

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

УДК 533.915+536.491

НАБЛЮДЕНИЕ ПЛАЗМЕННОГО АНАЛОГА ЭФФЕКТА МПЕМБЫ

© 2023 г. В. А. Дехтярь^a, А. Е. Дубинов^{a, b, *}, Г. Н. Колесов^{a, b}

^a Российский Федеральный Ядерный Центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ), просп. Мира, 37, Саров, Нижегородская обл., 607188 Россия

^b Саровский физико-технический институт — филиал Национального Исследовательского Ядерного Университета “Московский инженерно-физический институт” (СарФТИ-НИЯУ МИФИ), ул. Духова, 6, Саров, Нижегородская обл., 607186 Россия

*E-mail: dubinov-ae@yandex.ru

Поступила в редакцию 27.12.2022 г.

После доработки 14.03.2023 г.

Принята к публикации 16.03.2023 г.

В работе экспериментально исследовались процессы замерзания сидящих на подложке капель воды при воздействии на них наносекундных искровых разрядов. Было обнаружено, что капли, подвергаемые действию искровых разрядов, замерзают значительно раньше, чем капли без разрядов. Отмечена аналогия наблюдаемых процессов с известным эффектом Мпембы. Дано качественное объяснение наблюдаемому эффекту: быстрое замерзание обязано гидратированным электронам, образующимся при контакте воды с плазмой и играющим роль центров кристаллизации.

Ключевые слова: капля, искровой разряд, замерзание, эффект Мпембы

DOI: 10.31857/S0023119323040071, **EDN:** QNMEQJ

ВВЕДЕНИЕ

В 1963 г. танзанийский школьник Эрасто Мпемба открыл, что нагретая почти до кипения вода замораживается быстрее, чем холодная. Результаты его исследований в соавторстве с проф. Д. Осборном были опубликованы в [1]. С тех пор этот эффект называют эффектом Мпембы или парадоксом Мпембы.

Эффект Мпембы был подтвержден несколькими независимыми исследованиями [2, 3]. Эффект интенсивно исследовался все эти годы с целью найти ему разумное объяснение [2–11]. Было также установлено, что эффект Мпембы может наблюдаться не только в воде, но и в некоторых других средах [12, 13] (справедливо заметить, что сам Мпемба впервые наблюдал быструю заморозку молока, а уж потом стал исследовать воду). В настоящее время не существует общепринятой точки зрения на физические механизмы, вызывающие эффект Мпембы. В итоге вопрос о том, почему вода, которой предварительно сообщили дополнительную тепловую энергию, замораживается быстрее холодной, пока остается открытым.

В данной работе впервые исследуется заморозка капель воды, подвергаемых импульсно-периодическому контактному воздействию плазмой наносекундных искровых разрядов. В этих опытах каплям воды также сообщалась дополнительная энергия при их контакте с плазмой разрядов.

Определенным мотивом к подобным исследованиям явились недавние работы [14–16], в которых исследовались гидродинамические и физико-химические процессы в каплях жидкостей под действием искровых разрядов. В них и в ряде других работ, в частности, было найдено, что плазма может играть роль сурфактанта для жидкостей, т.е. в результате контакта с жидкостью плазма способна существенно изменять силы поверхностного натяжения [14, 16], приводить в движение капли вдоль подложки [15–17], плазма также стимулирует в жидкостях так называемый плазменно-капиллярный эффект [16, 18, 19]. К тому же плазма может влиять и на морфологию кристаллизации солей при высыхании капель солевых растворов [20].

Ниже показано, что капли воды, подвергшиеся импульсно-периодическому воздействию плазмой наносекундных искровых разрядов, замерзают раньше, нежели капли без такого воздействия. Таким образом, здесь был обнаружен плазменный аналог эффекта Мпембы.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Используемое оборудование

Для проведения исследований был собран специальный стенд, схема которого показана на рис. 1. Основу стенда составляет термоэлектриче-

