

УДК 537.525  
EDN: BFRHPG

PACS: 52.27.Lw; 37.10.Ty.

**Накопление ионов в плазменной электростатической ловушке  
внутри облака заряженных микрочастиц в электрическом разряде**© Д. Н. Поляков<sup>1,\*</sup>, В. В. Шумова<sup>1,2</sup>, Л. М. Василяк<sup>1</sup><sup>1</sup> Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Москва, 125412 Россия

\* E-mail: cryolab@ihed.ras.ru

<sup>2</sup> Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова  
Российской академии наук, Москва, 119991 РоссияСтатья поступила в редакцию 9.04.2025; после доработки 30.04.2025; принята к публикации 11.08.2025  
Шифр научной специальности: 1.3.9

*Рассмотрен новый тип плазменной ловушки с электростатическим способом удержания положительно заряженных ионов внутри облака отрицательно заряженных микрочастиц в плазме положительного столба тлеющего разряда (комплексной плазме). Такая ловушка может представлять интерес для плазменных технологий при низких и криогенных температурах, так как характеризуется высокой концентрацией удерживаемых ионов и выделяет меньше тепла, чем плазма без микрочастиц. На основе данных эксперимента проведён расчёт параметров комплексной плазмы с использованием жидкостной модели и выполнена оценка эффективности накопления ионов в плазменной ловушке. Получено, что интенсивность накопления ионов в облаке микрочастиц может превышать или быть ниже интенсивности их образования в плазме свободного от микрочастиц разряда. В первом случае комплексная плазма находится в режиме эффективного удержания ионов, где ловушка является концентратором ионов, а во втором – в режиме неэффективного. Основываясь на значениях коэффициента относительного перегрева, показано, что комплексная плазма электрического разряда представляет собой более эффективный инструмент для создания необходимой концентраций холодных ионов, чем плазма без микрочастиц.*

*Ключевые слова:* комплексная плазма; разряд постоянного тока; облако заряженных микрочастиц; эффективность ионной ловушки.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-4-37-44

**Введение**

При решении различных физических задач, связанных с удержанием необходимой концентрации ионов в заданной области пространства, применяются электродинамические ловушки Пеннинга [1] и Пауля [2]. Заряженные частицы, заключенные в электродинамические ловушки, образуют сильно связанные кулоновские системы [3]. Для уменьшения

кинетической энергии ионов применяется охлаждение ионов до предельно низких температур [4], что позволяет изучать их потенциалы взаимодействия, процессы переноса, термализацию и коллективные явления. В этом случае, ловушки Пауля и Пеннинга позволяют удерживать и изучать как отдельные замороженные ионные атомы [5], так и ионные облака в виде атомно-ионных кулоновских кластеров и кристаллов [6, 7].

В плазмохимии исследователи стремятся получить управление химическими реакциями, что реализуется путём охлаждения области их протекания [8]. Помимо этого, реакции, протекающие при низких и ультранизких температурах [9], позволяют получать при плазменно-химическом синтезе состояния новой фазы, которые невозможно получить в других условиях [10]. Этим определяется интерес исследователей к поиску приложений, связанных с получением плазменных химически активных сред при криогенных температурах [11]. Отметим, что применение электродинамических ловушек в области прикладной плазмохимии малоэффективно ввиду малого числа удерживаемых в них ионов  $N_i \sim 10^4$  и ограничений по их концентрации  $n_i < 10^8 \text{ см}^{-3}$  [3, 12], а также сложности изготовления и высокой стоимости таких ловушек. Для прикладной плазмохимии представляет интерес получение ионов с высокой концентрацией в большом реакционном объёме. Для увеличения концентрации положительных ионов необходимо нейтрализующий фон из электронов, что реализуется в низкотемпературной газоразрядной плазме. Так, простейшим источником с высокой концентрацией ионов в большом объёме плазмы ( $\sim 1000 \text{ см}^3$ ) может служить, например, тлеющий разряд постоянного тока в неоне, где в положительном столбе разряда могут быть получены  $n_i \approx 10^{11} \text{ см}^{-3}$  [13]. Однако этот способ наработки ионов из-за большого тепловыделения малоприменим для применения в условиях криогенного охлаждения [14]. Наиболее перспективный способ удержания и генерации ионов, лишённый большей части рассмотренных недостатков, реализуется в пылевой (комплексной) плазме (КП) [15]. В КП электрических разрядов в газах можно создать ловушки в виде облаков из заряженных микрочастиц в плазме, работающие на принципах сильного электростатического взаимодействия, в которых могут накапливаться и локализоваться ионы [16, 17]. Такие облака могут формировать Кулоновские кристаллы и кластеры [15] подобно ионам в охлаждаемых ловушках Пауля [6, 7]. КП в электрическом разряде можно получить в большом объёме. Такая КП была получена в тлеющем разряде в аргоне в трубке радиусом 40 см и длиной 80 см [18]. В настоящее время также исследуется КП газового

разряда в условиях криогенных температур, которая способна накапливать и поддерживать холодные ионы с заданной концентрацией [10, 19, 20].

