ГОРЕНИЕ, ВЗРЫВ И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

УДК 537.525

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПЛАЗМЫ С ЗАРЯЖЕННЫМ ПЫЛЕВЫМ ОБЛАКОМ

© 2020 г. В. В. Шумова^{1, 2*}, Д. Н. Поляков¹, Л. М. Василяк¹

¹Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Москва, Россия ²Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук, Москва, Россия

**E-mail: shumova@ihed.ras.ru* Поступила в редакцию 18.05.2020; после доработки 18.05.2020; принята в печать 22.06.2020

Экспериментально и численно исследованы параметры тлеющего разряда низкого давления в неоне с твердыми микрочастицами с целью определения области существования заряженных пылевых облаков, наиболее сильно влияющих на электрофизические параметры газоразрядной плазмы в неоне. Показано, что пылевые облака с максимальным суммарным отрицательным зарядом образуются при средней по объему разряда концентрации электронов 10⁸ см⁻³. Полученные значения параметров плазмы с пылевыми облаками близки к значениям, характерным для возмущенных состояний ионосферы.

Ключевые слова: пылевая плазма, пылевые частицы, заряженное пылевое облако, тлеющий разряд, электрофизические параметры плазмы.

DOI: 10.31857/S0207401X20120134

введение

Аэрозольные образования, состоящие из микрочастиц в различных агрегатных состояниях, являются широко распространенной компонентой природных сред, а также участником или продуктом ряда современных технологических процессов [1]. Микрочастишы оказывают влияние на физико-химические процессы в двигателях и химических реакторах вследствие их образования в процессе сгорания топлива либо присутствия их в качестве катализаторов [2, 3]. При наличии источников ионизации, таких как ионизующее излучение или электрическое поле, микрочастицы могут заряжаться и образовывать заряженные пылевые облака. Установлено формирование в ионосфере слоев из заряженных аэрозольных частиц, несущих существенный отрицательный заряд, и облаков ионов около них [4]. Как известно, поглощение и рассеяние электромагнитных волн в заряженных слоях аэрозолей в атмосфере создает проблемы для дистанционной пассивной локации поверхности земли [5, 6].

Для адекватного описания процессов в системах, содержащих заряженные микрочастицы, важно учитывать изменения физико-химических и электрических характеристик этих систем, обусловленные присутствием микрочастиц. Однако осуществлять прямое исследование влияния микрочастиц на свойства таких систем, как верхние слои атмосферы, либо плазма в токамаках, весьма сложно. Такое исследование возможно, если использовать плазму газовых разрядов. Появление пылевых частиц в неравновесной плазме газового разряда низкого давления приводит к изменению свойств и плазмы, и газового разряда.

Плазма с пылевыми частицами представляет собой диссипативную синергетическую систему, в которой поступающая в плазму энергия переходит в энергию элементарных и коллективных процессов самоорганизации и к образованию плазменно-пылевых систем [7]. Поверхность пылевых частиц может служить источником дополнительной гибели или рождения заряженных частиц. При повышении концентрации пылевых частиц в газовом разряде увеличивается частота ионизации, что необходимо для сохранения тока разряда. Этот процесс приводит к росту величины напряженности продольного (аксиального) электрического поля [8]. Также могут реализоваться условия, при которых наличие пылевых частиц приводит к увеличению концентрации свободных электронов, когда значимыми процессами являются фотоэлектронная либо вторичная электронная эмиссия с поверхности частиц. В таких случаях при поступлении пылевых частиц в разряд может уменьшиться величина продольной напряженности электрического поля [9].

