

# Физика плазмы и плазменные методы

УДК537.525

## Трансформация пылевых структур в разряде постоянного тока в неоне

В. В. Шумова, Д. Н. Поляков, Л. М. Василяк

*Экспериментально и численно исследована зависимость формы пылевых структур от величины тока тлеющего разряда в неоне. При увеличении тока однородные по радиальному сечению пылевые структуры трансформировались в структуры с внутренней полостью, свободной от пылевых частиц. Рассчитана потенциальная энергия пылевых частиц с помощью диффузионно-дрейфовой модели положительного столба разряда в неоне с учетом градиента температуры. Определена роль тепловыделения в процессе изменения формы пылевых структур. Результаты работы могут быть использованы для плазменных технологий с пылевой плазмой.*

PACS: 52.27.Lw; 52.50.Nr.

*Ключевые слова:* пылевая плазма, пылевые структуры, войд, тлеющий разряд, неон, термофорез, потенциальная энергия частицы.

### Введение

Плазма с пылевыми частицами или пылевая (комплексная) плазма [1, 2] применяется в экспериментальных технологических реакторах как рабочая среда, где происходят плазмохимические процессы, используемые для модификации поверхности, нанесения покрытий на частицы микронных размеров, а также реализуются процессы синтеза новой фазы, образования наноструктур и роста микрочастиц. Получение покрытий на микрочастицах [3—5], а также синтез частиц [6—8] можно реализовать в низкотемпературной плазме, образованной электрическими разрядами в газах низкого давления [9].

В последние годы прикладные исследования пылевой плазмы направлены на поиск новых и совершенствование уже существующих технологий с использованием пылевой плазмы. Развитие технологий требует совершенствования методов управления процессами, происходящими в плаз-

мохимических реакторах с пылевой плазмой [10]. Необходимо, в частности, разрабатывать способы управления формой и положением пылевых структур и контролировать тепловые процессы в реакционном объеме с целью повышения качества покрытий и синтеза частиц с заданными размерами, толщиной покрытия и необходимыми физическими свойствами.

Пылевая плазма представляет собой диссипативную систему, в которой вкладываемая извне (в плазму) энергия переходит в энергию элементарных и коллективных процессов самоорганизации пылевой плазмы, приводящих к образованию плазменно-пылевых структур [9, 11]. Пылевые частицы удерживаются в параболических электростатических ловушках в плазме газовых разрядов низкого давления, образуя пылевые диссипативные структуры. Пылевые частицы приобретают большой отрицательный заряд порядка  $10^3$  зарядов электрона, а сами структуры при высокой степени упорядоченности называют кулоновскими кристаллами [1].

Возможность образования, устойчивость и степень упорядоченности пылевых структур, а также синтез частиц в плазме зависят от температуры газа  $T$  [1, 2, 7, 11, 12] и во многом определяются параметром неидеальности  $\gamma = Z_d^2 e^2 n_d^{1/3} / 4\pi\epsilon_0 kT$ , где  $Z_d$  — заряд пылевых частиц,  $n_d$  — концентрация пылевых частиц,  $k$  — постоянная Больцмана,  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная (в системе СИ),

**Шумова Валерия Валерьевна**, старший научный сотрудник.  
**Поляков Дмитрий Николаевич**, старший научный сотрудник.

**Василяк Леонид Михайлович**, главный научный сотрудник.  
Объединенный Институт высоких температур РАН.  
Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, строение 2.  
Тел. 8 (495) 484-26-10. E-mail: shumova@ihed.ras.ru

Статья поступила в редакцию 23 июня 2015 г.

© Шумова В. В., Поляков Д. Н., Василяк Л. М., 2015

$e$  — элементарный заряд. Кроме величины температуры на образование пылевых структур, на их пространственное расположение и форму оказывают влияние термофоретические силы, связанные с градиентом температуры [12, 13]. Количество и концентрация удерживаемых в реакционном объеме плазмы микрочастиц, а также форма и положение пылевых структур самосогласованным образом определяются параметрами потенциала, задаваемого суперпозицией различных сил, действующих на пылевые частицы в плазме [1, 2]. Трансформации пылевых структур могут происходить как в радиальном, так и в продольном направлении. При этом изменение формы структуры зависит от условий равновесия как в радиальном направлении, так и вдоль оси разряда [12].