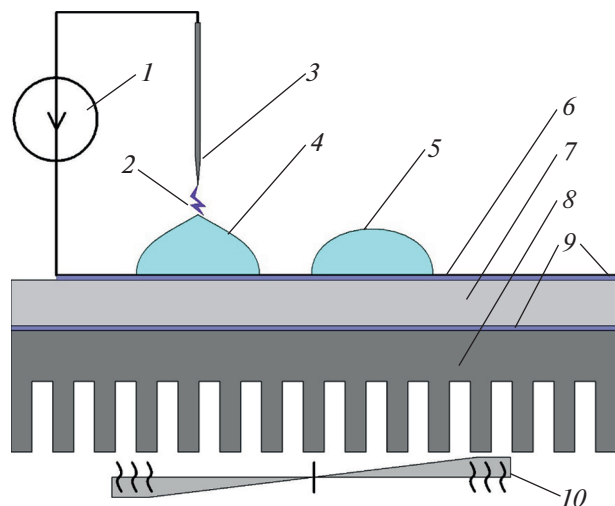


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 – генератор импульсов, 2 – канал искрового разряда, 3 – игольчатый электрод, 4 – капля воды, подвергаемая действию искровых разрядов, 5 – контрольная капля воды, 6 – алюминиевая фольга, 7 – термоэлемент Пельтье, 8 – тепловой радиатор, 9 – слой термокля, 10 – вентилятор.

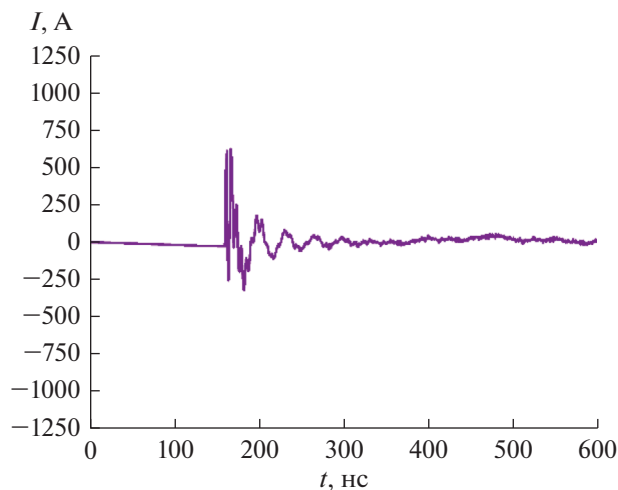


Рис. 2. Осциллограмма импульса тока проводимости искрового разряда.

ский преобразователь – элемент Пельтье марки ТЕС1-12706. При подключении к нему источника постоянного напряжения 12 В с током 6 А одна из поверхностей элемента охлаждается, а другая нагревается. Размер охлаждаемой поверхности – $4 \times 4 \text{ см}^2$. Для устойчивой работы на нагреваемой поверхности элемента устанавливался тепловой радиатор с вентилятором для отвода тепла. На охлаждаемой поверхности элемента закреплялась алюминиевая фольга толщиной 15 мкм. Для надежного термоконтakta между фольгой и охлаждаемой поверхностью элемента наносился слой термокля толщиной 200 мкм. Было измерено,

что свободная поверхность фольги в стенде охлаждается от 20°C до -8°C примерно за 20 с с момента включения элемента.

В экспериментах на горизонтальную поверхность фольги наносились две капли воды. Над одной из двух капель закреплялся искровой электрод в форме стальной иглы так, чтобы зазор между верхней точкой капли и острием иглы был величиной 2–5 мм. Диаметр цилиндрической части иглы – 0.5 мм. Другим электродом искрового промежутка служила алюминиевая фольга. Капля воды, над которой отсутствовал игольчатый электрод, считалась контрольной.

К электродам подключался генератор импульсов. В качестве генератора импульсов использовалась бытовая электрозажигалка “Iskorka-6” трансформаторного типа, которая выдает непрерывную последовательность наносекундных импульсов высокого напряжения (до 15 кВ). Импульсы следуют с частотой 20 Гц. При подключении к выходу генератора нагрузки в виде искрового промежутка, в цепи возникают импульсы тока разряда с амплитудой до 600 А. Типичная осциллограмма импульса тока проводимости одного разряда показана на рис. 2. В итоге электрическая энергия, высвобождаемая в одном импульсе, оценена величиной в несколько десятков мДж.

Исследования проводились в помещении при комнатной температуре 20°C и нормальном атмосферном давлении – 750 Тор. Приведенные далее результаты были повторены не менее 10 раз.

