

УДК 537.525

ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ ОБЛАКА ИЗ ЗАРЯЖЕННЫХ МИКРОЧАСТИЦ В ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЕ

© 2023 г. Д. Н. Поляков¹, В. В. Шумова^{1, 2*}, 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: cryolab@ihed.ras.ru

Поступила в редакцию 23.03.2023;

после доработки 12.04.2023;

принята в печать 20.04.2023

Предложена модель расчета коэффициентов поверхностного натяжения сферического облака из заряженных микрочастиц в плазме. Рассчитаны коэффициенты поверхностного натяжения кулоновских сфер, полученных в тлеющем разряде низкого давления в неоне при температурах 77 и 295 К для частиц диаметром 4 и 2 мкм соответственно. Определена потенциальная энергия микрочастиц на поверхности сферы. В проведенных расчетах применялась гидродинамическая модель положительного столба разряда с заряженными микрочастицами. Полученные значения коэффициента поверхностного натяжения кулоновских сфер по величине на несколько порядков меньше, чем у шаровых молний. Предложена гипотеза образования кулоновских сфер в атмосфере Земли.

Ключевые слова: комплексная плазма, кулоновская сфера, потенциальная энергия, поверхностное натяжение, стандартная атмосфера, газовый разряд, шаровая молния.

DOI: 10.31857/S0207401X23100126, EDN: PDKVOK

1. ВВЕДЕНИЕ

Образующиеся в атмосферных слоях с пониженной плотностью воздуха (стратосфере и мезосфере Земли) скопления аэрозолей из заряженных частичек конденсированного вещества аналогичны левитирующим облакам, наблюдаемым в эксперименте с комплексной (пылевой) плазмой [1]. В различных слоях атмосферы на разной высоте аэрозоли представлены частичками льда, воды, космической и вулканической пыли и грунта. В зависимости от высоты аэрозоли могут заряжаться в условиях слабоионизованной плазмы, возникающей при воздействии космических частиц, быстрых электронов и протонов, поступающих из радиационного пояса Земли, и в плазме, образованной электрическими явлениями в атмосфере [2–7]. Заряженные аэрозоли могут формировать облака, взаимодействующие с ионизованной компонентой атмосферы и локальными электрическими полями глобальной электрической цепи Земли [8, 9]. Примером заряженных облаков в нижней мезосфере являются серебристые облака, образующиеся при низкой температуре воздуха из частичек льда.

В лабораторных условиях комплексная плазма образуется, например, при взаимодействии микро- и наночастиц конденсированного вещества с

плазмой различного вида газовых разрядов [1]. Взаимодействуя с плазмой, частички заряжаются и формируют заряженные облака различной формы. В подобных комплексной плазме средах можно моделировать термодинамические свойства [1, 10], например поверхностное натяжение [11]. Поверхностное натяжение проявляется в заряженном облаке как следствие реализации принципа минимума энергии, когда для уменьшения величины поверхностной энергии поверхность облака стремится к уменьшению площади до минимально возможной величины. Эта тенденция приводит к трансформации формы облака с жидкостной структурой к форме сферы.

В лабораторных условиях сферы из заряженных микрочастиц (кулоновские сферы) наблюдаются в плазме газовых разрядов низкого давления при различных температурах газа [10, 12, 13]. Их время существования определяется временем жизни окружающей плазмы и наличием электрического поля. При среднем и атмосферном давлении похожие долгоживущие плазменные образования сферической формы наблюдаются в природных условиях вблизи поверхности Земли и в нижней атмосфере (на высоте до 4 км) в виде шаровой молнии [14, 15]. Светящиеся полусферы из твердых частиц и заряженных капель воды, со-

