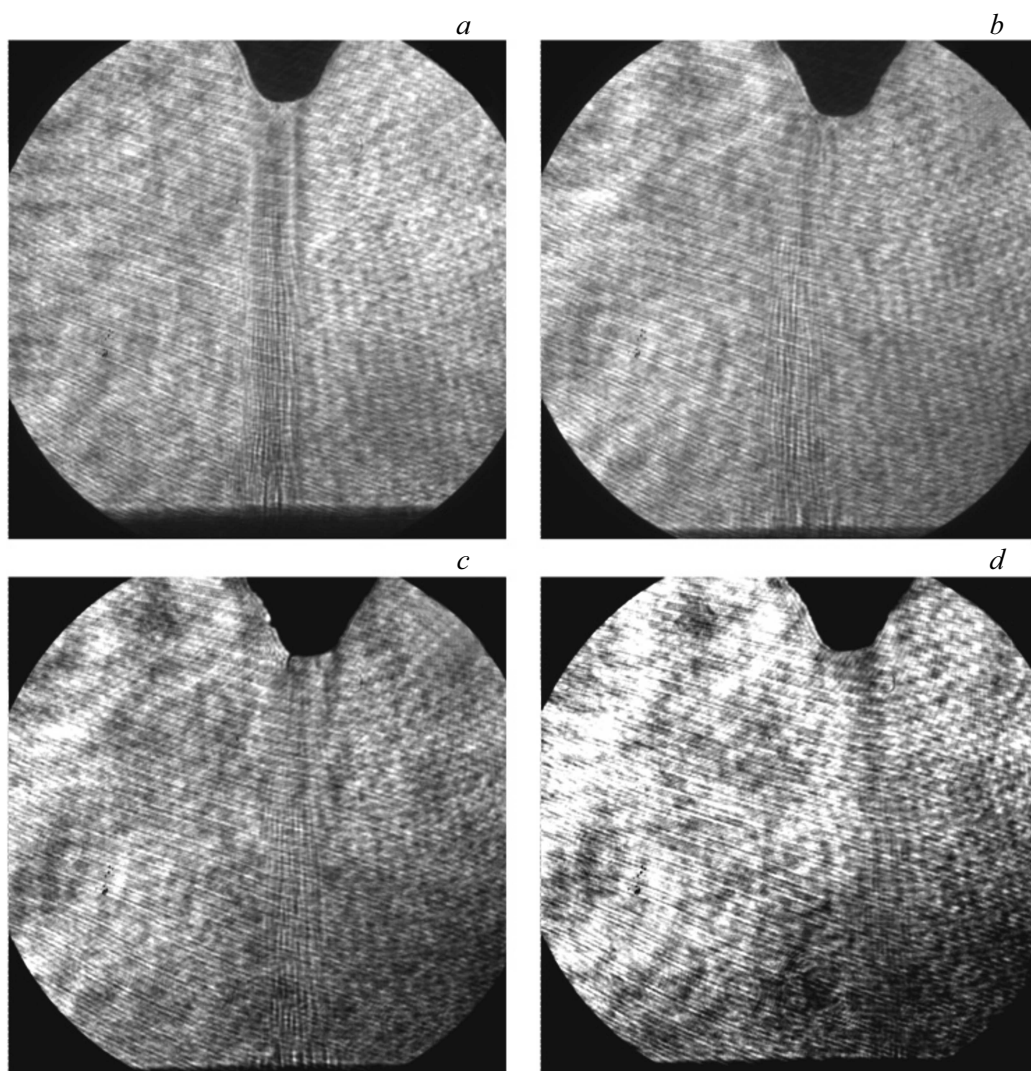


Рис. 4. Тенеграммы разряда в момент времени около 10 ns после пробоя при различных давлениях: *a* — 760, *b* — 600, *c* — 500, *d* — 400 Torr.

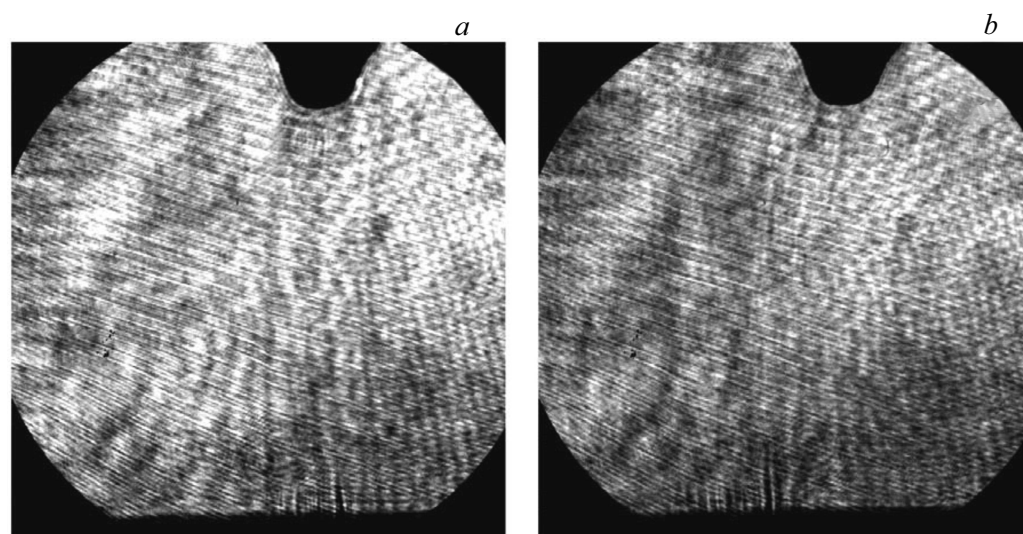


Рис. 5. Тенеграммы разряда при давлении 300 Torr в момент времени 30 (*a*) и 40 ns (*b*) после пробоя.