В данной работе численными методами исследовалось накопление положительных ионов в электростатической ловушке, образованной облаком заряженных микрочастиц и плазмой электрического разряда постоянного тока в неоне, и анализировалась эффективность этой ловушки.

### Модель расчёта параметров комплексной плазмы

Расчёт параметров КП проводился с использованием диффузионно-дрейфовой модели положительного столба тлеющего разряда в неоне с микрочастицами [14, 16, 17]. Модель удовлетворяла условиям эксперимента, где длины свободного пробега ионов и электронов были много меньше радиуса разряда. Эксперименты были проведены в вертикально расположенной стеклянной трубке длиной  $L = 40 \text{ см}$  с внутренним радиусом  $R = 0,825 \text{ см}$  в протяжённом разряде постоянного тока ( $R \ll L$ ). Расчёты были выполнены для характерных средних параметров облаков, образованных микрочастицами диаметром 2,55 мкм, при значениях тока и давления неона, соответствующих эксперименту.

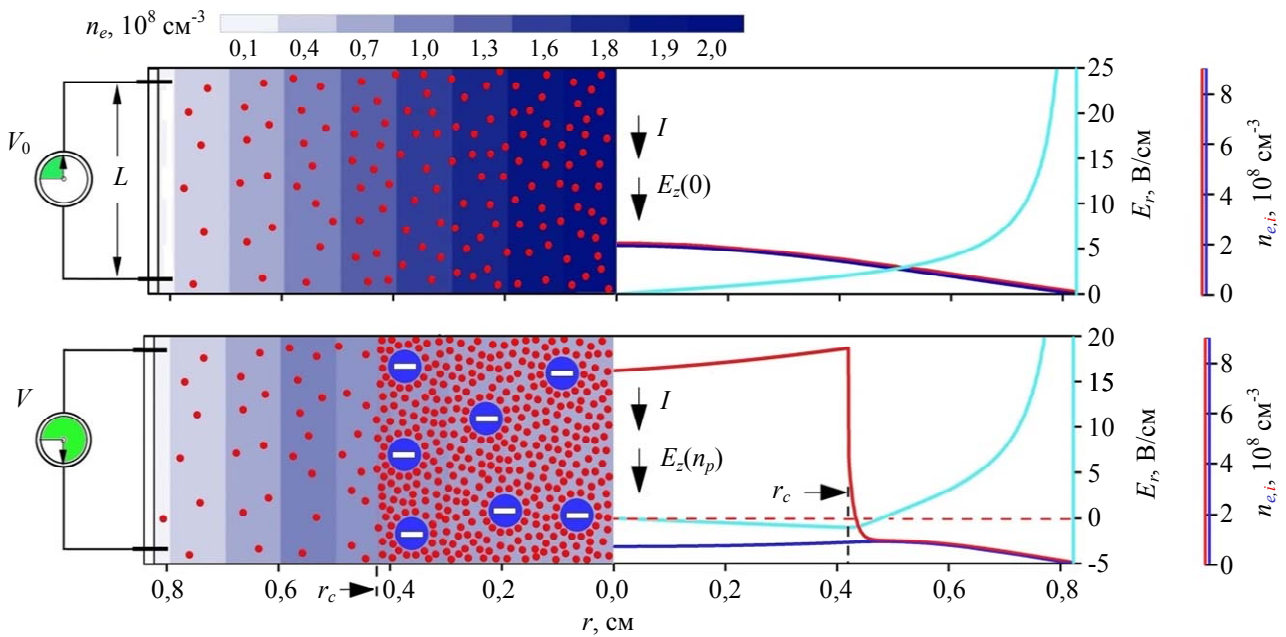
В рассматриваемой модели КП в уравнениях материального баланса учтены процессы рождения и гибели электронов, ионов и метастабильных атомов неона с энергией 16,6 эВ, в объёме плазмы и на поверхности микрочастиц. Перечень столкновительных процессов, учтённых в модели, приведён в [14]. Дрейф и диффузия электронов, ионов и метастабильных атомов рассматривались в аксиальном (продольном) электрическом поле  $E_z$  и в самосогласованном радиальном электрическом поле  $E_r$ . Средняя энергия электронов, транспортные коэффициенты и константы скоростей реакций возбуждения и ионизации с участием электронов рассчитаны с помощью программного пакета BOLSIG+ [21] с базой данных SIGLO [22]. Заряд микрочастиц определён с учётом ион-атомных взаимодействий в приближении слабостолкновительной плазмы [23]. Поток возбуждённых

атомов на микрочастицы рассчитан в газокинетическом приближении, а тушение – в приближении полной аккомодации энергии. Предполагалось, что эмиссия электронов и фотоэлектронов с поверхности пылевых частиц отсутствует, распределение микрочастиц внутри облака однородное, а на границе облака экспоненциально спадает. Принималось, что полный ток  $I$  через поперечное сечение разряда сохранялся в разряде при изменении концентрации микрочастиц  $n_p$ , поскольку экспериментальные исследования проводились в условиях неизменности величины тока.

