



# Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Аз. Ф. Гайсин, Р. Ш. Садриев, Л. Н. Багаутдинова, Р. Т. Насыбуллин, Ф. М. Гайсин, Ш. Ч. Мастюков, Электрические разряды малой мощности с металлическими, диэлектрическими и электролитическими электродами при низких частотах и атмосферном давлении, *ТВТ*, 2020, том 58, выпуск 6, 860–864

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0040364420060083>

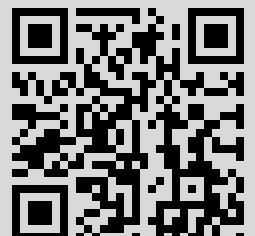
Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 95.78.47.7

18 апреля 2022 г., 22:31:31



УДК 537.525

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РАЗРЯДЫ МАЛОЙ МОЩНОСТИ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ, ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ И ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИМИ ЭЛЕКТРОДАМИ ПРИ НИЗКИХ ЧАСТОТАХ И АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

© 2020 г. **Аз. Ф. Гайсин<sup>1</sup>, \***, **Р. Ш. Садриев<sup>2</sup>**, **Л. Н. Багаутдинова<sup>3</sup>**,  
**Р. Т. Насибуллин<sup>2</sup>**, **Ф. М. Гайсин<sup>3</sup>**, **Ш. Ч. Мастюков<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

<sup>2</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

<sup>3</sup>Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева–КАИ, Казань, Россия

\*E-mail: lilup@bk.ru

Поступила в редакцию 22.02.2020 г.

После доработки 17.08.2020 г.

Принята к публикации 14.10.2020 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований электрического разряда и диэлектрического барьерного разряда малой мощности между металлическим и электролитическим электродами при низких частотах — 20, 33 и 100 Гц. Зафиксировано горение низковольтного аномального разряда переменного тока при атмосферном давлении с возрастающей вольт-амперной характеристикой. Приведены фотографии разряда, вольт-амперные характеристики электрического и диэлектрического барьерного разрядов с металлическими (штыревой и пластинчатый) и жидкими (техническая вода) электродами. Выявлены особенности горения электрического и диэлектрического барьерного разрядов низкочастотного тока с жидкими электродами и металлическими электродами различных форм.

DOI: 10.31857/S0040364420060083

### ВВЕДЕНИЕ

Современный мир требует новых прорывных результатов для решения проблем науки и техники. Такие результаты могут быть получены с помощью поисковых экспериментальных и теоретических исследований новых областей науки. В соответствии с этим большой интерес представляют исследования электрических зарядов с разными частотами пульсаций с использованием жидких и твердых электродов [1–4], которые приносят новые обширные научные результаты. В работах [5, 6] представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований высокочастотных разрядов при частоте  $f = 13.56$  МГц. Проанализированы электрические и температурные параметры электрических разрядов в [7, 8], а также диэлектрического барьерного разряда (ДБР) в [9] с твердыми и жидкими электродами, исследованных в пределах более высоких частот — 40–100 МГц.

Использование электродов разных форм из различных материалов позволяет менять форму и размеры генерируемого ДБР, а также выявлять особенности развития барьерного разряда. При генерации электрического разряда частотой

250 Гц с использованием гидрогелевых электродов получены видеоизображения разряда и кратеров, образующихся на поверхности электродов [10]. Влияние разных геометрических и физических параметров на эволюцию барьерного разряда исследовано в [11] для электродов с цилиндрическим поперечным сечением.

Особенностью дугового разряда в жидкости является локализация разряда вблизи торцов электродов и падающий характер вольт-амперной характеристики (ВАХ). В проведенных экспериментах [12] наблюдается специфическая форма электрического разряда в жидкости: объемный разряд между плоскими электродами в кавитирующей жидкости в интенсивном ультразвуковом поле. Возрастающий вид ВАХ этого разряда характерен для аномального тлеющего разряда в газе и объясняется пробоем газовых микроканалов, образованных неустойчивыми кавитационными пузырьками в постоянном электрическом поле.