Сила термофореза, связанная с тепловыделением, может быть по величине того же порядка, что и электрические силы, и совместно с ними играть основную роль в самоорганизации, устойчивости и процессах разрушения плазменно-пылевых образований. С помощью сил термофореза можно, например, создавать тепловые ловушки в плазме для удержания пылевых частиц [14]. Используя различные тепловые воздействия можно изменять форму и положение плазменно-пылевой структуры [12—19], в частности, разделять ее на независимые части и реализовать пространственную сепарацию пылевых частиц по размерам [15]. Тепловые поля используются для диагностики и расчета полей сил, действующих на пылевые частицы [16, 17], заряда пылевых частиц и величины электрического поля [18].

Увеличение тепловыделения в разряде приводит к изменению формы пылевых структур [12]. Трансформация от однородных по объему структур к структурам, в которых внутренняя область свободна от пылевых частиц, т. е. образовывался вояд, наблюдалась в [12, 15, 19]. Моделирование влияния концентрации пылевых частиц на параметры разряда постоянного тока в неоне выполнено в [20].

В данной работе экспериментально и численно исследовано влияние тока разряда и связанной с ним вкладываемой в разряд мощности на форму и пространственное положение пылевых структур в разряде постоянного тока в неоне.

### Описание эксперимента

Тлеющий разряд постоянного тока создавался в неоне при давлении 0,14—1,2 Торр в диапазоне тока 0,1—4,5 мА в длинной стеклянной разрядной трубке с внутренним радиусом  $R = 8,25$  мм. Пылевые структуры из частиц меламин-формальдегида диаметром  $a = 2,55$  мкм удержива-

лись в положительном столбе разряда между двумя дополнительными кольцевыми электродами. Изображения пылевых частиц регистрировались в отраженном свете плоского лазерного луча с помощью микроскопа и видеокамеры в продольном сечении разряда. Измерялись величина тока разряда  $I$ , падение напряжения  $\Delta U$  в положительном столбе разряда между кольцевыми электродами, радиус пылевой структуры  $r_d$  и средняя концентрация пылевых частиц в структуре  $n_d$ . Средняя величина продольной напряженности электрического поля рассчитывалась из  $E_l = \Delta U/l$ , где  $l$  — расстояние между измерительными электродами. Более подробное описание экспериментальной установки приведено в [9, 21].

### Численная модель

Моделирование плазмы разряда постоянного тока с пылевыми частицами проведено на основе диффузионно-дрейфовой модели однородного положительного столба тлеющего разряда в неоне с пылевыми частицами [22, 23]. В рамках этой модели в неоне рассмотрено образование и гибель электронов, ионов и возбужденных состояний неона. Средняя энергия электронов, транспортные коэффициенты и константы скоростей реакций возбуждения и ионизации с участием электронов рассчитаны с помощью пакета BOLSIG+ [24]. Распределение пылевых частиц по радиусу  $n_d(r)$  было задано осесимметричным плоским профилем:

$$\begin{aligned} n_d(r) &= n_{d,0} \exp((r_d - r)/0,1R), \quad r > r_d; \\ n_d(r) &= n_{d,0}, \quad r \leq r_d. \end{aligned}$$

Заряд пылевых частиц рассчитан с учетом ион-атомных столкновений в приближении слабо столкновительной плазмы [25], потоки возбужденных атомов на пылевые частицы — в газокинетическом приближении. Используя этот подход, рассчитаны радиальные распределения компонент плазмы и радиальная составляющая электрического поля  $E_r$ . Расчеты проводились для полученных в эксперименте значений параметров разряда и пылевых структур. Радиальный профиль температуры газа  $T(r)$  в разрядной трубке рассчитан путем решения стационарного одномерного уравнения теплопроводности:

$$d/dr(r\lambda(dT(r)/dr)) = -Q(r)r,$$

с краевыми условиями, заданными: на оси разряда  $(d^2T/dr^2)_{r=0} = (dT/dr)_{r=0} = 0$  и на стенке разрядной трубки  $T(R) = 295$  К, где  $R$  — внутренний радиус разрядной трубки,  $\lambda$  — теплопроводность газа. Профиль тепловыделения  $Q(r)$  в разряде опреде-

ляется профилем концентрации электронов  $n_e(r)$  в виде:

$$Q(r) = n_e(r)\mu eE_r^2,$$

где  $\mu$  — подвижность электронов, т. е. предполагалось, что вкладываемая в разряд мощность идет в нагрев газ.