Исследования электрофизических характеристик тлеющего разряда с пылевыми облаками, выполненные в последние годы, представлены в работах нескольких групп авторов [8, 10-12]. Теоретический анализ плазменно-пылевых систем, образующихся в плазме положительного столба тлеющего разряда, проводили методами нелокального кинетического моделирования [10, 12] либо с помощью диффузионно-дрейфовой модели [8, 11]. Влияние облака пылевых частиц на плазму и газовый разряд в целом тем не менее остается недостаточно изученным. Детали такого влияния представляются важными в системах с большим числом заряженных частиц, например: присутствующих в слоях аэрозолей в атмосфере [4-6]; наблюдаемых в экспериментах, проведенных в космосе [10]; в системах с высокой плотностью пылевых частиц, в том числе в криогенной пылевой плазме [7, 13].

В данной работе исследуется влияние пылевых частиц на однородный положительный столб тлеющего разряда в неоне с целью определения области существования пылевых структур, наиболее сильно влияющих на изменение электрофизических параметров плазмы в неоне. Неон выбран в качестве плазмообразующего газа для облегчения условий эксперимента, поскольку в неоновой плазме разряда постоянного тока, по нашему мнению, образуются наиболее плотные и пространственностабильные пылевые облака.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Тлеющий разряд в неоне при давлении 0.3-0.9 Торр и токе 0.1–3.5 мА инициировался в режиме стабилизации тока в стеклянной цилиндрической разрядной трубке с полым катодом и полым анодом. Разрядная трубка длиной 20 см между катодом и анодом и внутренним диаметром 1.65 см была расположена вертикально. Для поддержания постоянной температуры стенки разрядной трубки ее помещали в оптический криостат, где температура могла изменяться от комнатной до криогенной [14]. Пылевые сферические монодисперсные частицы диаметром 2.55 мкм поступали в разряд через полый анод, расположенный вверху разрядной трубки. Над полым катодом внизу разрядной трубки располагалась диэлектрическая конусная диафрагма с отверстием лиаметром 0.2 см. Конус служил экраном, не позволяющим палающим пылевым частицам попадать на стенки катода, менять его эмиссионные характеристики и влиять на устойчивость разряда. Суживающаяся форма диафрагмы (конуса) позволяла стабилизировать положение первой страты за счет увеличения локальной напряженности продольного электрического поля. Пылевые

облака формировались в стратах между тонкими измерительными металлическими кольцевыми зондами, которые располагались над диафрагмой на расстоянии l = 4 см друг от друга. Расстояние от верхнего среза диафрагмы до нижнего измерительного кольца подобрано таким образом, чтобы первая страта была расположена выше нижнего измерительного кольца во всем диапазоне экспериментальных параметров.

Проводилась синхронизованная регистрация параметров разряда (тока, І, и падения напряжения, ΔV , на участке между кольцевыми зондами положительного столба с пылевыми частицами и в разряде без частиц) и параметров пылевых облаков (формы, аксиального и радиального размеров и концентрации пылевых частиц). Напряженность продольного электрического поля на участке измерения определялось как $E = \Delta V/I$. Измерение параметров пылевых облаков проводилось по их изображениям, полученным методом оптической регистрации с помощью микроскопа и видеокамеры. Изображения пылевых облаков получали в аксиальном сечении разряда в отраженном излучении плоского лазерного луча. Толщина луча была вдвое меньше минимального расстояния между пылевыми частицами. Плоский лазерный луч был сформирован оптической системой, состоящей из цилиндрических линз. Измерения проведены при комнатной температуре. Более подробное описание эксперимента и возможностей экспериментальной установки приведено в работе [13].