Целью данной работы являются исследования электрического разряда и ДБР малой мощности с металлическими, диэлектрическими и жидкими

электродами при частотах переменного тока 20, 33 и 100 Гц.

### ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальная установка предназначена для исследования электрического разряда между металлическим и жидким электродами. Металлическая ячейка одновременно служит и для содержания электролита, и для подвода потенциала к жидкому электроду. В качестве жидкого электрода использовалась водопроводная питьевая вода. Начальная удельная электропроводность воды составляла 32 мкСм/см. В качестве металлического электрода применялись стальной штыревой электрод диаметром 4 мм (угол конического электрода – 45°, радиус округления – 0.3 мм) и медный пластинчатый электрод шириной 25 мм, толщиной 0.7 мм. В случае исследования барьерного разряда поверхности металлических электродов изолировались диэлектрическим материалом толщиной 1.2 мм. Материал диэлектрика – трубка силиконовая ТУ 9436-004-180.376.6694, которая насаживалась в натяг на кончик электрода. Расстояние между металлическим и жидким электродами составляло 5 мм. Фото- и видеосъемка проводилась трехматричной 10-мегапиксельной видеокамерой JVC GZ-HD7ER.

Вольт-амперные характеристики получены при действующих (эффективных) значениях напряжения и тока с помощью вольтметра, подключенного параллельно разрядному промежутку, и амперметра, подключенного последовательно в цепь.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Фотографии экспериментально исследованных электрических разрядов малой мощности и низкой частоты между стальным штыревым металлическим электродом и водопроводной водой представлены на рис. 1а–1в.

Стальной электрод имеет острый конец в форме конуса и винтовой корпус. Горит многоканальный искровой разряд, который имеет на поверхности электролита корневую структуру. С ростом частоты электрического поля от 20 Гц (рис. 1а) до 100 Гц (рис. 1в), интенсивность и число каналов микрозарядов увеличивается. На рис. 1г–1е приведены кадры с диэлектрическими барьерными разрядами при частотах электрического поля 20, 33 и 100 Гц. Поверхность стального электрода изолирована сплошным диэлектрическим цилиндром. В случае барьерного разряда при высоких частотах ( $f = 100$  Гц) число каналов разряда