Далее по тексту под тепловыделением мы понимаем вкладываемую в разряд мощность. Радиальное положение границы пылевой структуры определялось через баланс сил, действующих на пылевую частицу, которые вносят максимальный вклад в равновесие пылевых частиц. Результирующая сила  $F(r)$  определяется следующими слагаемыми:

$$F(r) = F_e(r) + F_{th}(r) + F_i(r),$$

где  $F_e(r)$  — сила электрического поля,  $F_{th}(r)$  — сила термофореза и  $F_i(r)$  — сила ионного увлечения. Сила радиального электрического поля  $F_e(r) = Z_d(r)eE_r(r)$ . Сила термофореза рассчитана в приближении свободномолекулярного режима и полной аккомодации в атомарном газе согласно [26] как

$$F_{th} = -(16/9)(a^2/\sigma_{tr})dT/dr,$$

где  $\sigma_{tr}$  — транспортное сечение,  $a$  — диаметр пылевой частицы. Сила ионного увлечения [1] записывается в виде  $F_i = -m_d v_{di} u$ , где  $m_d$  — масса пылевой частицы,  $u$  — скорость потока ионов,  $v_{di}$  — частота столкновений ионов с пылевыми частицами, взятая из работы [27]. Положение пылевой частицы в радиальном направлении определяется ее потенциальной энергией  $\Phi(r)$ .

Поскольку все рассматриваемые радиальные силы пропорциональны соответствующим градиентам, то полная потенциальная энергия пылевой частицы может быть записана в следующем виде [12]:

$$\Phi(r) = -\int_{0,r} [F_e(r) + F_{th}(r) + F_i(r)] dr.$$

### Полученные результаты и обсуждение

Тепловыделение в разряде растет с увеличением тока разряда и давления неона вследствие растущего характера продольной напряженности электрического поля [22]. Тепловыделение в плазме с пылевыми частицами зависит от их концентрации в пылевой структуре [20], что связано, в первую очередь, с гибелью заряженных частиц (электронов и ионов) плазмы на пылевых частицах. Возрастающие потери электронов в пылевой плазме вызывают рост напряженности продольного электрического поля разряда для увеличения ионизации и компенсации потерь. Рост напряженности продольного электрического поля в разряде с пылевыми частицами наблюдался нами экспе-

риментально в неоне [22] и в воздухе [9, 21]. Увеличение напряженности продольного электрического поля вызывает увеличение тепловыделения в разряде. Если пылевые заполняют не весь объем разряда, а только часть его, то в области разряда с пылевыми частицами изменяются радиальные профили температуры газа, концентраций ионов и электронов, а также радиального электрического поля по сравнению с разрядом без пылевых частиц, что вызывает изменение в радиальном балансе сил, действующих на пылевые частицы.

В наших экспериментах обнаружено, что форма наблюдаемых пылевых структур и их пространственное расположение зависят от тока разряда и давления неона. С ростом тока разряда уменьшается длина и увеличивается диаметр пылевой структуры. При этом часть пылевых частиц смещается к наружной границе структуры, а внутри пылевой структуры образуется область с меньшим числом частиц или без частиц. При росте тока при определенном его значении происходит трансформация однородных по сечению пылевых структур к структурам с внутренней полостью, свободной от пылевых частиц, аналогично тому, как ранее наблюдалось в воздухе [12].