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ

Особенность пылевой плазмы состоит в том. что компоненты такой системы – ионы, электроны и микрочастицы – оказываются связанными сильным взаимным влиянием и не могут рассматриваться независимо. Достаточно сложный механизм взаимодействия компонент описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений, решение которой проводится численно. Для моделирования плазмы, образующейся в газоразрядных устройствах, применяется диффузионное приближение. Пространственные распределения компонент плазмы в рамках этого приближения могут быть получены путем совместного решения уравнений непрерывности для потоков заряженных частиц и сохранения заряда с выбором граничных условий, соответствующих геометрии задачи. Критерием применимости диффузионного подхода для описания плазмы является условие $\lambda \ll L$. где λ – средняя длина свободного пробега частиц плазмы, *L* – линейный геометрический размер системы. Для плазмы с пылевыми частицами в качестве параметра учитывается также и характерный размер микрочастицы – ее радиус а. Потоки заряженных частиц на поверхность пылевых частиц рассчитываются в приближении свободномолекулярного потока, которое применимо для частиц с радиусами $a \ll \lambda_D \ll L$, где $\lambda_D - длина$ экранирования плазмы. При размере пылевых частиц в несколько микрон такие приближения могут быть использованы не только в плазме тлеющего разряда низкого давления, но и для описания процессов зарядки пылевых частиц в слоях аэрозолей в атмосфере.

В настоящей работе исследованы процессы образования, диффузия, дрейф и гибель электронов, ионов и метастабильных атомов неона в объеме плазмы, на поверхности микрочастиц и на стенках трубки. Рассмотрена ступенчатая ионизация через уровень из группы метастабильных уровней неона конфигурации 1s с энергией 16.62 эВ. Молекулярные ионы не рассматривались. Развернутое изложение модели представлено в работе [15]. Температура электронов, транспортные коэффициенты и коэффициенты реакций возбуждения и ионизации с участием электронов получены с использованием пакета Kinetics Boltzmann solver (BOLSIG+ [16]) и данных базы LXCat [17].

Равновесный потенциал поверхности частицы, ϕ , находили из условия постоянства заряда частицы, определяемого равенством потоков ионов и электронов на ее поверхность. Равновесный заряд частицы, Z_d , рассчитывали по поверхностному потенциалу как $Z_d = 4\pi\epsilon_0 a\phi/e$. Условие электронейтральности плазмы дается уравнением $n_i = n_e + |Z_d|n_d$, где n_i , n_e , n_d — концентрации ионов, электронов и пылевых частиц соответственно. Распределения ионов, электронов и метастабильных атомов неона удовлетворяют нулевым краевым условиям: $n_{i,e,m}|_{r=R} = 0$ на стенке и условиям, налагаемым на их производные, которые следуют из симметрии задачи: $(dn_{i,e,m}/dr)|_{r=0} = 0$. Интеграл от плотности потока электронов по сечению разряда радиусом *R* равен току разряда *I*:

$$I = 2\pi e \mu_e E \int_0^R n_e(r) r dr, \qquad (1)$$

где μ_e — подвижность электронов, E — напряженность продольного электрического поля разряда.

Распределение пылевых частиц по радиусу $n_d(r)$ было задано осесимметричным плоским профилем с экспоненциальным размытием по краям $n_d(r) =$ $= n_d(0)\exp((r_d - r)/0.1R)$ при $r > r_d$, и $n_d(r) = n_d(0)$ при $r \le r_d$, где $r_d - эффективный радиус пылевого об$ лака. Моделирование проводили с использованием экспериментально определенных параметровпылевых облаков.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Зависимость формы пылевых облаков от тока разряда *I* и давления газа *P* была следующей. Увеличение тока разряда приводило к увеличению

радиального и уменьшению продольного размеров пылевого образования и переходу от эллипсоидальной формы к форме, напоминающей полый цилиндр или тор – с центральной зоной, свободной от пылевых частиц. При силе тока выше 0.7-1.5 мА (в зависимости от давления) количество частиц в облаке уменьшалось, а расстояние между ними увеличивалось. При изменении тока от 0.2 до 0.8 мА и давлении 0.3-0.4 Торр наблюдалось формирование однородных и пространственно стабильных пылевых образований длиной 0.46-1 см и диаметром 0.7-1.1 см. При таких значениях тока и давления напряжение в положительном столбе разряда в присутствии пылевых частиц было выше, чем в разряде без частиц с тем же значением тока разряда; также наблюдалось максимальное различие этих напряжений, ΔE , отнесенное к единице длины пылевого облака. Радиус пылевых образований, r_d, при этом равнялся примерно половине радиуса разрядной

трубки. Полное количество частиц N_d^* в образованиях было (0.2–1.6) · 10⁵. Концентрация частиц n_d в зависимости от тока разряда составляла (0.7–2.7) · 10⁵ см⁻³.