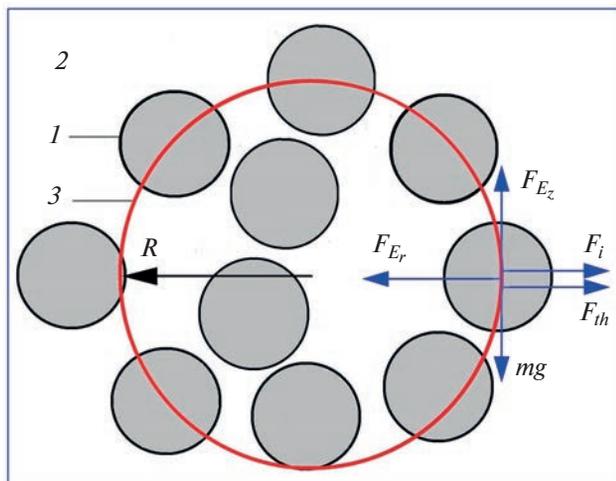


Рис. 1. Кулоновская сфера (сечение): 1 – микрочастица с массой m , 2 – плазма, 3 – условная поверхность радиусом R ; F_{Th} – сила термофореза, F_{Er} – сила радиального электрического поля, F_i – сила ионного увлечения и F_{Ez} – сила аксиального электрического поля.

прикасающиеся с поверхностью Земли, наблюдаются в эпицентральных областях во время и после сейсмических событий [16]. Долгоживущие плазменные образования – плазмоиды и искусственные шаровые молнии – получают также в лабораторных условиях в электрических разрядах при атмосферном давлении [15], а также в слабоионизованной газоразрядной плазме при взаимодействии с ударной волной [17].

Можно предположить, что некоторые природные шаровые молнии [15], как и кулоновские шары, состоят из заряженных частиц. Так, в работе [18] на основе оптического спектра светящегося шара, наблюдаемого после удара молнии в землю, было установлено, что в состав таких шаровых молний входят возбужденные и заряженные частицы различных компонентов почвы. Образующиеся в грозовых условиях шаровые молнии и кулоновские шары можно представить как результат самоорганизации заряженных частичек конденсированного вещества внутри плазменной области, образующейся под воздействием сильного электрического поля или при контакте с плазмой, сопутствующей различным атмосферным электрическим явлениям, наблюдаемым при разной плотности и на разной высоте атмосферы.

Цели данной работы – оценка коэффициента поверхностного натяжения кулоновских сфер из микрочастиц различного диаметра на основе данных экспериментов с комплексной газоразрядной плазмой при температурах 295 и 77 К и сопоставление полученных результатов с данными для шаровой молнии.

2. ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ КУЛОНОВСКОЙ СФЕРЫ

Поверхностное натяжение мы моделируем в сфере, образованной микрочастицами 1 и левитирующей в плазме 2 положительного столба тлеющего разряда (рис. 1). Простая схема плазмы положительного столба разряда подробно рассмотрена в работе [19]. На рис. 1 кулоновская сфера показана в сечении. Взаимодействие заряженных компонентов и электрических полей в комплексной плазме происходит посредством кулоновских сил [1, 20], поэтому поверхностное натяжение в нашем случае имеет электростатическую природу. Левитация (преодоление силы тяжести mg) отрицательно заряженной микрочастицы с массой m в плазме в вертикальном направлении z реализуется при воздействии на нее силы аксиального электрического поля F_{Ez} (рис. 1).

Хрестоматийный подход к описанию поверхностного натяжения с точки зрения классической термодинамики для комплексной плазмы применим ввиду отсутствия в данной системе состояния термодинамического равновесия. Комплексная плазма в газовом разряде – это сильно неидеальная плазма с большой разницей температур ее компонент: электронов, ионов, газа и микрочастиц. По этой причине мы должны ввести ряд допущений. В основе используемой нами модели для определения поверхностного натяжения лежит расчет коэффициента поверхностного натяжения через суммарную величину потенциальной энергии микрочастиц, расположенных на границе сферического облака [11].