### Результаты и обсуждение

На рис. 1 схематично показана область плазмы, для которой выполнялся расчёт; левая часть рисунка иллюстрирует состав плазмы со схемой измерения падения напряжения применяемой в эксперименте, а в правой части рисунка показаны радиальные распределения электрического поля, концентраций ионов и электронов. Верхний фрагмент соответствует плазме без микрочастиц, а нижний плазме с облаком микрочастиц с  $n_p = 4 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$ . В плазме без микрочастиц (свободном разряде) основные потери плазмы определяются гибелью электронов (синий фон левой части рисунка) и ионов (там же красные точки) на стенке разрядного устройства, которые возникают в результате их радиальной диффузии и дрейфа. Дрейф заряженных частиц происходит в радиальном электрическом поле  $E_r$ . Без микрочастиц профили электронов  $n_e(r, 0)$  и ионов  $n_i(r, 0)$  близки к распределению Бесселя  $J_0(2,4r/R)$ . Максимум ионизации расположен на оси разряда. Ионизационный баланс обеспечивает компенсацию радиальных потерь и сохранение  $I$  в продольном поле  $E_z(0)$ . Вольтметр в разряде без частиц показывает значение потенциала  $V_0 = E_z(0)l$ . При поступлении микрочастиц в плазму на оси разряда происходит их самоорганизация в облако, ограниченное радиусом  $r_c$  (рис. 1, нижний фрагмент). При этом наблюдается отличная от чистого разряда картина потерь и ионизационных процессов. К потерям заряженных частиц

плазмы на стенке разрядной трубки добавляются потери на микрочастицах. Более высокая подвижность электронов относительно ионов, приводит к образованию более интенсивных электронных потоков на микрочастицы, что определяет их отрицательный заряд  $q$ . Микрочастицы могут приобретать значительный заряд  $q \sim 10^4 e^-$ . Уравнение электронейтральности для КП примет вид  $n_i = n_p q / e^- + n_e$ . Концентрация положительных ионов  $n_i(r, n_p)$  в области облака микрочастиц растёт, нейтрализуя большой  $q$ , и может значительно превышать концентрацию ионов в разряде без микрочастиц  $n_i(r, 0)$ . Компенсация дополнительных потерь плазмы на микрочастицах и сохранение тока  $I$  реализуется путём увеличения частоты ионизации, которая происходит в результате увеличения температуры электронов при увеличении продольного электрического поля  $E_z$ . В этом случае, в эксперименте наблюдалось образование облака микрочастиц в плазме разряда, которое сопровождалось увеличением потенциала  $V$  на участке плазмы, где образуется облако из микрочастиц с радиусом  $r_c$ . Отметим, что увеличение температуры электронов получено экспериментально при изучении влияния пылевых частиц на интенсивность спектральных линий плазмы [24]. Поле  $E_z$  в плазме с облаком зависит от  $n_p$ , так как микрочастицы могут представлять собой существенный источник потерь плазмы [25]. Вольтметр в разряде с облаком с концентрацией микрочастиц  $n_p$  показывает увеличение значение потенциала  $V = E_z(n_p)l$ . Сдвиг положения максимума концентрации электронов на рис. 1 показывает, что максимум ионизации смещается от оси разряда за границу облака. Изменения поля  $E_z(n_p)$  в тлеющем разряде постоянного тока, вызванные различной концентрацией  $n_p$ , получены в экспериментах и в численных расчётах для различных газов: воздуха [26–28], неона [25, 29], аргона [30] и гелия [31]. Из представленных на рис. 1 распределений  $n_i$  видно, что облако заряженных микрочастиц с плазмой является своего рода ловушкой для положительных ионов, которая концентрирует ионы вокруг микрочастиц внутри облака.