С увеличением силы тока в диапазоне от минимальных до 0.7—0.8 мА количество частиц N_d в облаке возрастало, достигая максимального значения, а затем уменьшалось. Уменьшение количества пылевых частиц в облаке и, соответственно, ослабление их влияния при наибольших значениях тока разряда, исследованных в этой работе, связано со снижением стабильности пылевого облака вследствие увеличения силы термофореза выталкивающей частицы из облака на периферию разряда [18].

Увеличение количества пылевых частиц в разряде приводило к возрастанию продольной напряженности электрического поля *E*. Максимальное расхождение в значениях падения напряжения в положительном столбе тлеющего разряда в неоне с частицами по сравнению с разрядом без частиц наблюдалось в присутствии больших по размеру (с большим количеством частиц) и более структурно однородных пылевых облаков.

В табл. 1 приведены результаты измерения и моделирования параметров пылевых образований при давлении 0.35 Торр, соответствующем середине диапазона давлений, в котором наблюдались наиболее устойчивые пылевые облака. Напряженность поля в разряде без пылевых частиц при этом давлении составляла 4.32 В/см.

Приращение величины напряженности электрического поля рассчитано как разница между значениями напряженности электрического поля на участке измерения в разряде с пылевым облаком и напряженности аксиального электрическо-

<i>I</i> , мА эксперимент	ΔE , В/см		<i>r</i> _d , см	$n_d, 10^5 \mathrm{cm}^{-3}$	$N_d^*, 10^3$	$\langle Z_d \rangle$, $10^3 \mathrm{e}^-$
	эксперимент	расчет	эксперимент	эксперимент	эксперимент	расчет
0.19	0.06	0.26	0.18	1.44	6.5	4.63
0.38	0.13	0.45	0.38	1.71	9.8	4.86
0.56	1.97	1.73	0.40	2.0	115.0	3.0
0.73	3.23	1.74	0.40	2.0	140.0	2.8
0.78	3.32	1.62	0.49	2.03	130.0	3.46
0.98	1.34	1.30	0.44	1.72	95.0	3.45
3.0	—	0.70	0.40	0.2	10.0	6.2

Таблица 1. Условия образования и параметры пылевых облаков, наиболее сильно влияющих на параметры разряда при давлении 0.35 Торр

го поля в разряде без пылевых частиц. Каждому значению приращения ΔE соответствует пылевое облако определенного радиуса и длины и, соответственно, с разным количеством пылевых частиц и различной их концентрацией. Данные, приведенные в табл. 1, показывают, что расчет дает заниженное значение ΔE при высоких концентрациях пылевых частиц, что может быть связано с отличием формы экспериментально получаемых пылевых облаков от цилиндрических, предполагаемых в расчетной модели. В последнем столбце таблицы приведен средний по радиальному сечению пылевого облака заряд пылевых частиц, $\langle Z_d \rangle$, рассчитанный в зарядах электрона, е⁻.

С точки зрения возможных приложений полученных результатов наиболее интересным является анализ влияния облака заряженных пылевых



Рис. 1. Зависимость отношения заряда, сосредоточенного на пылевых частицах, к суммарному заряду электронов в единице длины положительного столба тлеющего разряда от средней по сечению концентрации электронов. Линия *1* – аппроксимация (фильтр Савицкого–Голея).