Термодинамические функции для комплексной плазмы в этом случае являются аналогами. Так, аналогом поверхности раздела фаз служит поверхность раздела между облаком микрочастиц и окружающей плазмой. Принимается, что ионы, частицы газа и микрочастицы находятся в состоянии термодинамического равновесия. Микрочастицы в облаке находятся в жидкой фазе, где микрочастица является частицей жидкой фазы. Такое введение определения состояния облака основывается на результатах экспериментов [21, 22], в которых было обнаружено, что облако из микрочастиц при внешнем воздействии ведет себя как жидкость с поверхностным натяжением. При отрыве микрочастиц эффективная поверхность облака уменьшается, а облако принимает форму вытянутой капли жидкости [21]. Отрыв микрочастицы от поверхности облака аналогичен разбрызгиванию частицы жидкости. При разделении облака надвое обе части принимают форму сферы [22]. В таком случае можно считать, что энергия, уносимая микрочастицей, аналогична свободной поверхностной энергии вещества. Тогда последняя эквивалентна потенциальной энергии U микрочастицы на поверхности облака и так же, как

свободная поверхностная энергия, уменьшается с уменьшением радиуса сферы. Поскольку сформулировать определение поверхности разрыва для одной частицы не представляется возможным, рассчитаем поверхностное натяжение через условную поверхность сферы. Условной поверхностью сферы служит поверхность \mathcal{S} (рис. 1) радиусом R и площадью S , проходящая через микрочастицы 2, находящиеся на краю пылевой структуры.

В данной конфигурации полная поверхностная энергия кулоновской сферы может быть записана как $W = NU$, где N – количество микрочастиц на условной поверхности сферы. В этом случае величина коэффициента поверхностного натяжения, определяемая как

$$\sigma = W/S = NU/4\pi R^2,$$

является удельной поверхностной энергией сферы. Потенциальную энергию частицы на поверхности облака удобно записать через результирующую радиальную силу [10, 23]:

$$U = -\int_0^R F_{res}(r) dr.$$

Сила $F_{res}(r)$ равна сумме максимально воздействующих на облако радиальных сил: силы F_{th} термофореза, силы F_{Er} радиального электрического поля и силы F_i ионного увлечения (рис. 1). Для определения этих сил использована диффузионно-дрейфовая модель плазмы положительного столба разряда с микрочастицами [11, 24, 25]. Основные столкновительные реакции в плазме, учитываемые в модели, приведены в работах [24, 25]. В модели учитываются тепловыделение в плазме и диссипация ее энергии на стенках разряда и микрочастицах, в том числе за счет тушения возбуждения метастабильных состояний газа. Температура электронов, транспортные коэффициенты и коэффициенты для реакций возбуждения и ионизации с участием электронов и их температуры получены с подключением к схеме расчёта параметров плазмы программного пакета BOLSIG+ совместно с базой данных LXCat. Электростатическая природа силы поверхностного натяжения пылевой сферы, определяемая кулоновским потенциалом взаимодействия между заряженными микрочастицами и плазмой, учитывается через величину заряда на микрочастицах. Заряд определяется в модели расчета сил в комплексной плазме через выполнение условия ее электронейтральности [11, 19, 20, 25]. В отличие от работы [11], в настоящих расчетах учитываются поправка на дополнительное тепло, рассеянное в газе при нагреве микрочастиц за счет метастабильных атомов [26], и наши новые результаты экспериментов по образованию кулоновских сфер при комнатной температуре.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Коэффициент поверхностного натяжения рассчитан для кулоновских сфер, состоящих из микрочастиц диаметром 2 и 4 мкм, полученных в условиях наших экспериментов с комплексной плазмой при температурах 295 и 77 К соответственно. Расчет потенциальной энергии микрочастицы на поверхности кулоновской сферы показал тенденцию роста ее величины с увеличением размера сферы. Потенциальная энергия U частицы возрастает от $1.34 \cdot 10^{-16}$ до $3.8 \cdot 10^{-15}$ Дж при увеличении R от 0.326 до 0.57 см при температуре эксперимента $T_{exp} = 295$ К. При $T_{exp} = 77$ К потенциальная энергия U увеличивается от $0.73 \cdot 10^{-16}$ до $9.8 \cdot 10^{-16}$ Дж при увеличении радиуса облака от 0.07 до 0.145 см. Отметим, что средняя величина U хорошо согласуется с величиной энергии отрыва микрочастицы от облака. Величине энергии отрыва микрочастицы от облака эквивалентна кинетическая энергия микрочастицы в электродинамической ловушке Пауля, равная $6 \cdot 10^{-17}$ Дж [27, 28].

