

# Stabilization of Dissolved Substance Concentration in Droplet Clusters

A. A. Fedorets<sup>1</sup>, E. E. Kolmakov<sup>1</sup>, D. N. Medvedev<sup>1</sup>,  
V. O. Mayorov<sup>2</sup>, L. A. Dombrovsky<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> *University of Tyumen, Tyumen, 625005, Russia.*

<sup>2</sup> *Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russia*

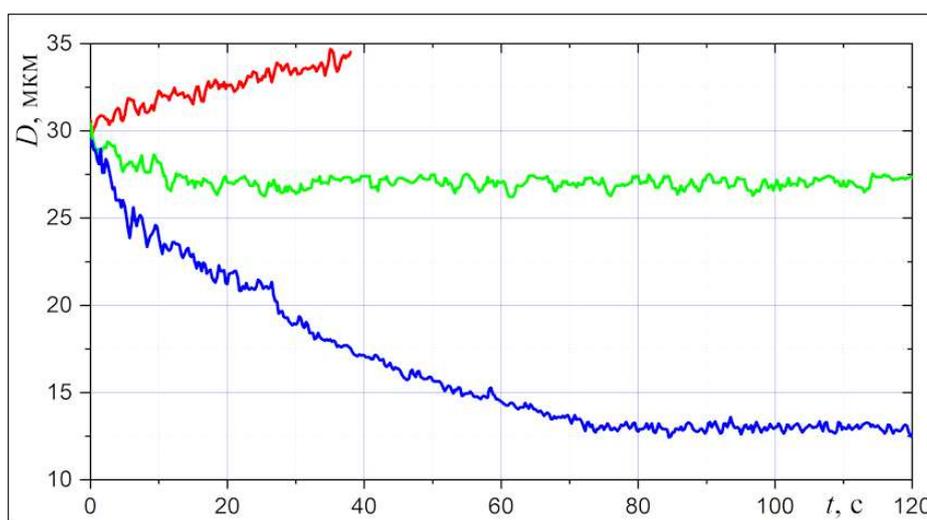
<sup>3</sup> *Joint Institute for High Temperatures, Moscow, 111116, Russia*

fedorets\_alex@mail.ru, eekolmakov@mail.ru, dn.medv@yandex.ru,  
vyacheslav7794@gmail.com, ldombr@yandex.ru

## Abstract

Using a previously developed laboratory technique, a series of experiments was conducted to study the effect of increased concentrations of substances dissolved in water on the condensational growth and equilibrium parameters of droplets in levitating droplet clusters during their stabilization by the combined action of infrared heating and the dissolution of table salt in the water layer under the cluster. The experiments demonstrated that the equilibrium solution in cluster droplets can be reached even for dissolved substances that most strongly prevent equilibrium from being achieved. For the first time, experiments were conducted for mixtures of solutions of various substances. In some cases, a non-additive effect of the solution components on droplet evaporation and stabilization was observed. The results obtained demonstrate the complex interaction of some aqueous solutions in small droplets, highlighting the importance of employing alternative methods and technical means in experimental research.

Keywords: droplet cluster, aqueous solutions, levitation, equilibrium.



Time variation of droplet diameter for various aqueous solutions

УДК 544.772.3

# Стабилизация концентрации растворенных веществ в капельных кластерах

А. А. Федорец<sup>1</sup>, Э. Э. Колмаков<sup>1</sup>, Д. Н. Медведев<sup>1</sup>,  
В. О. Майоров<sup>2</sup>, Л. А. Домбровский<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> ТюмГУ, Россия, Тюмень, 625003, ул. Володарского, д. 6

<sup>2</sup> МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия, Москва, 119991, Ленинские горы, д. 1

<sup>3</sup> ОИВТ РАН, Россия, Москва, 111116, Красноказарменная ул., д. 17а

fedorets\_alex@mail.ru, eekolmakov@mail.ru, dn.medv@yandex.ru,  
vyacheslav7794@gmail.com, ldombr@yandex.ru

## Аннотация

С применением ранее разработанной лабораторной методики проведена серия экспериментов по изучению влияния повышенной концентрации растворенных в воде веществ на конденсационный рост и равновесные параметры капель в левитирующих капельных кластерах при их стабилизации путем совместного действия инфракрасного нагрева и растворения поваренной соли в слое воды под кластером. Экспериментально показана возможность выхода на равновесную концентрацию примеси в каплях кластера даже для растворенных веществ, которые наиболее сильно препятствуют достижению равновесия. Впервые проведены эксперименты для смесей растворов различных веществ. В ряде случаев наблюдалось неаддитивное влияние компонентов растворов на испарение и стабилизацию капель. Полученные результаты демонстрируют сложное взаимодействие некоторых растворов в малых каплях воды, что указывает на важность использования альтернативных методов и технических средств экспериментальных исследований.