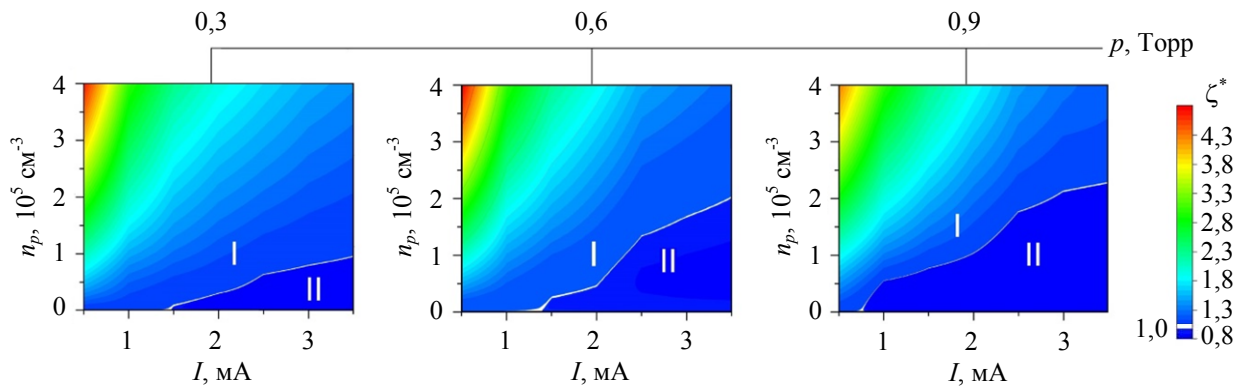


**Рис. 1.** Схема аксиального сечения участка разрядной трубки с плазмой в месте измерения напряжения  $V$ . В левой части сечения показан состав плазмы: красные точки – положительно заряженные ионы, голубая заливка – электроны, синие круги – отрицательно заряженные пылевые частицы. В правой части сечения показаны профили концентраций ионов  $n_i$  (красные линии), электронов  $n_e$  (синие линии) и радиального электрического поля  $E_r$  (голубые линии) для  $I = 0,5 \text{ мА}$  и  $p = 0,6 \text{ Торр}$ . Верхний фрагмент – разряд без микрочастиц, нижний фрагмент – разряд с микрочастицами с  $n_p = 4 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$  в облаке с радиусом  $r_c$

Картина процесса захвата ионов отрицательно заряженной сферой и их распределений была получена в результате PIC моделирования [32], которое показало, что захваченные ионы группируются в плотные сгустки окружающие сферу, дополнительно экранируя её, при этом значительно компенсируют дефицит положительного заряда плазмы в условиях большой величины электрического поля вблизи сферы. Эффективность ионной ловушки можно описать рядом показателей, определяющих эффективности накопления ионов для облака и отдельной микрочастицы, и показателей, отражающих эффективность энергетических затрат [16]. Существуют режимы разряда с одинаковыми параметрами, когда концентрации ионов в области плазмы, ограниченной радиусом облака, в разряде с микрочастицами –  $n_i(r_c, n_p)$  лежат либо выше, либо ниже концентраций  $n_i(r_c, 0)$  для разряда без микрочастиц. Если  $n_i(r_c, n_p) > n_i(r_c, 0)$ , то облако с плазмой является ловушкой для ионов. Эффективность накопления ионов ловушкой определяется из соотношения  $\zeta = n_i(r_c, n_p)/n_i(r_c, 0)$  [16, 17]. В случае, когда имеются данные о количестве ионов в реакционном объёме

плазмы, эффективность накопления ионов облаком может быть определена через погонное число ионов  $\zeta^* = N_i(r_c, n_p)/N_i(r_c, 0)$ . Где  $N_i(r_c, n_p) = 2\pi \int_0^{r_c} r n_i(r, n_p) dr$  и  $N_i(r_c, 0) = 2\pi \int_0^{r_c} r n_i(r, 0) dr$  – погонное количество ионов в облаке и погонное количество ионов в разряде без микрочастиц в области ограниченной радиусом облака, соответственно [16, 33].

На рис. 2 показана эффективность накопления ионов облаком  $\zeta^*$  в зависимости от концентрации микрочастиц и тока разряда при разных давлениях неона. Если комплексная система находится в состоянии с  $\zeta^* > 1$ , то ловушка является концентратором ионов и находится в состоянии эффективного накопления ионов область I на рис. 2). Максимальные значения эффективности накопления ионов облаком ( $\zeta_{\text{max}}^* = 4,73$  при  $p = 0,6 \text{ Торр}$ ,  $\zeta_{\text{max}}^* = 4,71$  при  $p = 0,3 \text{ Торр}$  и  $\zeta_{\text{max}}^* = 4,2$  при  $p = 0,9 \text{ Торр}$ ) соответствуют минимальным значениям  $I$  и максимальным значениям  $n_p$ . Неэффективному состоянию системы соответ-



**Рис. 2.** Эффективность накопления ионов облаком  $\zeta^*$  в зависимости от концентрации микрочастиц  $n_p$  и тока разряда  $I$  при разных давлениях неона  $p$

стует область II с  $\zeta^* \leq 1$ . Граница перехода между областями ( $\zeta^* = 1$ ) проведена белой линией. Из рис. 2 можно заключить, что область значений с  $\zeta^* \leq 1$  расширяется с ростом  $p$  при изменении  $I$  к большим и меньшим его значениям при увеличении  $n_p$ .