Методика наблюдения

Визуализация разрядов и фотографирование высохших капель осуществлялись с помощью ручного цифрового микроскопа Celestron (Model 44302-A). Последовательность действий была такова: сначала на фольгу наносились капли, затем производилась фокусировка оптики микроскопа на капли. Затем включалась видеозапись.

Спустя 3 с после начала видеозаписи включался генератор искровых разрядов, а затем еще после 3 с включался охлаждающий элемент. После того, как обе капли замерзли, все части стенда – элемент, источник питания искровых разрядов и видеозапись, выключались. Типичная длительность записи одного эксперимента до замерзания составляла до 100 с. Отметим, что искровые разряды прекращались раньше момента отключения всех систем, т.к. в процессе замораживания напряжение на искровых электродах становилось недостаточным для пробоя вследствие частичного обледенения капли.

Визуализация показала, что замораживание капель в наших экспериментах происходило по известному из литературы сценарию [21, 22]: сначала со дна капли отрывался плоский фронт за-

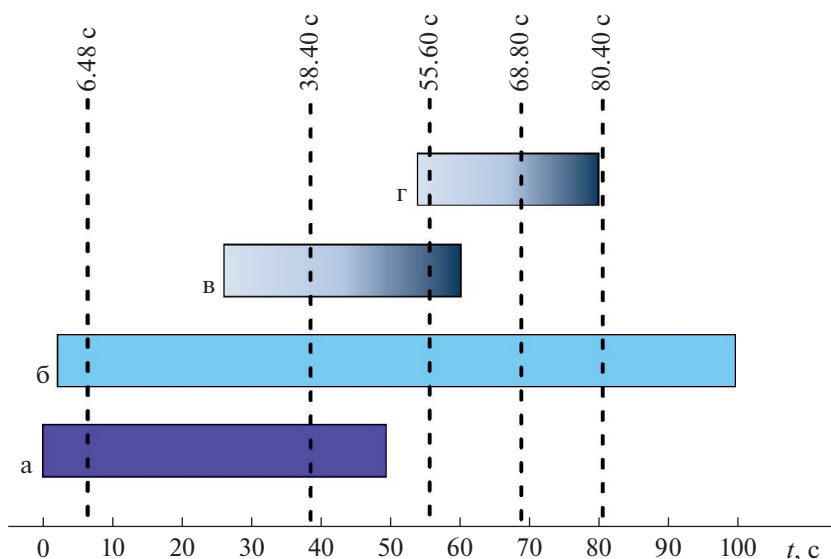


Рис. 3. Временная диаграмма заморзания капель воды: а — диапазон времени следования искровых разрядов; б — диапазон времени визуализации; в — диапазон времени заморзания капли воды, подвергаемых действию искровых разрядов; г — диапазон времени заморзания контрольной капли; вертикальные штриховые линии соответствуют кадрам видеозаписи рис. 4.

твердевания, который со средней скоростью примерно 0.07 мм/с поднимался вверх, а затем, когда фронт доходил до вершины капли, на ней образовывался характерный острый выступ. Момент времени рождения выступа свидетельствовал, что капля полностью превратилась в лед. Таким образом, момент времени отрыва плоского фронта затвердевания мы принимали за начало процесса заморзания, а момент образования острого выступа на вершине капли мы принимали за момент завершения заморзания капли. Похожие экспериментальное оборудование и методика изучения временной динамики заморзания капель были использованы в [23].

Результаты наблюдения

Наблюдения за каплями выявили, что капли воды, подвергшиеся импульсно-периодическому воздействию наносекундных искровых разрядов, замораживаются раньше, нежели капли без такого воздействия. Регистрируемое время опережения заморзания обработанных плазмой капель по сравнению с заморзанием контрольных капель составляло в разных экспериментах от 15 до 25 с.

На рис. 3 приведена одна из временных диаграмм процесса наблюдения, которая весьма типична. На ней отмечены моменты времени включения разрядов и охлаждения, моменты начала и завершения заморзания капель, а также моменты времени, в которые взяты отдельные кадры типичной видеозаписи процесса. Эти кадры, иллюстрирующие отдельные фазы диаграммы рис. 3, представлены на рис. 4. Прокомментируем рис. 3

и 4. Длительности процесса затвердевания обеих капель по данным нескольких экспериментов оказались почти одинаковы с разбросом $\pm 20\%$, что соответствует примерно равной скорости движения фронта затвердевания. Этот разброс, в основном, был обусловлен неодинаковостью размеров капель.