Полученные значения коэффициента поверхностного натяжения заряженных сферических облаков σ находятся в пределах $(0.49 \div 46.3) \cdot 10^{-8}$ Дж \cdot м $^{-2}$ и $(0.08 \div 4.51) 10^{-8}$ Дж \cdot м $^{-2}$ в экспериментах при температурах 77 и 295 К соответственно. Отметим, что с полученными значениями хорошо согласуется величина $9.8 \cdot 10^{-9}$ Дж \cdot м $^{-2}$, полученная в работе [11] по оценке энергии разрыва связей микрочастиц в результате разделения пылевой сферы на две части в экспериментах в воздухе комнатной температуры при давлении $P_{exp} = 13\text{--}26$ Па [29].

Образования, аналогичные кулоновским сферам, полученным в лаборатории в тлеющем разряде низкого давления, могут наблюдаться в средних атмосферных слоях на высотах 40–60 км. Отметим, что плотности газа на данных высотах эквивалентны давлениям газа в комплексной плазме электрических разрядов в лабораторных экспериментах. Эти давления приведены к давлениям при температурах, соответствующих высотам стандартной атмосферы. Например, условия, близкие к экспериментам с кулоновскими сферами, в устройстве с тлеющим разрядом при давлениях 0.4–3 Торр авторы работы [30] использовали для моделирования плазмы красных спрайтов, которые наблюдаются в атмосфере выше 50 км.

В этой связи интересно сравнить полученные значения поверхностного натяжения для пылевых сфер и шаровых молний и рассмотреть их в зависимости от высоты стандартной атмосферы, $h(P, T)$. Соответствие между давлением эксперимента P_{exp} и его приведенным значением к давлению $P(h)$ стандартной атмосферы при температуре $T(h)$ в точке на геометрической высоте h определяется выражением

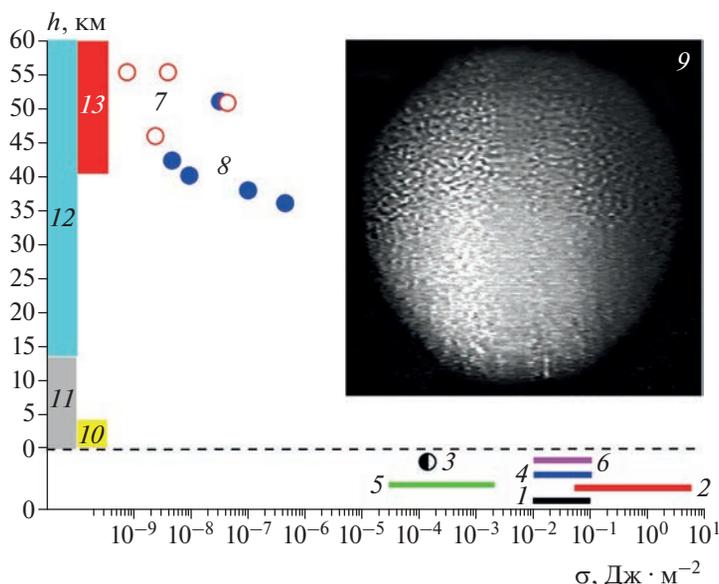


Рис. 2. Коэффициент поверхностного натяжения (σ) шаровых молний на высоте стандартной атмосферы $h = 0$: 1 – данные работы [14], 2 – [31], 3 – [32], 4 – [33], 5 – [34], 6 – [35], а также кулоновских сфер при разной температуре эксперимента: 7 – 295 К, 8 – 77 К; 10–13 – электрические явления в атмосфере Земли на разной высоте стандартной атмосферы: 10 – шаровые молнии, 11 – грозовые молнии, 12 – голубые джеты, 13 – спрайты; 9 – изображение плотной пылевой сферы с концентрацией микрочастиц $\sim 10^7 \text{ см}^{-3}$ при криогенной температуре (77 К). Линии 1, 2, 4–6 показывают диапазоны величин σ , приведенные в соответствующих ссылках.