Трансформация пылевых структур в неоне, наблюдаемая с ростом тока разряда при давлении неона  $P = 1,1$  Торр, показана на рис. 1. Здесь поперечный размер изображения соответствует диаметру разрядной трубки. При токе 2,13 мА виден переход к структурам с внутренней полостью, свободной от пылевых частиц. Обнаружено, что значение тока разряда, при котором происходит переход к полым структурам, уменьшается при увеличении давления неона (см. рис. 2), что связано с увеличением напряженности продольного электрического поля.

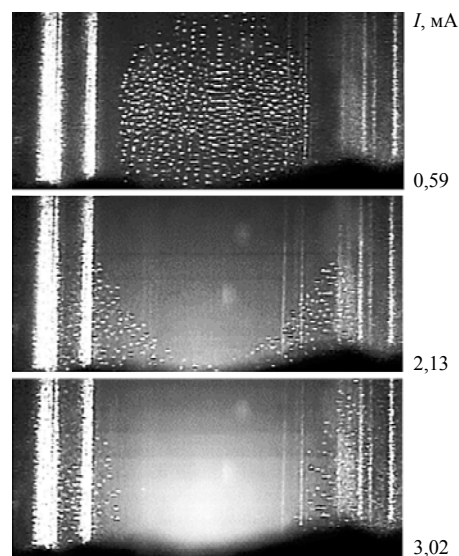


Рис. 1. Трансформация пылевых структур при изменении тока разряда (аксиальное сечение разряда) при давлении  $P = 1,1$  Торр

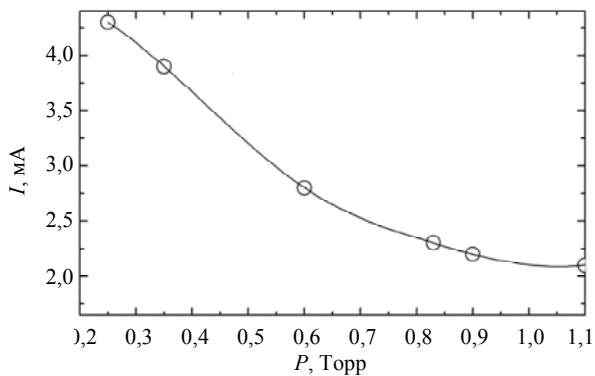


Рис. 2. Граница трансформации пылевых структур. Ниже границы структуры однородны, выше — с внутренней полостью

Следует отметить, что в верхней части пылевой структуры (рис. 1) смещение пылевых частиц к наружной границе пылевой структуры наступает раньше и неравномерно по длине пылевой структуры с ростом величины тока разряда. Такое поведение в распределении пылевых частиц можно объяснить, во-первых, неравномерным тепловыделением в пылевой структуре в аксиальном направлении, что, по-видимому, связано с неравномерным продольным распределением напряженности электрического поля в стратах разряда, в которых формируется пылевая структура, и, во-вторых, тем, что граница самой страты не является плоской, вследствие чего появляется дополнительная сила, удерживающая частицы в радиальном направлении. Известно, что для создания радиальной электрической силы для удержания пылевых частиц в приэлектродной области ВЧ-разряда на электрод помещают дополнительное кольцо, которое изменяет профиль электрического поля [28]. При уменьшении давления неона продольная неравномерность в образовании осевой зоны, свободной от пылевых частиц, исчезает из-за уменьшения роли тепловыделения при уменьшении давления газа, так как уменьшается абсолютная величина напряженности продольного электрического поля.

При повышенном давлении неона (~1 Торр) при наличии пылевых частиц приращение температуры газа на оси разрядной трубки относительно температуры стенки разрядной трубки увеличивается на 50 %, что, как показали результаты моделирования, существенно изменяют баланс сил на границе пылевой структуры. Изменение распределения температуры вызывает изменение ее градиента в 1,2 раза внутри пылевой структуры и в 1,6 раза — снаружи. Это указывает на то, что под действием термофоретической силы пылевые частицы с наружной границы пылевой структуры сносятся в радиальном направлении к стенке разрядной трубки.