Тем не менее, левая капля, на которую воздействовала плазма разряда, сообщая капле некоторую энергию, всегда начинала затвердевать существенно раньше контрольной правой капли (на рис. 3 — примерно на 32 с) и завершала свое затвердевание также раньше правой капли примерно на 24 с. Найденное опережение можно трактовать как плазменный аналог эффекта Мпембы.

На рис. 4а показано начальное состояние капль, над одной из которой — левой — видно свечение плазмы искрового разряда. На рис. 4б показан кадр видеозаписи, на котором видно, что в левой капле, на которую воздействовали плазмой разряда, поднимается фронт затвердевания, в то время как в правой контрольной капле такого фронта еще нет. Таким образом, процесс затвердевания в капле, обработанной плазмой, начался раньше, чем в контрольной капле. Заметим также, что левая капля на этом кадре уже помутнела в результате затвердевания, в то время как правая капля осталась прозрачной, т.к. затвердевания еще нет. Кадр на рис. 4в показывает, что теперь уже в правой капле возник и начал подниматься фронт затвердевания, но к этому моменту времени фронт затвердевания в левой капле полностью прошел ее по высоте. На рис. 4г показано, что левая капля полностью заморзла, и на ее вершине

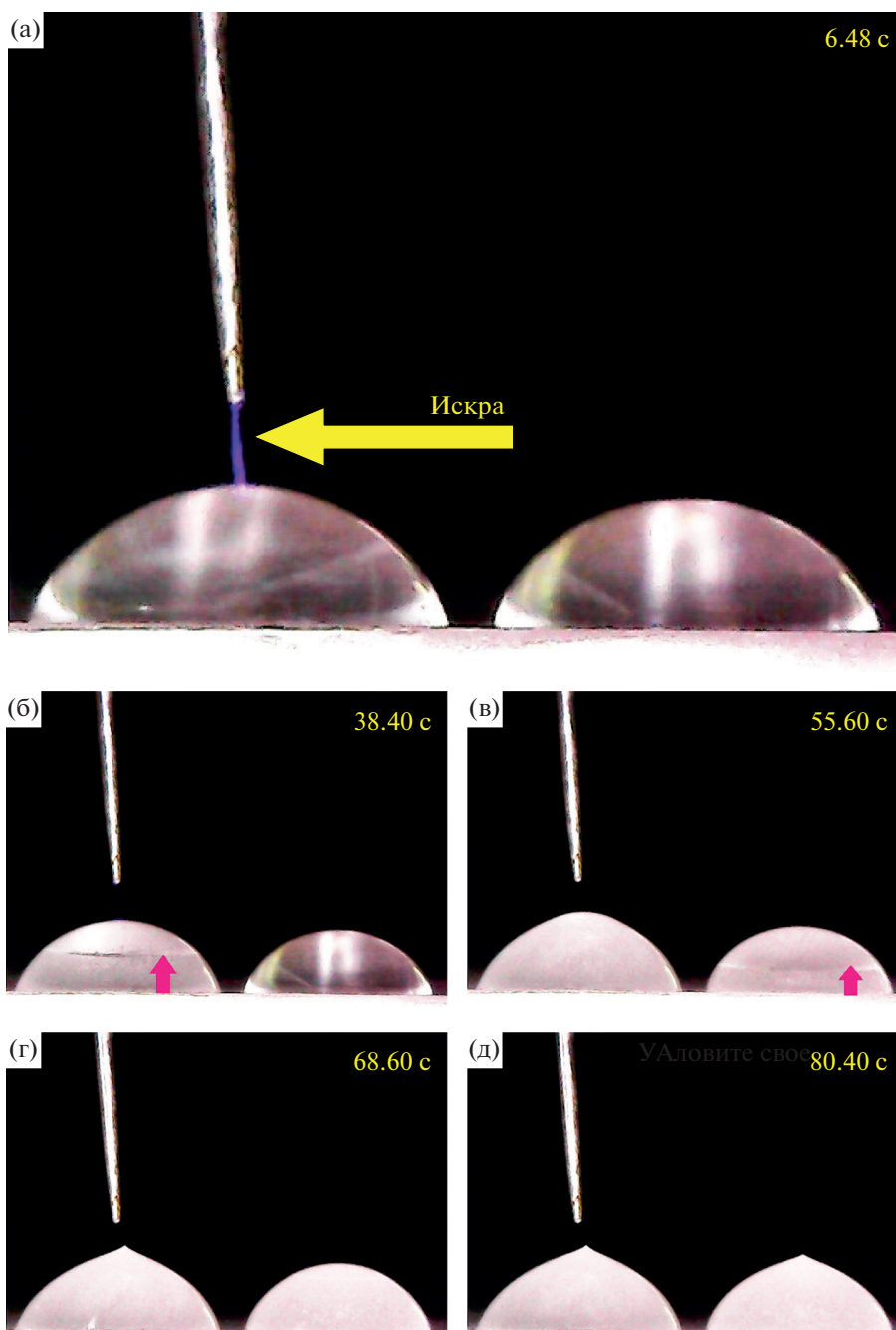


Рис. 4. Отдельные кадры видеозаписи процесса замерзания каплей, иллюстрирующие отдельные фазы замерзания каплей: (а) — начальное состояние каплей, стрелка указывает на канал искрового разряда; (б) — движение фронта затвердевания в левой капле (показано стрелкой); (в) — движение фронта затвердевания в правой контрольной капле (показано стрелкой); (г) — образование выступа на вершине левой капли после ее полного замерзания; (д) — образование выступа на вершине правой контрольной капли после ее полного замерзания.

образовался острый выступ. И только в конце всего процесса, спустя примерно 20 с, такой же выступ возник и на правой капле (рис. 4д).

Таким образом, процесс затвердевания капли, подверженной искровым разрядами, начинается и завершается существенно раньше аналогичных процессов в контрольной капле.

ДИСКУССИЯ

Дадим возможное объяснение наблюдаемому плазменному эффекту Мпембы. Известно, что при контакте плазмы с жидкостью или твердым телом на их поверхность выпадают заряженные частицы — электроны и ионы [24, 25], при этом электроны выпадают в гораздо большем количе-