Ключевые слова: капельный кластер, водные растворы, левитация, равновесие.

## 1. Введение

Изучение испарения взвешенных в воздухе капель воды и водных растворов представляет интерес для решения широкого круга разнообразных прикладных задач. Публикации на эту тему обсуждаются в недавнем обзоре [1]. Экспериментальные данные, а также современные лабораторные методы и вычислительные модели можно найти в статьях [2–10]. В последние годы внимание коллег привлекло исследование переноса вирусов в микроскопических каплях влаги, которое, в частности, помогло понять физическую причину сезонного характера вирусных эпидемий [11, 12]. Природные процессы в атмосфере и поверхностном слое океана, имеющие большое значение для формирования климата, также связаны с особенностями испарения капель морской воды и капель пресной воды с возможными природными загрязнениями в облачной атмосфере [13–16]. Вообще, задачи, связанные с поведением капель жидкостей при их испарении и возможной конденсации пара из окружающего влажного воздуха остаются одной из тем современных исследований [17, 18].

Очевидно, что применение современных физико-химических методов изучения конденсации и испарения микроскопических капель воды с растворенными в них химическими веществами может дать важную новую информацию. Следуя [19], в данной работе для этого используются уникальные свойства самопроизвольно формирующегося капельного кластера, левитирующего над локально нагреваемой поверхностью воды [20, 21]. Заметим, что капельный кластер имеет очевидные преимущества перед каплями в условиях акустической

левитации [22–29]: капли кластера не деформируются, оставаясь строго сферическими, можно работать с равновесными каплями, размер, состав и температура которых не изменяются в течение эксперимента, и, кроме того, составляющие стабильный кластер равновесные капли различного размера и химического состава наблюдаются одновременно.

## 2. Методика эксперимента

Эксперименты проводились на лабораторной установке, представленной в работах [30, 31]. Для стабилизации кластера использовались как обнаруженный в [30] благоприятный эффект небольшого количества поваренной соли, растворенной в слое воды под кластером, так и традиционный инфракрасный нагрев кластера [32–34]. Во всех опытах данной работы в слой воды кроме NaCl с концентрацией 2 г/л (вдвое большей, чем в [19]), как обычно, добавлялось поверхностно-активное вещество (лаурилсульфат натрия, 0.02 г/л), которое подавляет термокапиллярное течение. Для предотвращения чрезмерного повышения концентрации соли из-за интенсивного испарения воды в области локального нагрева, слой соленой воды непрерывно обновлялся путем подачи свежего раствора с расходом  $0.1 \pm 0.01$  г/мин. Расчетное исследование осесимметричного поля температуры нагреваемых лазером подложки из ситалла и расположенного на ней слоя воды представлено в работе [35].

Для печати исходного кластера, капли которого затем либо уменьшались в результате испарения, либо увеличивались благодаря конденсации пара, поступающего от слоя нагретой воды, применялись ультразвуковые диспенсеры (Altrasonic, Китай). Во всех экспериментах кластер печатался из водных растворов с одинаковой концентрацией  $C_{in} = 10$  г/л. Заметим, что названная концентрация растворенного вещества в четыре раза выше, чем использовавшаяся ранее [19]. В серии сравнительных лабораторных экспериментов использовались растворы хлоридов KCl, NaCl, CaCl<sub>2</sub>, MgCl<sub>2</sub> · 6 H<sub>2</sub>O (бишофит, его раствор сильно поглощает воду), а также растворы следующих веществ: CaSO<sub>4</sub> · 2H<sub>2</sub>O (гипс, плохо растворим в воде, можно использовать в опытах по обезвоживанию), MgSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O (эпсомит, или английская соль) и C<sub>12</sub>H<sub>22</sub>O<sub>11</sub> (сахароза, обычный столовый сахар).

Для инфракрасной стабилизации капельного кластера применялись четыре миниатюрных источника излучения ЕК-8520 (Helioworks, США) без фокусирующей оптики. Источники излучения располагались симметрично относительно вертикальной оси кластера, под углом 23° к горизонтальной плоскости на расстоянии 42 мм вдоль оси источника излучения, и были ориентированы таким образом, чтобы ось конического пучка излучения проходила через капельный кластер. В результате, кластер и слой воды под ним освещались инфракрасным излучением почти равномерно. Параметры ЕК-8520 приведены в [29]. Важно, что спектр инфракрасного излучения источников примерно соответствует тепловому излучению абсолютно черного тела при температуре 1223 К и включает полосу поглощения воды на длине волны 3 мкм [36, 37], благодаря чему даже очень мелкие капли воды поглощают значительную часть падающего на них излучения. Поглощение излучения отдельными сферическими каплями воды произвольного размера может быть рассчитано по классической теории Ми [38–42]. При этом влияние соседних капель кластера пренебрежимо мало, поскольку для решения рассматриваемой задачи применима так называемая гипотеза независимого рассеяния [43–45]. Следует отметить, что расчеты равновесных размеров капель стабилизированных капельных кластеров, полученных с применением инфракрасного облучения, хорошо согласуются с экспериментальными данными [33].