С увеличением тока разряда распределение потенциальной энергии пылевых частиц в разряде меняется. Пылевые частицы занимают пространственное положение, соответствующее минимуму их потенциальной энергии. Значение тока, при котором происходит трансформация пылевых структур к полым структурам, соответствует переходу через ноль потенциальной энергии пылевых частиц. При давлении порядка несколько десятых Торр, а также при фиксированных значениях тока и концентрации пылевых частиц, наблюдаемых в эксперименте, величина минимальной потенциальной энергии значительно меньше, чем при давлении около 1 Торр. При повышении давления тепловыделение в разряде возрастает, поэтому влияние тока отчетливо видно на радиальном профиле потенциальной энергии частиц (рис. 3). В этом случае вклад силы термофореза в радиальное равновесие значительно превышает вклад силы ионного увлечения. Кривая потенциальной энергии смещается к стенке разрядной трубки с ростом тока разряда, т. е. диаметр пылевой структуры растет.

Результаты расчета потенциальной энергии пылевых частиц (рис. 3) хорошо согласуются с данными, полученными в эксперименте (рис. 1).

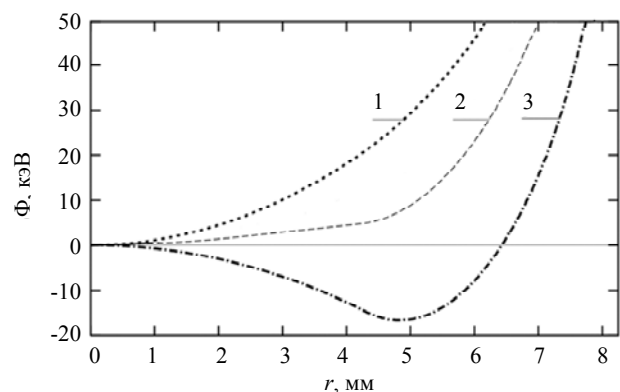


Рис. 3. Радиальное распределение потенциальной энергии пылевых частиц при давлении  $P = 1,1$  Торр для разных токов разряда, мА: 0,6 (кривая 1), 2,1 (кривая 2), 3,0 (кривая 3)

### Заключение

Экспериментально получено, что форма и пространственное положение пылевых частиц зависят от тока разряда и давления неона. С ростом тока разряда происходит увеличение радиального размера пылевых структур и трансформация однородных по сечению структур к структурам с внутренней полостью, свободной от пылевых частиц. Значение тока разряда, при котором происходит переход к структурам с внутренней полостью, уменьшается при увеличении давления неона. Обнаружена продольная неравномерность при обра-

зовании осевой зоны, свободной от пылевых частиц, при увеличении тока разряда. Эта неравномерность уменьшается при уменьшении давления неона.

Проведен численный расчет плазмы разряда постоянного тока с пылевыми частицами на основе диффузионно-дрейфовой модели однородного положительного столба тлеющего разряда в неоне с пылевыми частицами с учетом тепловыделения в разряде. Обнаружено, что пылевые частицы под действием термофоретической силы сдвигаются в радиальном направлении от наружной границы пылевой структуры к стенке разрядной трубки. При изменении тока разряда радиальное распределение потенциальной энергии пылевых частиц в разряде меняется. Ток разряда определяет величину минимума потенциальной энергии пылевых частиц и его радиальное положение. Кривая потенциальной энергии и координата ее минимума смещаются от оси разряда в радиальном направлении при увеличении тока разряда. Результаты численного расчета качественно согласуются с данными, полученными в эксперименте.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Fortov V. E., Ivlev A. V., Khrapak S. A., et al. // Phys. Rep. 2005. V. 421. P. 1.  
 2. Shukla P. K., Eliasson B. // Reviews of Modern Physics. 2009. V. 81. P. 25.  
 3. Kersten H., Thieme G., Frohlich M., et al. // Pure Appl. Chem. 2005. V. 77. No. 2. P. 415.  
 4. Vasilyak L. M., Vasiliev M. N., Vetchinin S. P., et al. // Tech. Phys. Lett. 2005. V. 31. No. 10. P. 827.  
 5. Иванов А. С., Паль А. Ф., Рябинкин А. Н., и др. // Российский химический журнал. 2013. Т. 57. № 3. С. 70.  
 6. Mikikian M., Couedel L., Cavarroc M., et al. // Eur. Phys. J. Appl. Phys. 2010. V. 49. P. 13106.

