УДК 537.29:544.77
https://www.doi.org/10.47813/rosnio.5.2026.19.2001
EDN VPKCLR

Физические основы формирования ионизированной водно-аэрозольной среды

А.И. Степулёв[1], Е.Ю. Дульский[2*], П.Ю. Иванов[2], А.С. Ковшин[2], В.П. Медведев[1]

[1]ООО «АИС-ТЕХ», Иркутск, Россия
[2]ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», Иркутск, Россия

[*]E-mail: E.Dulskiy@mail.ru

Аннотация. В работе рассмотрены физические предпосылки формирования ионизированной водно-аэрозольной среды. Целью исследования являлся анализ базовых физических механизмов, определяющих образование, устойчивость и трансформацию ионного состава в присутствии водной и аэрозольной фазы. В качестве методической основы использован анализ классических и современных публикаций по ионизации воздуха, аэроионам, электризации воды и ион-аэрозольным взаимодействиям. Показано, что водное распыление и паро-аэрозольные процессы могут выступать как фактором ионообразования, так и фактором последующего перераспределения заряда между лёгкими, средними и тяжёлыми ионами. Установлено, что корректное исследование подобных сред требует количественного контроля ионного состава, влажности, температуры, аэрозольной нагрузки и электрофизических характеристик среды. Сделан вывод о физической обоснованности дальнейшего инструментального изучения ионизированных водно- аэрозольных систем.

Ключевые слова: аэроионы, ионизация воздуха, водно-аэрозольная среда, отрицательные ионы, распыление воды, лёгкие ионы, подвижность ионов.

Physical foundations of the formation of an ionized water-aerosol environment

A.I. Stepulev[1], E.Yu. Dulskiy[2*], P.Yu. Ivanov[2], A.S. Kovshin[2], V.P. Medvedev[1]

[1]AIS-TECH LLC, Irkutsk, Russian Federation
[2]Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russian Federation

*E-mail: E.Dulskiy@mail.ru

Abstract. This paper examines the physical prerequisites for the formation of an ionized water-aerosol environment. It is shown that interest in such media is determined not only by applied health-related tasks but also by the general regularities of air ionization, the formation and transformation of air ions, and the influence of the water phase on charge transfer. Based on classical and contemporary sources, the concepts of light, intermediate, and heavy ions, the main mechanisms of ion generation in the atmosphere, the role of water spraying and splashing, and the factors determining the stability of the ionic composition of the environment are analyzed. It is noted that humidity, fog, dust, and other aerosol particles significantly affect the mobility and concentration of light ions. It is concluded that water spraying and steam-aerosol processes can be regarded as a physically grounded basis for the formation of media with modified ionic characteristics; however, their correct study requires quantitative control of the composition and parameters of the environment.

Keywords: air ions, air ionization, water-aerosol environment, negative ions, water spraying, light ions, ion mobility.

1. Введение

Проблема ионизации воздуха на протяжении длительного времени рассматривается на стыке физики, геофизики, гигиены и прикладных инженерных исследований. Современные исследования подчёркивают, что состояние воздушной среды определяется не только её химическим составом и метеорологическими параметрами, но и наличием заряжённых носителей, а также их взаимодействием с аэрозольной фазой [1-3]. При этом сами исследователи отмечали, что влияние ионизации в естественных условиях трудно выделить из совокупного действия других метеорологических факторов, что делает особенно важным изучение искусственно формируемых сред с контролируемыми параметрами.

На современном этапе интерес к ионизированным средам вновь возрастает в связи с развитием технологий, связанных с водным распылением, аэрозольной доставкой, электрохимической активацией воды и формированием паровых сред с изменёнными физико-химическими характеристиками [3-7]. Однако обсуждение подобных систем нередко носит прикладной характер и не всегда опирается на строгую физическую основу. В связи с этим целью настоящей работы является краткий анализ физических предпосылок формирования ионизированной водно-аэрозольной среды.

2. Материалы и методы

Материалом исследования послужили классические и современные научные публикации, посвящённые атмосферным ионам, ион-аэрозольным взаимодействиям, влиянию влажности и аэрозольной фазы на зарядовое состояние частиц, а также процессам зарядообразования при распылении воды. Методической основой работы являлся аналитический обзор и сравнительный анализ опубликованных экспериментальных и обзорных исследований по указанной тематике.