Можно постулировать, что КП представляет собой более эффективный инструмент для создания необходимой концентрации ионов, чем плазма свободного разряда. В свободном разряде в нормальном режиме  $n_i \propto I$ ,  $E_z$  слабо меняется при изменении тока, или не зависит от тока. Энергетическая цена рождения одного иона пропорциональна погонной электрической мощности разряда  $P_i \propto IE_z$  [16]. Нарботка дополнительных ионов в процессе увеличения частоты ионизации приводит к пропорциональному увеличению потерь за счет амбиполярной диффузии к границе разряда. В КП увеличение концентрации ионов достигается в условиях снижения амбиполярных потерь плазмы, когда дополнительно увеличение концентрации ионов происходит за счет перераспределения ионов в область облака микрочастиц от периферии разряда к его центру. Помимо этого, свободный разряд обладает рядом недостатков, по сравнению с разрядом с микрочастицами, а увеличение тока  $I$  приводит к:

- увеличению тепловыделения на электродах и дополнительной эрозии электродов;
- увеличению приэлектродных падений потенциала и тепловыделения в приэлектродной плазме;
- дополнительному нагреву плазмы разряда и развитию тепловой неустойчивости разряда, приводящей к его контракции;

– необходимости увеличивать поверхность катода для обеспечения необходимой эмиссии электронов при сохранении нормальной плотности тока.

Энергетическое преимущество в разряде с микрочастицами относительно свободного разряда связано с дополнительным Джоулевым нагревом плазмы. В КП по сравнению с плазмой без микрочастиц, при наработке одинаковой концентрации ионов может выделяться меньше тепла в определенном диапазоне значений  $I$ , при одинаковых  $p$ . Такие режимы обнаружены при  $I < 2,7$  мА [14]. Энергетическое преимущество в этих режимах определяется путём определения коэффициента относительного перегрева  $\eta_Q$ . Этот коэффициент в работе [14] вычислялся как отношение дополнительной погонной мощности, расходуемой в плазме свободного разряда при наработке одинаковой концентрации ионов, к аналогичной величине в разряде с микрочастицами  $\eta_Q = Q(n_p = 0)/Q(n_p)$ . В свободном разряде приращение концентрации ионов может быть достигнуто путём увеличения тока на величину  $\Delta I$  при  $E_z \approx \text{const}$ , в то время как, в разряде с микрочастицами это приращение связано с приращением электрического поля  $\Delta E_z$  при  $I = \text{const}$ , тогда  $\eta_Q \approx \Delta IE_z / \Delta E_z I$ . Знание коэффициента  $\eta_Q$  весьма полезно, в первую очередь, для технологий и процессов в плазме, протекающих при низких и криогенных температурах, когда выделение тепла нежелательно [10, 11, 19, 20, 33, 34].

На рис. 3 показано изменение  $\eta_Q$  при изменении давления для разных токов разряда. С увеличением тока  $\eta_Q$  уменьшается при всех давлениях, при этом тепловой выигрыш для

комплексной плазмы пропадает быстрее для более высоких давлений. Тепловой выигрыш полностью исчезает в точке (8) на рис. 4 при  $I = 2,7$  мА и  $p = 0,3$  Торр, тогда в комплексной плазме и свободном разряде выделяется одинаковое количество тепла. Максимум распределений  $\eta_Q$  наблюдается при  $p \approx 0,5$  Торр для тока 0,5 мА (1). При этом давлении получен значительный тепловой выигрыш для комплексной плазмы  $\eta_Q \approx 13$ . При увеличении тока данный максимум смещается в область более низких давлений и соответствует  $p = 0,3$  Торр при  $I = 0,75$  мА (3).

Необходимо отметить, что комплексная плазма обладает дополнительным преимуществом относительно плазмы свободного разряда, которое состоит в возможности управления облаком микрочастиц [17, 35], что позволяет менять пространственное расположение облака в разряде и, соответственно, создаёт условия для получения нужной концентрации ионов в оптимальной зоне реакции.