7. Boufendi L., Jouanny M. Ch., Kovacevic E., et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2011. V. 44. P. 174035.  
 8. Winter J., Berndt J., Hong S-H., et al. // Plasma Sources Sci. Technol. 2009. V. 18. P. 034010.  
 9. Polyakov D. N., Shumova V. V., and Vasilyak L. M. // Surf. Eng. Appl. Elect. 2013. V. 49. No. 2. P. 114.  
 10. Поляков Д. Н., Василяк Л. М., Шумова В. В. / Сборник статей IV научно-технической конференции «Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий». — Казань: Из-во Каз. гос. тех. ун-та. 2013. С. 63.  
 11. Polyakov D. N., Vasilyak L. M., and Shumova V. V. // Surf. Eng. Appl. Elect. 2015. V. 51. No. 2. P. 143.  
 12. Balabanov V. V., Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., et al. // J. Exp. Theor. Phys. 2001. V. 92. No. 1. P. 86.  
 13. Jellum G. M., Daugherty J. E., Graves D. B. // J. Appl. Phys. 1991. V. 69. No. 10. P. 6923.  
 14. Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Zimmukhov V. S., et al. // J. Exp. Theor. Phys+. 2003. V. 96. No. 3. P. 436.  
 15. Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Polyakov D. N., et al. // J. Exp. Theor. Phys+. 2005. V. 100. No. 5. P. 1029.  
 16. Arp O., Block D., Klindworth M., et al. // Phys. Plasmas. 2005. V. 12. P. 122102.  
 17. Molotkov V. I., Petrov O. F., Pustyl'nik M. Yu., et al. // High Temp. 2004. V. 42. No. 6. P. 827.  
 18. Land V., Smith B., Matthews L. // IEEE T. Plasma Sci. 2010. V. 38. No. 4. P. 768.  
 19. Schmidt C., Arp O., and Piel A. // Phys. Plasmas. 2011. V. 18. P. 013704.  
 20. Polyakov D. N., Shumova V. V., Vasilyak L. M. // Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures. 2014. V. 9. No. 3. P. 1249.  
 21. Polyakov D. N., Shumova V. V., Vasilyak L. M., et al. // Phys. Lett. A. 2011. V. 375. P. 3300.  
 22. Vasilyak L. M., Polyakov D. N., Shumova V. V. // Contrib. Plasma Phys. 2013. V. 53. No. 4–5. P. 432.  
 23. Shumova V. V., Polyakov D. N., Vasilyak L. M. // Plasma Sources Sci. Technol. 2014. V. 23. P. 065008.  
 24. Hagelaar G. J. M., Pitchford L. C. // Plasma Sources Sci. Tech. 2005. V. 14. P. 722.  
 25. D'yachkov L. G., Khrapak A. G., Khrapak S. A., et al. // Phys. Plasmas. 2007. V. 14. P. 042102.  
 26. Talbot L. et al. // J. Fluid. Mech. 1980. V. 101. P. 737.  
 27. Khrapak S. A., Ivlev A. V., Morfill G. E., et al. // Phys. Rev. E. 2002. V. 66. No. 4. P. 046414.  
 28. Piel A. // Plasma and Fusion Research. 2009. V. 4. P. 013.

**Transformation of dust structures in a dc discharge in neon**

*V. V. Shumova, D. N. Polyakov, and L. M. Vasilyak*

Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences  
 Bd. 2, 13 Izhorskaya str., Moscow, 125412, Russia  
 E-mail: shumova@ihed.ras.ru

*Received June 23, 2015*

*The dependence of the form of dust structures on the current of glow discharge in neon is experimentally investigated. Under the increasing current the uniform in radial cross-section dust structures were transformed into the structures with the in cavity inside, which was free from dust particles. The potential energy of dust particles is calculated using the diffusion-drift model of the positive column in neon with the account of temperature gradient. The role of heat release in the*

*process of changing the form of dust structures is determined. The results may be used for plasma technologies with dusty plasmas.*

PACS: 52.27.Lw; 52.50.Nr.