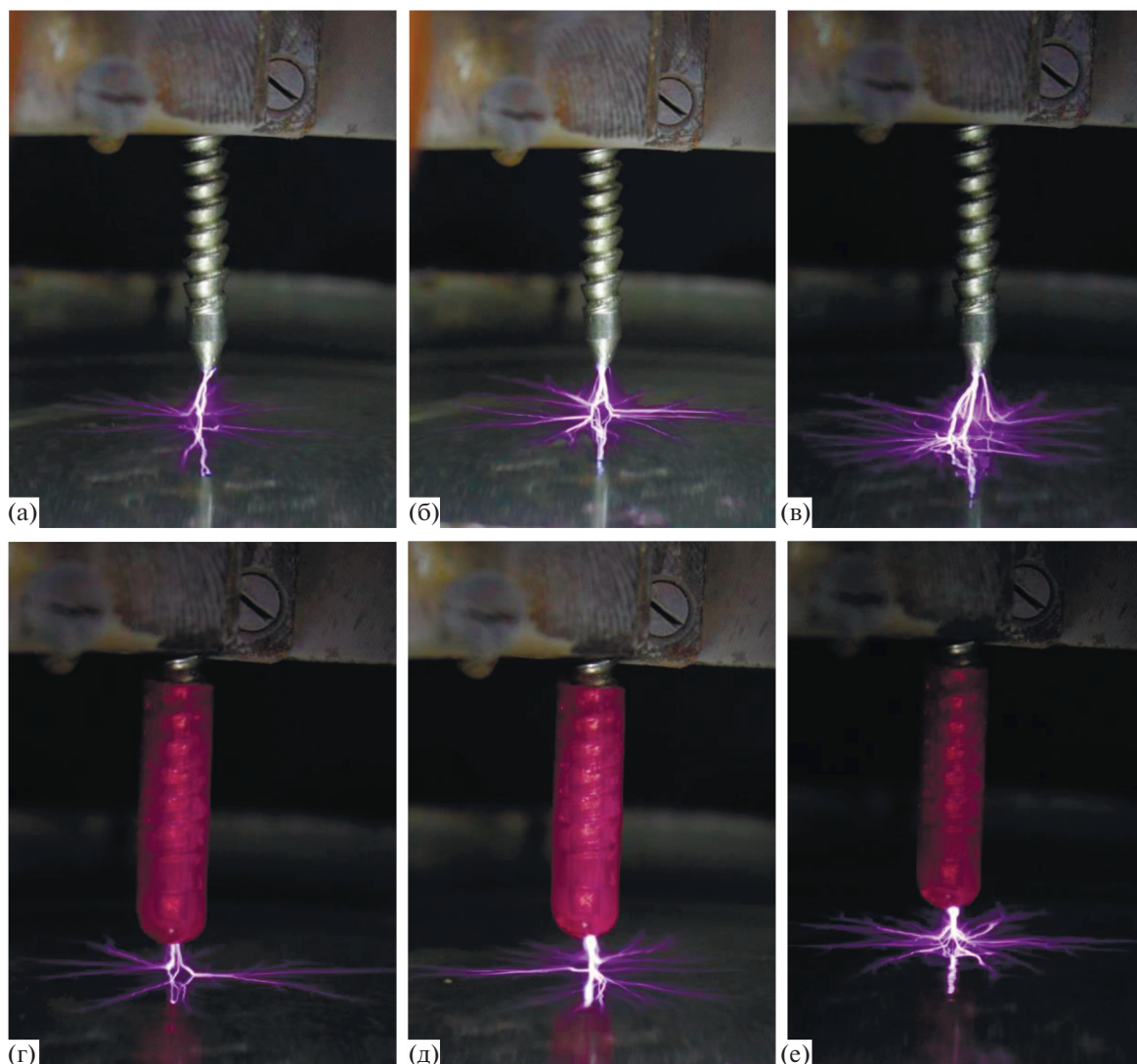
уменьшается по сравнению с безбарьерным разрядом при той же частоте (рис. 1в).

На рис. 2 представлены ВАХ электрических разрядов между стальным штыревым электродом и водопроводной водой для различных частот. Анализ указанных ВАХ позволяет установить новую форму низковольтного аномального объемного разряда, который имеет аналогии с высоковольтным аномальным тлеющим разрядом. С ростом частоты электрического поля напряжение разряда уменьшается, а характер кривых 1–3 сохраняется. Барьерный разряд слабо влияет на форму ВАХ. Из сравнения кривых на рис. 2а и 2б следует, что с уменьшением частоты электрического поля от 100 до 20 Гц максимальное значение величины напряжения в случае барьерного разряда возрастает на  $\Delta U = 12$  В.

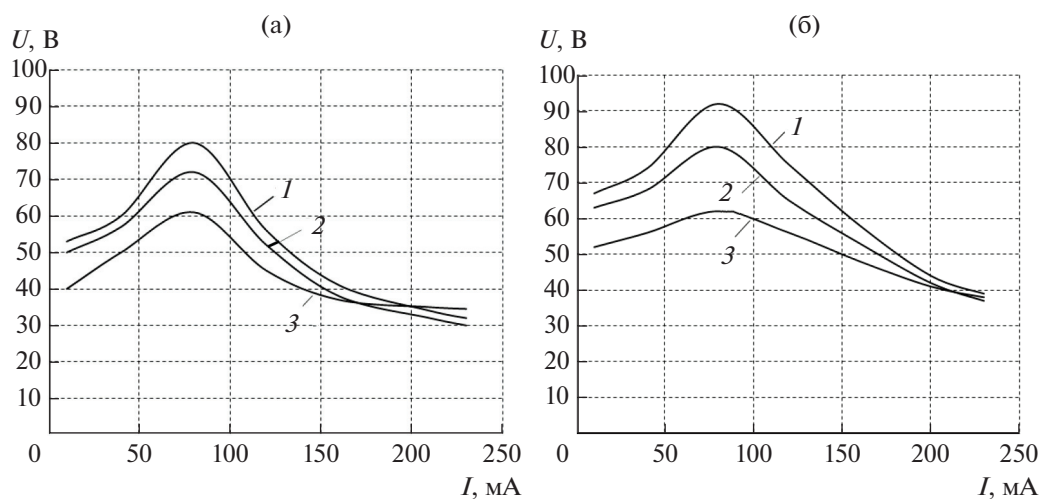
На рис. 3а–3в приведены фотографии электрических разрядов между пластинчатым медным электродом и водопроводной водой. Из сравнения кривых рис. 3а и 3б следует, что с ростом частоты электрического поля от 20 до 100 Гц число микроканалов возрастает в два раза. На рис. 3г–3е представлены фотографии ДБР между медным пластинчатым электродом и водопроводной водой. Сравнивая рис. 3а–3в и 3г–3е, можно увидеть, что при барьерном разряде число микроканалов существенно уменьшается, а с ростом частоты электрического поля от 20 до 100 Гц число микроканалов увеличивается от одного (рис. 3г) до трех (рис. 3е). Горизонтальные узкие полосы вдоль изолирующего диэлектрика появляются из-за отражения света.