стве, чем ионы, вследствие большой разницы в подвижностях электронов и ионов в плазме. Заряженные частицы, как и другие образовавшиеся под действием плазмы частицы, поглощаются и диффундируют вглубь конденсированного вещества [26].

Если таким поглощаемым веществом является полярная жидкость, например, вода, то заряженные частицы поляризуют вокруг себя воду, формируя сольватированные (в случае воды – гидратированные) электроны и ионы [16, 27, 28]. Возникновение фракции гидратированных заряженных частиц в воде при контакте ее с низкотемпературной плазмой было неоднократно подтверждено экспериментально [29, 30]. Кулоновское взаимодействие между гидратированными заряженными частицами снижает поверхностную энергию воды, и тем самым уменьшается поверхностное натяжение. Этим объясняется, например, действие плазмы на жидкость, аналогичное действию сурфактанта [14–17].

Гидратированные электроны, представляющие собой по структуре кластеры молекул воды, могут выполнять и роль центров затвердевания (центров кристаллизации) при охлаждении и стимулировать раннее объемное затвердевание. Важная роль центров кристаллизации на длительность процесса замерзания воды в эффекте Мпембы отмечена в [5]. Таким образом, генерация гидратированных заряженных частиц в капле воды при контакте капли с плазмой искрового разряда, которые являются центрами кристаллизации, можно объяснить наблюдаемый здесь плазменный эффект Мпембы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе экспериментально исследовалась пространственно-временная динамика замерзания сидящих на горизонтальной подложке капель воды при воздействии на них импульсно-периодической последовательности наносекундных искровых разрядов. Для экспериментов был создан специальный стенд на базе термоэлектрического элемента Пельтье. Визуализация процесса замерзания производилась с помощью ручного микроскопа.

Длительность процесса полного замерзания капель в созданном стенде не превышала 100 с. Было обнаружено, что капли, подвергаемые действию искровых разрядов, замерзают значительно раньше, чем капли без разрядов. Отмечена аналогия наблюдаемых процессов с известным эффектом Мпембы.