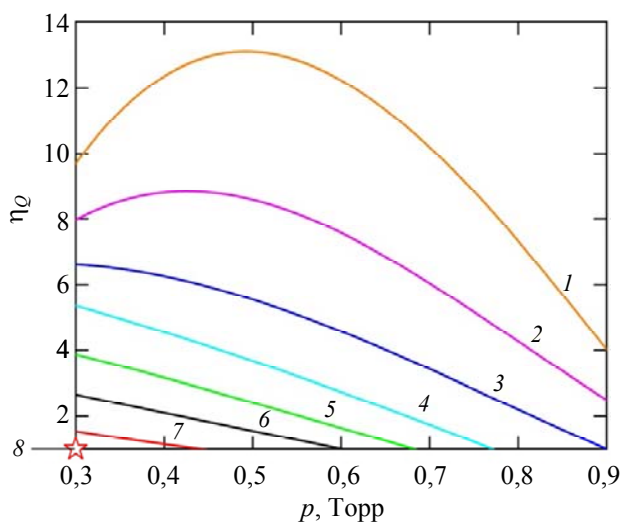


Рис. 3. Коэффициента относительного перегрева  $\eta_Q$  в зависимости от давления неона  $p$ , при разных токах разряда  $I$ : 1 – 0,5 мА, 2 – 0,6 мА, 3 – 0,75 мА, 4 – 1 мА, 5 – 1,5 мА, 6 – 2 мА, 7 – 2,5 мА, 8 – 2,7 мА

### Заключение

Комплексная плазма, образованная рядом постоянного тока низкого давления с микрочастицами, в определённом диапазоне параметров разряда является электростатической плазменной ловушкой, которая способна накапливать и локализовать ионы внутри облака из заряженных микрочастиц. Существуют режимы КП, при которых концентрации

ионов в облаке меньше концентраций ионов, полученных, при тех же условиях в свободном разряде в одинаковой области плазмы. Предложен показатель эффективности накопления ионов в облаке микрочастиц  $\zeta^*$ , определяемый через погонное число ионов в облаке. Определены значения  $\zeta^*$  в зависимости от концентрации микрочастиц ( $n_p = 0-4 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$ ) и тока разряда ( $I = 0,5-3,5$  мА) при давлениях неона 0,3, 0,6 и 0,9 Торр. Показано, что максимальные значения  $\zeta^*$  реализуются при минимальных токах и максимальных концентрациях микрочастиц. Получены области параметров комплексной плазмы с  $\zeta^* > 1$ , когда ионная ловушка является концентратором ионов и находится в состоянии эффективного накопления ионов. Обнаружены неэффективные состояния плазменной системы с  $\zeta^* \leq 1$ . Получено, что область значений  $\zeta^* \leq 1$  на  $n_p - I$  диаграммах расширяется с ростом давления при изменении тока в направлении большего и меньшего его значений и при увеличении концентрации микрочастиц. Получено, что с уменьшением тока, тепловой выигрыш для комплексной плазмы определяемый значением коэффициента относительного перегрева  $\eta_Q$ , увеличивается при увеличении давления. Максимальное значение  $\eta_Q \approx 13$  принимает при  $p \approx 0,5$  Торр и  $I = 0,5$  мА. Показано, что комплексная плазма представляет собой более эффективный инструмент для создания необходимой концентрации холодных ионов, чем плазма свободного разряда.

Работа выполнена при поддержке  
Министерства науки и высшего образования  
Российской Федерации (Государственное задание  
№ 075-00269-25-00).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dehmelt H. / Rev. Mod. Phys. 1990. Vol. 62. P. 525–530.
2. Paul W. / Rev. Mod. Phys. 1990. Vol. 62. P. 531–540.
3. Mihalcea B. M., Filinov V. S., Syrovatka R. A., Vasilyak L. M. / Phys. Rep. 2023. Vol. 1016. P. 1–103.
4. Balakrishnan N. / J. Chem. Phys. 2016. Vol. 145. P. 150901.
5. Langin T. K., Gorman G. M., Killian T. C. / Science. 2019. Vol. 363. P. 61.