Рис. 4 демонстрирует ВАХ электрического разряда между медным пластинчатым электродом и водопроводной водой для частот тока 20, 33 и 100 Гц. Сравнение ВАХ слаботокового аномального разряда (рис. 2а, 2б и 4а, 4б) показал, что геометрическая форма и материал электродов имеют слабое влияние на зависимости напряжения от тока: в случае медного электрода характер кривых ВАХ аналогичен аномальному тлеющему разряду. Барьерный характер разрядов имеет одинаковое влияние на максимальные значения напряжения разряда как в случае стального штыревого электрода, так и в случае медного пластинчатого электрода. Разница в максимальном напряжении при электрическом разряде и ДБР составляет 10 В.

Образование низковольтного аномального разряда между металлическим и электролитическим электродами при низких частотах объясняется тем, что формируется многоканальный разряд в парогазовой среде, который состоит из множества микрозарядов. Многоканальный разряд проявляет себя как объемный разряд в парогазовой среде. Все это приводит к тому, что наблюдается аномальный разряд малой мощности при низких частотах 20–100 Гц, который подобен



**Рис. 1.** Электрический разряд (а)–(в) и ДБР (г)–(е) между стальным электродом и технической водой при: (а), (г) – 20 Гц; (б), (д) – 33; (в), (е) – 100.



**Рис. 2.** ВАХ разряда между штыревым стальным электродом (а) и изолированным штыревым стальным электродом (б) и технической водой при межэлектродном расстоянии  $l = 5$  мм и частотах: 1 – 20 Гц, 2 – 33, 3 – 100.