частиц на интегральные характеристики разряда. Так, результаты показывают, что пылевое облако может сосредоточить существенный отрицательный объемный заряд. На рис. 1 представлена зависимость отношения заряда, локализованного на пылевых частицах, к суммарному заряду электронов в единице длины положительного столба $Z_d N_d / N_e$ от средней по сечению разряда концентрации электронов. Здесь предполагается, что пылевое облако имеет форму цилиндра, а средняя по сечению концентрация электронов рассчитывается как $n_e = I (\pi R^2 \mu_e e E)^{-1}$. Видно, что эта зависимость имеет выраженный максимум и наибольший заряд сосредоточивается на пылевых частицах при средней по сечению концентрации электронов, близкой к 10⁸ см⁻³.

Близкие значения концентрации электронов получены в расчетах по двумерной модели положительного столба в области локализации пылевого облака с максимальными размерами, полученным в эксперименте, проведенном в неоне в условиях микрогравитации [10]. Отметим, что эксперимент [10] проводился в условиях, отличных от условий нашего эксперимента. Тлеющий разряд зажигался в трубке с внутренним диаметром 3 см, давление неона составляло 60 Па (≈0.45 Торр), диаметр пылевых частиц — 6.86 мкм.

Заслуживает внимания тот факт, что близких значений (~ $10^7 \, \text{сm}^{-3}$) может достигать концентрация электронов в ионосфере при магнитных бурях. В работе [4] установлено, что аэрозольные частицы в ионосфере могут иметь размеры до 10 мкм, а их заряд — 10^4 элементарных зарядов.

Зависимость $Z_d N_d / N_e$ от вкладываемой в разряд погонной мощности, W = IE, имеет такой же колоколообразный вид, как от средней по сечению концентрации электронов. Значения погонной мощности находятся в диапазоне 1–15 мВт/см; максимум колокола достигается при значении Wоколо 3 мВт/см. Из приведенных в табл. 1 и на рис. 1 данных можно видеть, что наибольшее вли-

ХИМИЧЕСКАЯ ФИЗИКА том 39 № 12 2020



Рис. 2. Радиальные профили концентрации электронов и ионов в разрядах (давление неона – 0.35 Торр, ток разряда – 0.6 мА) без пылевых частиц (линия *I*); при наличии пылевого облака с параметрами $n_d = 2.0 \cdot 10^5$ см⁻³, $r_d = 0.4$ см (n_e – линия 2, n_i – линия 3).

яние на параметры разряда оказывают пылевые образования, в которых отношение $Z_d N_d / N_e$ принимает максимальные значения.

На рис. 2 представлены рассчитанные по модели радиальные профили концентраций электронов и ионов при давлении неона 0.35 Торр и токе разряда 0.6 мА в разряде без пылевых частиц и при наличии пылевого облака с параметрами $n_d=2.0\cdot 10^5\,{\rm cm}^{-3},\,r_d=0.4$ см (строка 3 табл. 1). На рис. 2 можно видеть обеднение распределения электронов вследствие их гибели на пылевых частицах в центре разряда. Проведенное моделирование позволяет заключить, что пылевое облако, являясь дополнительным фактором объемных потерь свободных электронов, при определенных размерах и концентрации пылевых частиц выравнивает распределение электронов по сечению разряда. Несмотря на поглощение ионов пылевыми частицами, равное поглощению электронов, концентрация ионов в пределах пылевого облака возрастает более чем в два раза по сравнению с разрядом без пылевых частиц. При этом температура электронов в разряде возрастает вследствие увеличения напряженности греющего электрического поля. При параметрах эксперимента, моделируемых на рис. 2, напряженность продольного поля разряда возрастает почти в 1.5 раза по сравнению с напряженностью разряда без частиц для компенсации потерь зарядов на пылевых частицах, что, вероятно, будет справедливо до тех пор, пока концентрация пылевых частиц в облаке не достигнет значения, вызывающего тушение разряда [19].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, моделирование влияния пылевых облаков на плазму тлеющего разряда в неоне, проведенное с использованием экспериментально определенных параметров пылевых облаков, показало, что наибольшее влияние оказывают пылевые облака, в которых отношение заряда, сосредоточенного на пылевых частицах, к суммарному заряду электронов, приходящемуся на единицу длины однородного положительного столба тлеющего разряда, принимает максимальные значения. Показано, что в пылевом облаке создается избыточная концентрация положительно заряженных ионов, которая может быть в несколько раз выше, чем в разряде без частиц при том же токе разряда.