6. *Wineland D. et al.* / Phys. Rev. Lett. 1987. Vol. 59. P. 2935–2938.
7. *Bollinger J. J. et al.* / J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 2003. Vol. 36. P. 499–510.
8. *Krems R. V.* / Phys. Chem. Chem. Phys. 2008. Vol. 10. P. 4079–4092.
9. *Goldanskii V. I.* / Ann. Rev. Phys. Chem. 1976. Vol. 27. P. 85–126.
10. *Polyakov D. N., Shumova V. V., Vasilyak L. M.* / Surf. Eng. Appl. Electrochem. 2015. Vol. 51. P. 143–151.
11. *Stauss S., Muneoka H., Terashima K.* / Plasma Sources Sci. Technol. 2018. Vol. 27. P. 023003.
12. *Vasilyak L. M. et al.* / New J. Phys. 2013. Vol. 15. P. 043047.
13. *Grigorian G. M., Dyatko N. A., Kochetov I. V.* / Phys. Plasmas. 2017. Vol. 24. P. 073503.
14. *Polyakov D. N., Shumova V. V., Vasilyak L. M.* / J. Appl. Phys. 2020. Vol. 128. P. 053301.
15. *Fortov V. E., Morfill G. E.* Complex and Dusty Plasmas: From Laboratory to Space. – Boca Raton.: CRC Press, 2009.
16. *Polyakov D. N., Shumova V. V., Vasilyak L. M.* / Plasma Sources Sci. Technol. 2022. Vol. 31. P. 074001.
17. *Polyakov D. N., Shumova V. V., Vasilyak L. M.* / Plasma Sources Sci. Technol. 2021. Vol. 30. P. 07LT01.
18. *Thomas E., Amatuucci W. E., Compton Ch., Christy B.* / Phys. Plasmas. 2002. Vol. 9. P. 3154–3158.
19. *Polyakov D. N., Shumova V. V., Vasilyak L. M.* / Russ. J. Phys. Chem. B. 2023. Vol. 17. № 4. P. 1241–1245.
20. *Шумова В. В., Поляков Д. Н., Васильяк Л. М.* / Химическая физика. 2025. Т. 44. № 4. С. 106–114.
21. <https://www.bolsig.laplace.univ-tlse.fr/>
22. <https://nl.lxcat.net>
23. *Khrapak S. A., Morfill G. E., Khrapak A. G., D'yachkov L. G.* / Phys. Plasmas. 2006. Vol. 13. P. 052114.
24. *Kostenko A. S., Ochkin V. N., Tskhai S. N.* / Tech. Phys. Lett. 2016. Vol. 42. № 7. P. 743–746.
25. *Polyakov D. N., Shumova V. V., Vasilyak L. M.* / Plasma Phys. Rep. 2017. Vol. 43. № 3. P. 397–404.
26. *Vasilyak L. M., Polyakov D. N., Fortov V. E., Shumova V. V.* / High Temp. 2011. Vol. 49. P. 623–628.
27. *Polyakov D. N., Shumova V. V., Vasilyak L. M.* / Surf. Eng. Appl. Electrochem. 2013. Vol. 49. P. 114–124.
28. *Ding Z., Chen Q., Liu C., Qian Z.* / Journal of Electrostatics. 2025. Vol. 135. P. 104048.
29. *Vasilyak L. M., Polyakov D. N., Shumova V. V.* / Contrib. Plasma Phys. 2013. Vol. 53. P. 432–435.
30. *Tian R. et al.* / J. Appl. Phys. 2018. Vol. 123. P. 083301.
31. *Fedoseev A. V., Salnikov M. V., Demin N. A. et al.* / Phys. Plasmas. 2018. Vol. 25. P. 083710.
32. *Kiselyov A. A., Dolgonosov M. S., Krasovsky V. L.* / Doklady Physics. 2014. Vol. 59. № 5. P. 209–213.
33. *Polyakov D. N., Shumova V. V., Vasilyak L. M.* / Russ. J. Phys. Chem. B. 2024. Vol. 18. № 4. P. 1128–1133.
34. *Shumova V. V., Polyakov D. N., Vasilyak L. M.* / J. Phys. D: Appl. Phys. 2017. Vol. 50. P. 405202.
35. *Polyakov D. N., Shumova V. V., Vasilyak L. M.* / Plasma Phys. Rep. 2024. Vol. 50. № 12. P. 1609–1613.

PACS: 52.27.Lw; 37.10.Ty.

## Accumulation of ions in an electrostatic plasma trap within a cloud of charged microparticles in an electric discharge

D. N. Polyakov<sup>1,\*</sup>, V. V. Shumova<sup>1,2</sup> and L. M. Vasilyak<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences, Moscow, 125412 Russia

\*E-mail: cryolab@ihed.ras.ru

<sup>2</sup>Semenov Federal Research Center for Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia

Received 9.04.2025; revised 30.04.2025; accepted 11.08.2025

*A novel plasma trap using an electrostatic method to trap positively charged ions within a cloud of negatively charged microparticles in the plasma of a positive column of a glow discharge (complex plasma) is considered. Such a trap may be of interest for plasma technologies at low and cryogenic temperatures, as it is characterised by a high concentration of trapped ions and generates less heat than plasma without microparticles. Calculation of the parameters of the complex plasma was carried out on the basis of experimental data by means of the liquid model. The efficiency of ion accumulation in the plasma trap within the microparticle cloud was evaluated. It is found that the intensity of the accumulation of ions in the cloud of microparticles can be higher or lower than the intensity of their birth in the plasma of a discharge free of microparticles. In the first case, the complex plasma is in the efficient ion retention regime, where the trap is an ion concentrator, and, in the inefficient retention regime in the second case. Based on the determination of the values of the relative superheat coefficient, it is*

***shown that complex plasma is a more effective tool for producing the required concentration of cold ions than the plasma without microparticles.***