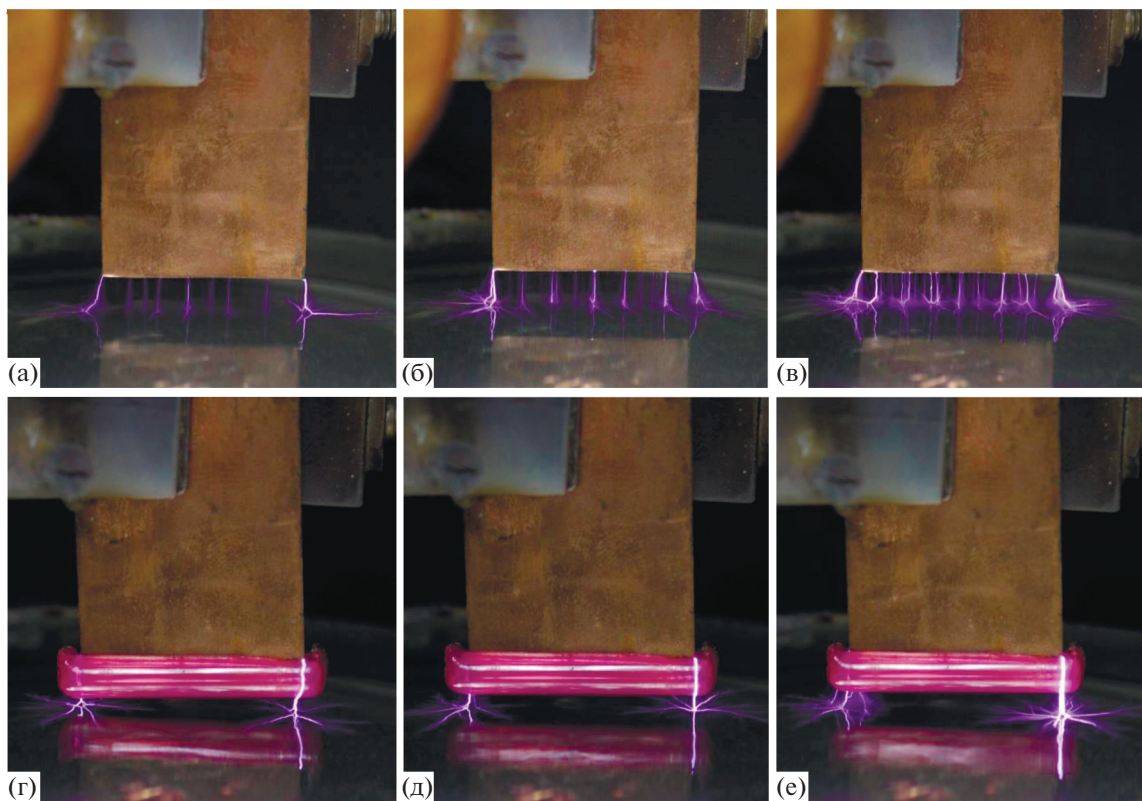


Рис. 3. Электрический разряд (а)–(в) и ДБР (г)–(е) между медным электродом и технической водой при частотах: (а), (г) – 20 Гц; (б), (д) – 33; (в), (е) – 100.

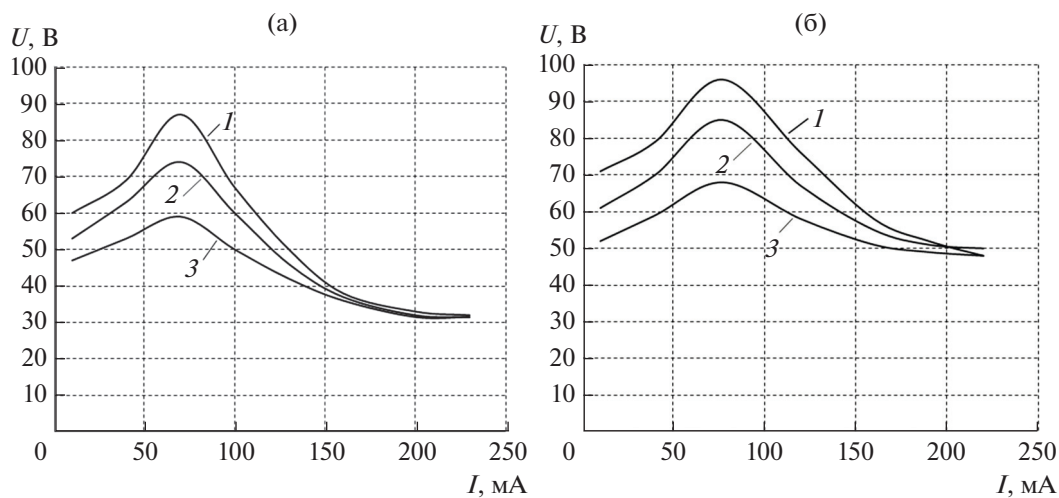


Рис. 4. ВАХ разряда между пластинчатым медным электродом (а) и изолированным пластинчатым медным электродом (б) и технической водой при  $l = 5$  мм и частотах: 1 – 20 Гц, 2 – 33,3, 3 – 100.

аномальному тлеющему разряду в газе. Представленный в данной работе разряд является одной из форм аномального тлеющего разряда – низковольтный объемный (многоканальный) аномальный разряд при переменном токе низкой частоты.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлено появление низковольтного аномального объемного (многоканального) разряда между твердым и жидким электродами в низкочастотном поле при атмосферном давлении.