Дается качественное объяснение наблюдаемому эффекту: быстрое замерзание может быть связано гидратированным электронам, образующимся при контакте воды с плазмой и играющим роль центров кристаллизации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mpemba E.B., Osborne D.G.* // Phys. Educ. 1969. V. 4. № 3. P. 172.
2. *Bechhoefer J., Kumar A., Chétrite R.* // Nature Rev. Phys. 2021. V. 3. № 8. P. 534.
3. *Tang Z., Huang W., Zhang Y., Liu Y., Zhao L.* // InfoMat. 2022. P. e12352.
4. *Geng M.* // Amer. J. Phys. 2006. V. 74. № 6. P. 514.
5. *Olmo A., Baena R., Risco R.* // Int. J. Refrigeration. 2008. V. 31. № 2. P. 262.
6. *Esposito S., De Risi R., Somma L.* // Phys. A. 2008. V. 387. № 4. P. 757.
7. *Katz J.I.* // Amer. J. Phys. 2009. V. 77. № 1. P. 27.
8. *Vynnycky M., Mitchell S.L.* // Heat Mass Transfer. 2010. V. 46. № 8–9. P. 881.
9. *Brownridge J.D.* // Amer. J. Phys. 2011. V. 79. № 1. P. 78.
10. *Vynnycky M., Maeno N.* // Int. J. Heat Mass Transfer. 2012. V. 55. № 21–22. P. 6238.
11. *Vynnycky M., Maeno N.* // Int. J. Heat Mass Transfer. 2012. V. 55. № 23–24. P. 7297.
12. *Takada S., Hayakawa H., Santos A.* // Phys. Rev. E. 2021. V. 103. № 3. P. 032901.
13. *Biswas A., Prasad V.V., Rajesh R.* // Europhys. Lett. 2021. V. 136. № 4. P. 46001.
14. *Dubinov A.E., Kozhayeva J.P., Lyubimtseva V.A., Selemir V.D.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2017. V. 45. № 12. P. 3094.
15. *Dubinov A.E., Kozhayeva J.P., Lyubimtseva V.A., Selemir V.D.* // Magnetohydrodynamics. 2018. V. 54. № 3. P. 261.
16. *Dubinov A.E., Kozhayeva J.P., Lyubimtseva V.A., Selemir V.D.* // Adv. Colloid Interface Sci. 2019. V. 271. № 1. P. 101986.
17. *Dubinov A.E., Iskhakova D.N., Lyubimtseva V.A.* // Phys. Fluids. 2021. V. 33. № 6. P. 061707.
18. *Дубинов А.Е., Кожяева Ю.П., Селемир В.Д.* // Теплофиз. Выс. Темп. 2018. Т. 56. № 3. С. 469.
19. *Дубинов А.Е., Любимцева В.А.* // Электр. Обраб. Мат. 2022. Т. 58. № 4. С. 51.
20. *Дубинов А.Е., Любимцева В.А.* // ХВЭ. 2019. Т. 53. № 1. С. 3.
21. *Zhang X., Liu X., Min J., Wu X.* // Appl. Thermal Eng. 2019. V. 147. № 1. P. 927.
22. *Zhao Y., Yang C., Cheng P.* // Appl. Phys. Lett. 2021. V. 118. № 14. P. 141602.
23. *Singh D.P., Singh J.P.* // Appl. Phys. Lett. 2013. V. 102. № 24. P. 243112.
24. *Альтеркоп Б.А., Дубинова И.Д., Дубинов А.Е.* // ЖЭТФ. 2006. Т. 129. № 1. С. 197.
25. *Федоров В.А.* // Физ. Плазмы. 2014. Т. 40. № 10. С. 946.
26. *Пискарев И.М.* // ХВЭ. 2021. Т. 55. № 2. С. 145.
27. *Харт Э., Анбар М.* // Гидратированный электрон. М: Атомиздат, 1973.
28. *Herbert J.M., Coons M.P.* // Annu. Rev. Phys. Chem. 2017. V. 68. № 1. P. 447.
29. *Gopalakrishnan R., Kawamura E., Lichtenberg A.J., Lieberman M.A., Graves D.B.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2016. V. 49. № 29. P. 295205.
30. *Martin D.C., Bartels D.M., Rumbach P., Go D.B.* // Plasma Sources Sci. Technol. 2021. V. 30. № 3. P. 03LT01.