Расчетами установлено значение средней по объему разряда концентрации электронов, при которой образуются пылевые облака с наиболее высоким отрицательным зарядом, сосредоточенным на пылевой компоненте. Полученные значения параметров плазмы с пылевыми облаками близки к значениям, характерным для возмущенных состояний ионосферы, что делает пылевую газоразрядную плазму системой, в которой возможно моделирование атмосферных процессов с участием заряженных аэрозолей.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российским фондом фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 19-02-00454.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Фортов В.Е., Храпак А.Г., Храпак С.А., Молотков В.И., Петров О.Ф. // Успехи физ. наук. 2004. Т. 174. № 5. С. 494.
- Трошин К.Я., Стрелецкий А.Н., Колбанев И.В., Борисов А.А., Фролов С.М., Фролов Ф.С. // Хим. физика. 2016. Т. 35. № 5. С. 51.
- Власов П.А., Смирнов В.Н., Тереза А.М., Агафонов Г.Л., Колбановский Ю.А. и др. // Хим. физика. 2016. Т. 35. № 12. С. 35.
- Голубков Г.В., Манжелий М.И., Берлин А.А., Лушников А.А., Эппельбаум Л.В. // Хим. физика. 2018. Т. 37. № 7. С. 33.
- 5. Голубков Г.В., Манжелий М.И., Лушников А.А. // Хим. физика. 2014. Т. 33. № 7. С. 101.
- 6. Голубков Г.В., Манжелий М.И., Берлин А.А., Лушников А.А. // Хим. физика. 2016. Т. 35. № 1. С. 5.
- Polyakov D.N., Shumova V.V., Vasilyak L.M. // Surf. Eng. Appl. Electrochem. 2015. V. 51. № 2. P. 143.
- Polyakov D.N., Shumova V.V., Vasilyak L.M. // Plasma Phys. Rep. 2017. V. 43. № 3. P. 397.
- Vasilyak L.M., Vetchinin S.P., Polyakov D.N., Fortov V.E. // J. Exp. Theor. Phys. 2005. V. 100. P. 1029.
- Zobnin A.V., Usachev A.D., Petrov O.F., Fortov V.E., Thoma M.H., Fink M.A. // Phys. Plasmas. 2018. V. 25. № 3. P. 033702.

- Yuan C., Yao J., Bogdanov E.A., Kudryavtsev A.A., Zhou Z., Bogdanov D.V. // Plasma Sources Sci. Technol. 2019. V. 28. № 9. P. 095020.
- 12. Fedoseev A.V., Demin N.A., Salnikov M.V., Sukhinin G.I. // Contrib. Plasma Phys. 2019. V. 59. № 6. P. e201800181.
- 13. Polyakov D.N., Shumova V.V., Vasilyak L.M. // Plasma Sources Sci. Technol. 2019. V. 28. P. 065017.
- 14. *Shumova V.V., Polyakov D.N., Vasilyak L.M.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2017. V. 50. P. 405202.
- 15. *Shumova V.V., Polyakov D.N., Vasilyak L.M.* // J. Appl. Phys. 2020. V. 128. P. 053301.
- 16. Hagelaar G.J.M., Pitchford L.C. // Ibid. 2005. V. 14. P. 722; https://www.bolsig.laplace.univ-tlse.fr/
- Pitchford L.C. et al. // Plasma Process. Polym. 2017. V. 14. P. 1600098; https://nl.lxcat.net
- 18. Шумова В.В., Поляков Д.Н., Василяк Л.М. // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 8. С. 71.
- 19. *Polyakov D.N., Shumova V.V., Vasilyak L.M.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2014. V. 42. № 10. P. 2684.