$$P(h) = T(h) P_{\text{exp}} / T_{\text{exp}}$$

На рис. 2 показаны значения коэффициентов поверхностного натяжения для шаровых молний, приведенные в работах Стаханова [14] – 1, Тигнер [31] – 2, Синкевича [32] – 3, Смирнова [33] – 4, Шавлова [34] – 5 и Петрушова [35] – 6 в сравнении со значениями, полученными для пылевых сфер при разной температуре эксперимента: 7 – при 295 К и 8 – 77 К. Значения коэффициента поверхностного натяжения для шаровых молний при давлении нормальной атмосферы $\sim 10^5 \text{ Па}$ лежат в очень широких пределах: $3 \cdot 10^{-5} \div 5.7 \text{ Дж/м}^2$ [14, 31–35]. Разброс наблюдаемых величин поверхностного натяжения шаровых молний определяется условиями газодинамической устойчивости, соответствующими разным их размерам, концентрациям зарядов и условиям воздействия атмосферных течений. Пример изображения объекта (9) нашего исследования представлен на рис. 2. Это изображение плотной пылевой сферы с концентрацией микрочастиц $\sim 10^7 \text{ см}^{-3}$, полученное при криогенной температуре разряда. Для сопоставления данных с возможными источниками плазмы в рассматриваемом диапазоне высот атмосферы на оси ординат обозначены области 10–13, соответствующие различным электрическим явлениям, наблюдаемым в атмосфере [7].

Полученные данные показывают, что кулоновские сферы (точки 7 и 8 на рис. 2) имеют коэффициент поверхностного натяжения на не-

сколько порядков меньше, чем у шаровых молний, и по этой причине не могут существовать автономно. Для кулоновских сфер величина поверхностного натяжения зависит от потенциала электростатической ловушки, образованной плазмой электрического разряда. Автономное существование кулоновских сфер вне плазмы невозможно. Это следует из теоремы Ирншоу, согласно которой статическая система электрических зарядов – в нашем случае кулоновская сфера – неустойчива в отсутствие внешних сил. Таким образом, ее существование может поддерживаться только в среде, где потоки частиц плазмы и электрические поля образуют динамическое равновесие. Из рис. 2 видно, что источником плазмы на рассматриваемой высоте могут служить спрайты и голубые джеты. Таким образом, существование и время жизни кулоновской сферы в атмосфере будут определяться присутствием электрических полей и продолжительностью поддержания необходимой концентрации плазмы электрического разряда. С учетом электростатической природы поверхностного натяжения кулоновских сфер, для значений σ , приведённых на рис. 2, наблюдается физически верная тенденция, показывающая увеличение значения σ при уменьшении высоты атмосферы. Растущая величина коэффициента поверхностного натяжения может обеспечить автономность существования кулоновской сферы аналогично шаровым молниям.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена модель расчета коэффициентов поверхностного натяжения для кулоновских сфер, наблюдаемых экспериментально в тлеющем разряде постоянного тока. Определена потенциальная энергия заряженной микрочастицы на поверхности кулоновской сферы. Кулоновские сферы, аналогичные полученным в лаборатории, гипотетически могут существовать в атмосфере Земли в плазме электрических разрядов. Полученные значения коэффициента поверхностного натяжения кулоновских сфер сопоставлены со значениям коэффициента поверхностного натяжения, полученными для шаровых молний. Малая величина поверхностного натяжения кулоновских сфер исключает их автономное существование вне газоразрядной плазмы.