С физической точки зрения ионизация воздуха представляет собой процесс образования пар противоположно заряжённых частиц при отрыве электронов от атомов и молекул и последующем присоединении свободных электронов к нейтральным частицам. В результате формируются положительные и отрицательные ионы, а сама воздушная среда приобретает электропроводящие свойства [1-3].

В современных исследованиях атмосферных ионов и заряжённых частиц различают лёгкие ионы, промежуточные заряжённые кластеры и более тяжёлые формы, связанные с аэрозольными частицами и капельной фазой (таблица 1). Наиболее важным является деление на лёгкие, средние и тяжёлые ионы [1-3], различающиеся подвижностью и характером связи с

окружающей средой. Лёгкие ионы представляют собой сравнительно небольшие комплексы молекул, несущие элементарный заряд. Средние ионы занимают промежуточное положение, а тяжёлые возникают в результате оседания лёгких ионов на частицы пыли, капли тумана и другие аэрозольные включения. Для сухого воздуха при нормальных условиях подвижность отрицательных ионов выше, чем положительных, что указывает на различие их транспортных характеристик и устойчивости в среде.

Таблица 1. Классификация атмосферных ионов и их подвижность.

Тип ионов	Подвижность, см²/(В·с)	Характеристика
Лёгкие ионы	1–2	Небольшие комплексы молекул, несущие один элементарный заряд
Средние ионы	0,01-0,1	Промежуточное состояние между лёгкими и тяжёлыми ионами
Тяжёлые ионы	0,0003-0,001	Возникают при оседании лёгких ионов на пыль, капли тумана и другие частицы
Средняя подвижность положительных ионов в сухом воздухе	1,35	Для нормальных условий
Средняя подвижность отрицательных ионов в сухом воздухе	1,83	Для нормальных условий

Именно это обстоятельство имеет принципиальное значение при анализе водно-аэрозольных систем [2, 3, 6]. В присутствии капельной фазы и взвешенных частиц первично образованные лёгкие ионы могут быстро переходить в менее подвижные формы, что меняет не только концентрацию ионов, но и весь характер ионизированной среды.

3. Результаты и обсуждение

Ионизационное состояние атмосферы поддерживается совокупным действием ряда факторов. К числу основных источников ионизации в нижних слоях атмосферы относятся радиоактивные вещества земной коры и космические лучи [1, 2]. Наряду с ними определённую роль играют фотоэлектрический эффект, электрические разряды, химические реакции, нагрев и другие локальные процессы.

Особое значение для рассматриваемой темы имеют процессы зарядообразования при распылении воды, взаимодействии заряжённых кластеров с каплями и последующем перераспределении заряда в газо-аэрозольной среде [3, 6, 7]. Современные исследования и

обзоры показывают, что водная и аэрозольная фазы могут существенно влиять как на первичное образование заряжённых частиц, так и на их последующую трансформацию и транспорт [3, 6, 7]. Аналогичные эффекты наблюдались и при разбрызгивании дождевых капель.

Таким образом, уже на уровне общих физических закономерностей водное распыление следует рассматривать как один из естественных процессов, способных изменять ионный состав газовой среды. Это делает водно-аэрозольные и паро-аэрозольные системы обоснованным объектом дальнейших инженерных и экспериментальных исследований.

Одной из ключевых особенностей ионизированной воздушной среды является её высокая чувствительность к условиям существования. Даже при наличии источника ионизации число ионов не возрастает бесконечно, поскольку в атмосфере параллельно протекают процессы рекомбинации, диффузии и адсорбции [1, 3, 4, 6]. Особенно важно, что лёгкие ионы могут оседать на твёрдых и жидких поверхностях, а также на микроскопических каплях и пылевых частицах, переходя в малоподвижные формы. Этот процесс в классических работах связывался с загрязнённостью воздуха и снижением его электропроводности.

С физической точки зрения важной характеристикой отрицательного иона является энергия сродства электрона к атому или молекуле, определяющая устойчивость соответствующего связанного состояния. Это означает, что устойчивость отрицательных ионов в реальной газо-аэрозольной среде определяется не только фактом их образования, но и последующим взаимодействием с молекулами газа, каплями воды и взвешенными частицами.

Влажность воздуха и наличие аэрозольной фазы существенно влияют на концентрацию и подвижность лёгких ионов, а также на зарядовое состояние частиц, поскольку способствуют ион-аэрозольным столкновениям и перераспределению заряда [3, 4, 6]. Капли воды могут выступать в роли ядер, адсорбирующих ионы, вследствие чего при высокой влажности, тумане и наличии развитой аэрозольной фазы концентрация лёгких ионов уменьшается. Одновременно изменяется их подвижность, причём отрицательные ионы проявляют особую чувствительность к относительной влажности.