*Keywords:* dusty plasma, dust structure, void, glow discharge, neon, thermophoresis, potential energy of particle.

#### REFERENCES

1. V. E. Fortov, A. V. Ivlev, S. A. Khrapak, et al., *Phys. Rep.* **421**, 1 (2005).
2. P. K. Shukla and B. Eliasson, *Reviews of Modern Physics* **81**, 25 (2009).
3. H. Kersten, G. Thieme, M. Frohlich, et al., / *Pure Appl. Chem.* **77**, 415 (2005).
4. L. M. Vasilyak, M. N. Vasiliev, S. P. Vetchinin, et al., *Tech. Phys. Lett.* **31**, 827 (2005).
5. A. S. Ivanov, A. F. Pal', A. N. Ryabinkin, et al., *Russ. Khimich. Zhurn.* **57** (3), 70 (2013).
6. M. Mikikian, L. Couedel, M. Cavarroc, et al., *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* **49**, 13106 (2010).
7. L. Boufendi, M. Ch. Jouanny, E. Kovacevic, et al., *J. Phys. D: Appl. Phys.* **44**, 174035 (2011).
8. J. Winter, J. Berndt, S-H. Hong, et al., *Plasma Sources Sci. Technol.* **18**, 034010 (2009).
9. D. N. Polyakov, V. V. Shumova, and L. M. Vasilyak, *Surf. Eng. Appl. Elect.* **49**, 114 (2013).
10. D. N. Polyakov, L. M. Vasilyak, and V. V. Shumova, in *Proc. IV Conf. "Low-Temperature Plasma in Processes of Functional Plating"* (Kazan University, 2013). P. 63.
11. D. N. Polyakov, L. M. Vasilyak, and V. V. Shumova / *Surf. Eng. Appl. Elect.* **51**, 143 (2015).
12. V. V. Balabanov, L. M. Vasilyak, S. P. Vetchinin, et al., *J. Exp. Theor. Phys.* **92**, 86 (2001).
13. G. M. Jellum, J. E. Daugherty, and D. B. Graves, *J. Appl. Phys.* **69**, 6923 (1991).
14. L. M. Vasilyak, S. P. Vetchinin, V. S. Zimnukhov, et al., *J. Exp. Theor. Phys.* **96**, 436 (2003).
15. L. M. Vasilyak, S. P. Vetchinin, D. N. Polyakov, et al., *J. Exp. Theor. Phys.* **100**, 1029 (2005).
16. O. Arp, D. Block, M. Klindworth, et al., *Phys. Plasmas* **12**, 122102 (2005).
17. V. I. Molotkov, O. F. Petrov, M. Yu. Pustyl'nik, et al., *High Temp.* **42**, 827 (2004).
18. V. Land, B. Smith, and L. Matthews, *IEEE T. Plasma Sci.* **38**, 768 (2010).
19. C. Schmidt, O. Arp, and A. Piel, *Phys. Plasmas* **18**, 013704 (2011).
20. D. N. Polyakov, V. V. Shumova, L. M. Vasilyak, *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures* **9**, 1249 (2014).
21. D. N. Polyakov, V. V. Shumova, L. M. Vasilyak, et al., *Phys. Lett. A.* **375**, 3300 (2011).
22. L. M. Vasilyak, D. N. Polyakov, and V. V. Shumova, *Contrib. Plasma Phys.* **53**, 432 (2013).
23. V. V. Shumova, D. N. Polyakov, and L. M. Vasilyak, *Plasma Sources Sci. Technol.* **23**, 065008 (2014).
24. G. J. M. Hagelaar and L. C. Pitchford, *Plasma Sources Sci. Tech.* **14**, 722 (2005).
25. L. G. D'yachkov, A. G. Khrapak, S. A. Khrapak, et al., *Phys. Plasmas* **14**, 042102 (2007).
26. L. Talbot et al., *J. Fluid. Mech.* **101**, 737 (1980).
27. S. A. Khrapak, A. V. Ivlev, G. E. Morfill, et al., *Phys. Rev. E.* **66**, 046414 (2002).
28. A. Piel, *Plasma and Fusion Research.* **4**, 013 (2019).