нии. Представленные ВАХ при частотах 20, 33 и 100 Гц имеют аномальный характер.

2. Выявлены некоторые особенности горения электрического разряда и диэлектрического барьерного разряда: рост частоты от 20 до 100 Гц приводит к увеличению количества микроархивов в межэлектродном промежутке между твердым и жидким электродами.

3. Показано, что при диэлектрическом барьерном разряде существенно уменьшается число микроархивов в межэлектродном промежутке между твердым и жидким электродами.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гайсин А.Ф., Галимова Р.К., Абдуллин И.Ш.* Паровоздушный разряд между металлическим анодом и электролитическим катодом с добавлением неорганических и органических примесей при атмосферном давлении в процессе обработки твердых тел и жидкостей // *Материаловедение*. 2007. № 2. С. 39.
2. *Гайсин Ф.М., Гизатуллина Ф.А., Камалов Р.Р.* Энергетические характеристики разрядов в атмосфере между электролитом и медным анодом // *Физика и химия обработки материалов*. 1985. № 4. С. 58.
3. *Галимзянов И.И., Гайсин А.Ф., Фахрутдинова И.Т., Шакирова Э.Ф., Ахатов М.Ф., Каюмов Р.Р.* Некоторые особенности развития электрического разряда между струйным анодом и жидким катодом // *ТВТ*. 2018. Т. 56. № 2. С. 306.
4. *Khlyustova A., Sirotkin N., Titov V.* Plasma-induced Precipitation of Metal Ions in Aqueous Solutions // *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 2019. V. 94. № 12. P. 3987.
5. *Гайсин А.Ф.* Особенности перехода слаботокового высокочастотного емкостного разряда с электролитическим электродом в сильноточный разряд // *ТВТ*. 2015. Т. 53. № 1. С. 18.
6. *Гайсин А.Ф., Сон Э.Е., Петряков С.Ю.* Высокочастотный емкостной разряд с проточными жидкими электродами при понижении давления // *Физика плазмы*. 2017. Т. 43. № 7. С. 625.
7. *Гайсин Аз.Ф., Багаутдинова Л.Н., Гайсин Ал.Ф., Садриев Р.Ш., Гайсин Ф.М., Галимзянов И.И., Гильмутдинов А.Х., Шакирова Э.Ф.* Термограммы высокочастотного емкостного разряда между твердым и жидким электродами // *ТВТ*. 2018. Т. 56. № 5. С. 838.
8. *Сон Э.Е., Садриев Р.Ш., Гайсин Ал.Ф., Багаутдинова Л.Н., Гайсин Ф.М., Шакирова Э.Ф., Ахатов М.Ф., Гайсин Аз.Ф., Каюмов Р.Р.* Особенности сверхвысокочастотного разряда между медным штыревым электродом и технической водой // *ТВТ*. 2014. Т. 52. № 6. С. 961.
9. *Багаутдинова Л.Н., Садриев Р.Ш., Гайсин А.Ф., Мамтюков Ш.Ч., Гайсин Ф.М., Фахрутдинова И.Т., Лещука М.А., Гайсин А.Ф.* Некоторые особенности диэлектрического барьерного разряда с жидким и твердым электродами // *ТВТ*. 2019. Т. 57. № 6. С. 953.
10. *Андреев В.В., Васильева Л.А., Матюнин А.Н.* Исследование структуры барьерного разряда вблизи электрода с цилиндрическим поперечным сечением // *Прикладная физика*. 2011. № 1. С. 52.
11. *Бульчев Н.А., Казарян М.А., Гриднева Е.С., Муравьев Э.Н., Солинов В.Ф., Кошелев К.К., Кошелева О.К., Сачков В.И., Чен С.Г.* Плазменный разряд с объемным свечением в жидкой фазе под действием ультразвука // *Краткие сообщения по физике ФИАН*. 2012. № 7. С. 39.
12. *Дубинов А.Е., Кожяева Ю.П.* Генерация импульсно-периодической последовательности наносекундных искровых разрядов в воздушном промежутке между прозрачными гидрогелевыми электродами // *Письма в ЖТФ*. 2019. Т. 45. № 8. С. 16.