Для водно-аэрозольных систем это означает, что сам факт присутствия воды играет двойственную роль. С одной стороны, процессы распыления воды могут способствовать ионообразованию (рисунок 1). С другой стороны, избыток капельной фазы и конденсата способствует перераспределению заряда между лёгкими и тяжёлыми носителями. Поэтому при анализе паровых и аэрозольных технологий недостаточно говорить только о наличии

ионов; необходимо учитывать агрегатное состояние среды, влажность, наличие капель, размерную структуру аэрозоля и степень загрязнённости воздуха [3-7].

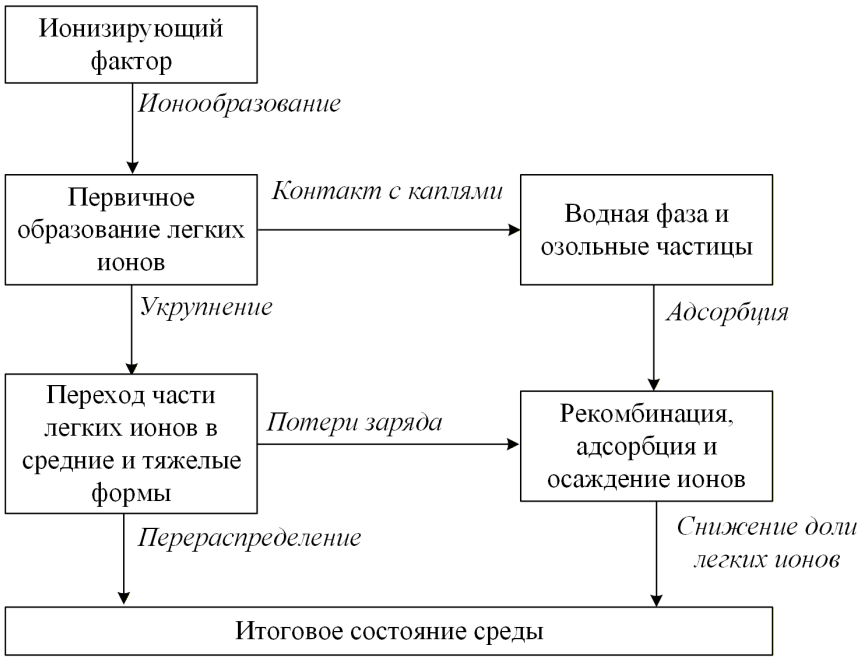

Рисунок 1. Схема трансформации ионного состава водно-аэрозольной среды.

Как показано на рисунке 1, водно-аэрозольная среда играет двойственную роль в процессах ионообразования и последующей трансформации заряженных частиц. С одной стороны, распыление воды и электризация капель могут способствовать первичному образованию лёгких ионов. С другой стороны, наличие капельной фазы и аэрозольных частиц ускоряет адсорбцию ионов, их рекомбинацию и переход в менее подвижные средние и тяжёлые формы, что в конечном счёте изменяет концентрацию лёгких ионов, коэффициент униполярности и электропроводность среды [1, 5, 6].

В классических исследованиях степень ионизации воздуха характеризовалась числом ионов обоих знаков в единице объёма, а также коэффициентом униполярности, отражающим соотношение между положительными и отрицательными носителями заряда

$$q = \frac{n_+}{n_-},$$

где q – коэффициент униполярности, n_+ и n_- – концентрации положительных и отрицательных лёгких ионов соответственно. Для тяжёлых ионов аналогично может использоваться отношение N_+ / N_- [2, 3].

Связь между концентрацией ионов, их подвижностью и электропроводностью среды в первом приближении может быть выражена соотношением

$$\sigma = (n_+\mu_+ + n_-\mu_-),$$

- где σ – электропроводность среды;
- e – элементарный заряд;
- n_+, n_- – концентрации положительных и отрицательных ионов;
- μ_+, μ_- – их подвижности.

Уже тогда подчёркивалось, что для корректной оценки ионизационного состояния необходимы специальные приборы, позволяющие измерять хотя бы часть диапазона ионной подвижности. При этом сами исследователи отмечали ограничения существовавших счётчиков, поскольку не все из них одинаково хорошо разделяли лёгкие, средние и тяжёлые ионы. Современные экспериментальные исследования подчёркивают необходимость инструментального контроля ионного состава, зарядового состояния частиц и параметров аэрозольной среды для корректной интерпретации наблюдаемых эффектов [2, 3, 6].