**Keywords:** complex plasma; direct current discharge; charged microparticle cloud; ion trap efficiency.

## REFERENCES

1. Dehmelt H., Rev. Mod. Phys. **62**, 525–530 (1990).
2. Paul W., Rev. Mod. Phys. **62**, 531–540 (1990).
3. Mihalcea B. M., Filinov V. S., Syrovatka R. A. and Vasilyak L. M., Phys. Rep. **1016**, 1–103 (2023).
4. Balakrishnan N., J. Chem. Phys. **145**, 150901 (2016).
5. Langin T. K., Gorman G. M. and Killian T. C., Science **363**, 61 (2019).
6. Wineland D. et al., Phys. Rev. Lett. **59**, 2935–2938 (1987).
7. Bollinger J. J. et al., J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **36**, 499–510 (2003).
8. Krems R. V., Phys. Chem. Chem. Phys. **10**, 4079–4092 (2008).
9. Goldanskii V. I., Ann. Rev. Phys. Chem. **27**, 85–126 (1976).
10. Polyakov D. N., Shumova V. V. and Vasilyak L. M., Surf. Eng. Appl. Electrochem. **51**, 143–151 (2015).
11. Stauss S., Muneoka H. and Terashima K., Plasma Sources Sci. Technol. **27**, 023003 (2018).
12. Vasilyak L. M. et al., New J. Phys. **15**, 043047 (2013).
13. Grigorian G. M., Dyatko N. A. and Kochetov I. V., Phys. Plasmas. **24**, 073503 (2017).
14. Polyakov D. N., Shumova V. V. and Vasilyak L. M., J. Appl. Phys. **128**, 053301 (2020).
15. Fortov V. E. and Morfill G. E. Complex and Dusty Plasmas: From Laboratory to Space. Boca Raton, CRC Press, 2009.
16. Polyakov D. N., Shumova V. V. and Vasilyak L. M., Plasma Sources Sci. Technol. **31**, 074001 (2022).
17. Polyakov D. N., Shumova V. V. and Vasilyak L. M., Plasma Sources Sci. Technol. **30**, 07LT01 (2021).
18. Thomas E., Amatuucci W. E., Compton Ch. and Christy B., Phys. Plasmas. **9**, 3154–3158 (2002).
19. Polyakov D. N., Shumova V. V. and Vasilyak L. M., Russ. J. Phys. Chem. B. **17** (4), 1241–1245 (2023).
20. Shumova V. V., Polyakov D. N. and Vasilyak L. M., Russ. J. Phys. Chem. B. **19**. (2025) (in print).
21. <https://www.bolsig.laplace.univ-tlse.fr/>
22. <https://nl.lxcat.net>
23. Khrapak S. A., Morfill G. E., Khrapak A. G. and D'yachkov L. G., Phys. Plasmas. **13**, 052114 (2006).
24. Kostenko A. S., Ochkin V. N. and Tskhai S. N., Tech. Phys. Lett. **42** (7), 743–746 (2016).
25. Polyakov D. N., Shumova V. V. and Vasilyak L. M., Plasma Phys. Rep. **43** (3), 397–404 (2017).
26. Vasilyak L. M., Polyakov D. N., Fortov V. E. and Shumova V. V., High Temp. **49**, 623–628 (2011).
27. Polyakov D. N., Shumova V. V. and Vasilyak L. M., Surf. Eng. Appl. Electrochem. **49**, 114–124 (2013).
28. Ding Z., Chen Q., Liu C. and Qian Z., Journal of Electrostatics **135**, 104048 (2025).
29. Vasilyak L. M., Polyakov D. N. and Shumova V. V., Contrib. Plasma Phys. **53**, 432–435 (2013).
30. Tian R. et al., Journal of Applied Physics **123**, 083301 (2018).
31. Fedoseev A. V., Salnikov M. V., Demin N. A. et al., Phys. Plasmas. **25**, 083710 (2018).
32. Kiselyov A. A., Dolgonosov M. S. and Krasovsky V. L., Doklady Physics **59** (5), 209–213 (2014).
33. Polyakov D. N., Shumova V. V. and Vasilyak L. M., Russ. J. Phys. Chem. B. **18** (4), 1128–1133 (2024).
34. Shumova V. V., Polyakov D. N. and Vasilyak L. M., J. Phys. D: Appl. Phys. **50**, 405202 (2017).
35. Polyakov D. N., Shumova V. V. and Vasilyak L. M., Plasma Phys. Rep. **50** (12), 1609–1613 (2024).

## Об авторах

**Поляков Дмитрий Николаевич**, старший научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2). E-mail: cryolab@ihed.ras.ru SPIN-код РИНЦ 8670-4302, Author ID 25782

**Шумова Валерия Валерьевна**, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2); Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук (119991, Россия, Москва, ул. Косыгина, 4). E-mail: shumova@ihed.ras.ru SPIN-код РИНЦ 2700-8783, Author ID 12812

**Васильяк Леонид Михайлович**, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2). E-mail: vasilyak@ihed.ras.ru SPIN-код РИНЦ 5623-5167, Author ID 19599