Заключение

С применением скоростной съемки и метода теневого фотографирования исследована структура свечения и микроструктура искрового разряда в промежутке острие (катод)—плоскость длиной 1.5 мм в воздухе в диапазоне давлений от 300 до 760 Торр.

Показано наличие микроканальной структуры разряда в исследованном диапазоне давлений с первых наносекунд после пробоя: разряд представляет собой совокупность большого количества микроканалов диаметрами от 10 до 15 μm .

Установлено запаздывание фаз развития микроструктуры и свечения разряда относительно начала пробоя с понижением давления. При этом морфология указанных структур в динамике процесса разряда сохраняет подобие при различных давлениях.

Сделаны выводы о возможности микроструктурирования молниевых разрядов и необходимости учета наличия микроструктуры в прикладных газоразрядных технологиях, использующих искровые разряды при пониженных давлениях.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] В.И. Карелин, А.А. Тренькин. *ЖТФ*, **78** (3), 29 (2008). [V.I. Karelin, A.A. Trenkin. *Tech. Phys.*, **53** (3), 314 (2008). DOI: 10.1134/S1063784208030055]
- [2] А.Г. Репьев, П.Б. Репин, В.С. Покровский. *ЖТФ*, **77** (1), 56 (2007). [A.G. Rep'ev, P.B. Repin, V.S. Pokrovski'. *Tech. Phys.*, **52** (1), 52 (2007).]
- [3] А.А. Тренькин, К.И. Алмазова, А.Н. Белоногов, В.В. Боровков, Е.В. Горелов, И.В. Морозов, С.Ю. Харитонов. *ЖТФ*, **90** (12), 2030 (2020). DOI: 10.21883/JTF.2020.12.50119.435-19 [A.A. Trenkin, K.I. Almazova, A.N. Belonogov, V.V. Borovkov, E.V. Gorelov, I.V. Morozov, S.Yu. Kharitonov. *Tech. Phys.*, **65** (12), 1948 (2020). DOI: 10.1134/S1063784220120270]
- [4] K.I. Almazova, A.N. Belonogov, V.V. Borovkov, V.S. Kurbanismailov, Z.R. Khalikova, P.Kh. Omarova, G.B. Ragimkhanov, D.V. Tereshonok, A.A. Trenkin. *Phys. Plasmas*, **27**, 123507 (2020). DOI: 10.1063/5.0026192
- [5] E.V. Parkevich, M.A. Medvedev, A.I. Khirianova, G.V. Ivanenkov, A.S. Selyukov, A.V. Agafonov, K.V. Shpakov, A.V. Oginov. *Plasma Sources Sci. Technol.*, **28**, 125007 (2019). DOI: 10.1088/1361-6595/ab518e
- [6] E.V. Parkevich, M.A. Medvedev, G.V. Ivanenkov, A.I. Khirianova, A.S. Selyukov, A.V. Agafonov, Ph.A. Korneev, S.Y. Gus'kov, A.R. Mingaleev. *Plasma Sources Sci. Technol.*, **28**, 095003 (2019). DOI: 10.1088/1361-6595/ab3768
- [7] Э.Д. Лозанский, О.Б. Фирсов. *Теория искры* (Атомиздат, М., 1975)
- [8] О.А. Синкевич. *ТВТ*, **41** (5), 695 (2003).
- [9] M. Arrayas, M. Fontelos, J. Trueba. *Phys. Rev. Lett.*, **95** (5), 165001 (2005). DOI: 10.1103/PhysRevLett.95.165001
- [10] A. Rocco, U. Ebert, W. Hundsdorfer. *Phys. Rev. E*, **6**, 035102(R)(2002). DOI: 10.1103/PhysRevE.66.035102
- [11] U. Ebert, W. Saarloos, C. Caroli. *Phys. Rev. Lett.*, **77** (20), 4178 (1996).
- [12] M. Arrayas, U. Ebert, W. Hundsdorfer. *Phys. Rev. Lett.*, **88** (17), 174502(R) (2002). DOI: 10.1103/PhysRevLett.88.174502
- [13] A. Luque, F. Brau, U. Ebert. *Phys. Rev. E*, **78**, 016206 (2008). DOI: 10.1103/PhysRevE.78.016206
- [14] V.I. Karelin, A.A. Trenkin, I.G. Fedoseev. *Phys. Atomic Nuclei*, **78** (12), 1440 (2015). DOI: 10.1134/S1063778815120133
- [15] V.I. Karelin, A.A. Trenkin. *High Voltage Engineering*, **41** (2), 1 (2015).
- [16] Э.М. Базелян, Ю.П. Райзер. *Физика молнии и молниезащиты* (Физматлит, М., 2001)
- [17] М.А. Медведев, Е.В. Паркевич, А.В. Огинов, С.М. Захаров, И.С. Байдин. *Краткие сообщения по физике Физического ин-та им. П.Н. Лебедева РАН*, **48** (12) 9 (2021).
- [18] А.А. Тренькин. *Письма в ЖТФ*, **36** (7), 13 (2010). [A.A. Tren'kin. *Tech. Phys. Lett.*, **36** (4), 299 (2010). DOI: 10.1134/S1063785010040036]
- [19] А.В. Гордеев, Т.В. Лосева. Тез. докл. XXXIII Междунар. конф. по физике плазмы и УТС (Звенигород, 13–17 февраля 2006, с. 246.)