Из этого следует важный методический вывод. Исследование ионизированной водно-аэрозольной среды должно основываться не на качественных предположениях, а на количественном контроле. Для корректного описания таких систем необходимо учитывать, по меньшей мере, число ионов, их полярность, подвижность, влажность, температуру и аэрозольную нагрузку [4, 6, 7]. Без этого невозможно надёжно различить собственно ионизационный эффект и эффект, обусловленный лишь изменением влажности, нагревом или наличием дисперсной водной фазы.

4. Заключение

Проведённый анализ показывает, что формирование ионизированной водно-аэрозольной среды имеет ясные физические предпосылки. Ионизация воздуха является фундаментальным явлением, зависящим от действия естественных и искусственных ионизаторов, а водное распыление и аэрозольные процессы могут выступать как значимым фактором ионообразования, так и фактором последующей трансформации ионного состава среды. Ключевое значение при этом имеют процессы адсорбции ионов на каплях воды и частицах аэрозоля, а также влияние влажности на подвижность и устойчивость ионов.

Следовательно, водно-аэрозольные и паро-аэрозольные системы могут рассматриваться как физически обоснованная основа для получения сред с изменёнными ионными характеристиками. Однако дальнейшее развитие данного направления требует перехода от общих представлений к инструментально подтверждаемому количественному анализу параметров среды.

Список литературы

1. Yin, R. Revealing the sources and sinks of negative cluster ions in an urban environment through quantitative analysis / R. Yin, X. Li, C. Yan, R. Cai, Y. Zhou, J. Kangasluoma, N. Sarnela, J. Lampilahti, T. Petäjä, V.-M. Kerminen, F. Bianchi, M. Kulmala, J. Jiang // Atmospheric Chemistry and Physics. – 2023. – Vol. 23(9). – P. 5279-5296. – DOI: 10.5194/acp-23-5279-2023. – EDN: YLBNIS.
2. Rowell, A. The behaviour of charged particles (ions) during new particle formation events in urban Leipzig, Germany / A. Rowell, J. Brean, D.C.S. Beddows, Z. Shi, A. Kumar, M. Rissanen, M. Dal Maso, P. Mettke, K. Weinhold, M. Merkel, R.M. Harrison // Atmospheric Chemistry and Physics. – 2024 – Vol. 24(18). – P. 10349-10361. – DOI: 10.5194/acp-24-10349-2024. – EDN: PYNSEJ.
3. Mori, T. Key Factors Controlling Number Concentrations of Non-charged Particles: An Experimental Study / T. Mori, A. Iwata, R. Tabata, T. Okuda // Aerosol and Air Quality Research. – 2024. – Vol. 24(4). – P. 220382. – DOI: 10.4209/aaqr.220382. – EDN: HPYABB.
4. Wan, X. Relationship between negative air ions and environmental factors in the urban forest parks of Yangzhou in urban and suburban areas / X. Wan, R. Zhou, L. Li, C. Yang, J. Lian, J. Zhang, S. Liu, W. Xing, Y. Yuan // City and Environment Interactions. – 2024. – Vol. 24. – P. 100181. – DOI: 10.1016/j.cacint.2024.100181. – EDN: OKCXZU.
5. Mijatović, S. Assessment of Suppressive Effects of Negative Air Ions on Fungal Growth, Sporulation and Airborne Viral Load / S. Mijatović, A. Radalj, A. Ilić [et al.] // Atmosphere. – 2025. – Vol. 16(8). – P. 896. – DOI: 10.3390/atmos16080896. – EDN: FGHSOQ.
6. Shabek, F. Interaction Between Radon, Air Ions, and Ultrafine Particles Under Contrasting Atmospheric Conditions in Belgrade, Serbia / F. Shabek, P. Kolarž, I. Čeliković [et al.] // Atmosphere. – 2025. – Vol. 16(7): – P. 808. – DOI: 10.3390/atmos16070808. – EDN: PBMLYE.
7. Janda, M. Short Review on Plasma-Aerosol Interactions / M. Janda, A. Stancampiano, F. Di Natale, Z. Machala // Plasma Processes and Polymers. – 2025. – Vol. 22(1). – P. 2400275. – DOI: 10.1002/ppap.202400275. – EDN: VHTPVK.