Работа выполнена при поддержке Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (госзадание № 075-01129-23-00).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fortov V.E., Morfill G.E. Complex and Dusty Plasmas: From Laboratory to Space. Boca Raton: CRC Press, 2009.
2. Арделян Н.В., Бычков В.Л., Голубков Г.В., Голубков М.Г., Космачевский К.В. // Хим. физика. 2018. Т. 37. № 7. С. 59.
3. Голубков Г.В., Бычков В.Л., Арделян Н.В., Космачевский К.В., Голубков М.Г. // Хим. физика. 2019. Т. 38. № 7. С. 23.
4. Голубков Г.В., Арделян Н.В., Бычков В.Л., Космачевский К.В. // Хим. физика. 2018. Т. 37. № 7. С. 65.
5. Голубков Г.В., Дмитриев А.В., Суворова А.В., Голубков М.Г. // Хим. физика. 2019. Т. 38. № 10. С. 72.
6. Голубков М.Г., Суворова А.В., Дмитриев А.В., Голубков Г.В. // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 10. С. 69.
7. Surkov V.V., Hayakawa M. // Surv. Geophys. 2020. V. 41. P. 1101.
8. Williams E.R. // Atmos. Res. 2009. V. 91. P. 140.
9. Мареев Е.А. // УФН. 2010. Т. 180. № 5 С. 527.
10. Поляков Д.Н., Василяк Л.М., Шумова В.В. // Прикл. физика. 2018. № 4. С. 11.
11. Polyakov D.N., Shumova V.V., Vasilyak L.M. // Phys. Lett. A. 2021. V. 389. P. 127082.
12. Arp O., Block D., Piel A. // Phys. Rev. Lett. 2004. V. 93. P. 165004.
13. Polyakov D.N., Shumova V.V., Vasilyak L.M. // Plasma Sources Sci. Technol. 2019. V. 28. P. 065017.
14. Стаханов И.П. О физической природе шаровой молнии. М.: Энергоатомиздат, 1985.
15. Бычков В.Л. Естественные и искусственные шаровые молнии в атмосфере Земли. М.: МАКС Пресс, 2021.
16. Голубков Г.В., Бычков В.Л., Готовцев В.О. и др. // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 4. С. 51.
17. Синкевич О.А. // Теплофизика высоких температур. 1997. Т. 35. № 4. С. 651.
18. Cen J., Yuan P., Xue S. // Phys. Rev. Lett. 2014. V. 112. P. 035001.
19. Polyakov D.N., Shumova V.V., Vasilyak L.M. // Plasma Sources Sci. Technol. 2021. V. 30. P. 07LT01.
20. Шумова В.В., Поляков Д.Н., Василяк Л.М. // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 12. С. 37.
21. Балабанов В.В., Василяк Л.М., Ветчинин С.П. и др. // ЖЭТФ. 2001. Т. 119. Вып. 1. С. 99.
22. Василяк Л.М., Ветчинин С.П., Зимнухов В.С., Поляков Д.Н., Фортвов В.Е. // ЖЭТФ. 2003. Т. 123. вып. 3. С. 493.
23. Шумова В.В., Поляков Д.Н., Василяк Л.М. // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 8. С. 71.
24. Шумова В.В., Поляков Д.Н., Василяк Л.М. // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 8. С. 70.
25. Polyakov D.N., Shumova V.V., Vasilyak L.M. // Plasma Sources Sci. Technol. 2022. V. 31. P. 074001.
26. Шумова В.В., Поляков Д.Н., Василяк Л.М. // Хим. физика. 2022. Т. 41. № 10. С. 23.
27. Syrovatka R.A., Deputatova L.V., Filinov V.S. et al. // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. V. 1147. P. 012118.
28. Mihalcea B.M., Filinov V.S., Syrovatka R.A., Vasilyak L.M. // Phys. Rep. 2023. V. 1016. P. 1.
29. Василяк Л.М., Ветчинин С.П., Поляков Д.Н., Фортвов В.Е. // ЖЭТФ. 2005. Т. 127. Вып. 5. С. 1166.
30. Sorokin D.A., Tarasenko V.F., Baksht E.K., Vinogradov N.P. // Eur. J. Environ. Earth Sci. 2022. V. 22. P. 42.
31. Turner D.J. // Philos. Trans. Roy. Soc. London, Ser. A.: 1994. V. 347. № 1682. P. 83.
32. Синкевич О.А. // Теплофизика высоких температур. 1997. Т. 35. № 6. С. 968.
33. Смирнов Б.М. // УФН. 1992. Т. 162. № 8. С. 43.
34. Shavlov A.V. // Phys. Lett. A. 2009. V. 373. P. 3959.
35. Петрушов Н.А., Григорьев А.И., Ширяева С.О. // Электронная обработка материалов. 2016. Т. 52. №. 6. С. 49.