Эксперименты проводились при фиксированной мощности источников инфракрасного излучения, что соответствует напряжению питающего тока  $3.00 \pm 0.01$  В. При этом поток излучения в области локализации кластера составляет 1.24 мВт/мм<sup>2</sup>. Температура поверхности слоя воды под капельным кластером контролировалась пирометрическим датчиком STL-CF1-C3 (Micro-Epsilon, США, рабочий спектральный диапазон 8 до 14 мкм, NETD 0.1° С) и поддерживалась в течение всего эксперимента на уровне  $65 \pm 1$ °С.

В каждом эксперименте видеозапись начиналась непосредственно перед началом печати исходного кластера, что позволяло регистрировать начальные размеры капель. Запись велась с частотой 4 кадра в секунду в течение 200 с. Благодаря этому, была обеспечена достаточно подробная запись изображений кластера вплоть до выхода размеров капель на равновесные значения в стабилизированном капельном кластере. Как и в [19], видеозапись обрабатывалась специальной компьютерной программой, которая позволяет отслеживать каждую каплю и изменение ее диаметра с течением времени.

### 3. Результаты измерений

На рис. 1 приведены данные для кластеров с примесями, которые в разной степени влияют как на испарение воды, так и на конденсационный рост капель. Особенностью ультразвукового диспенсера, применяемого для печати исходного кластера, является существенный разброс размеров генерируемых капель, что позволяет работать с кластером из капель с различным количеством растворенного вещества и получать равновесные кластеры из капель различного размера (рис. 1, *a* и 1, *b*). Как показали расчеты работы [33], равновесный размер капель любого раствора существенно зависит от температуры и влажности окружающего воздуха, а также от потока инфракрасного излучения, поглощаемого каплями. Для наглядности, на рис. 1с показаны зависимости от времени диаметров капель первоначально одинакового размера, но с различными водными растворами (на изображениях рис. 1а,б эти капли отмечены звездочкой). Видно, что капли из чистой воды с начальным диаметром  $D_{in} = 30$  мкм быстро уменьшаются в результате преобладающего испарения и при  $t \approx 70$  с достигают неизменного равновесного диаметра  $D_{eq} = 12 - 13$  мкм. Пульсации кривых  $D(t)$  на рис. 1, с имеют амплитуду на уровне 1 мкм и объясняются погрешностью измерений. Капли раствора NaCl испаряются не так сильно: при том же начальном размере их равновесный диаметр, который достигается примерно за 10 с, составляет около 27 мкм. Интересно, что поведение капель раствора KCl радикально отличается даже от капель раствора NaCl. Капли раствора KCl не уменьшаются, а довольно быстро увеличиваются в размере благодаря преобладанию конденсации водяного пара, содержащегося в потоке влажного воздуха, поднимающемся от нагреваемого слоя воды под кластером. Примерно через 40 с диаметр капель достигает критического диаметра около 35 мкм, после чего эти крупные капли раствора коалесцируют со слоем воды. Заметим, что первоначально более мелкие капли раствора KCl в новых опытах впервые удалось стабилизировать (в [19] этого сделать не удалось).

Поскольку все капли печатаются из одного раствора, масса растворенного вещества («примеси») определяется начальным размером капли. В результате, капельный кластер содержит капли с различной массой примеси  $M_s = C_s V_{in}$ , где  $V_{in} = \pi D_{in}^3 / 6$  – объем капли с начальным диаметром  $D_{in}$ . Чем больше влияние примеси, тем сильнее отличаются между собой размеры капель равновесного кластера. Поэтому обработка даже одной видеозаписи дает не одну экспериментальную точку, а зависимость диаметра равновесных капель от их начального размера. Результаты, полученные для капель NaCl в трех одинаковых экспериментах, показаны на рис. 2, *a*. Интересно, что все зависимости  $D_{eq}(D_{in})$  прекрасно ложатся на одну и ту же линейную зависимость. При этом линейная интерполяция данных для каждого раствора дает прямую, тангенс угла наклона которой,  $\xi$ , характеризует влияние растворенного вещества на конденсационный рост или испарение капли. Значения безразмерного параметра  $\xi$ , полученные в результате серии экспериментов с растворами различных веществ, показаны на рис. 2б. На этом рисунке растворяемые вещества ранжированы в порядке увеличения параметра  $\xi$ . Для чистой воды  $\xi = 0$ , и это значение на рис. 2, *b* не приводится.

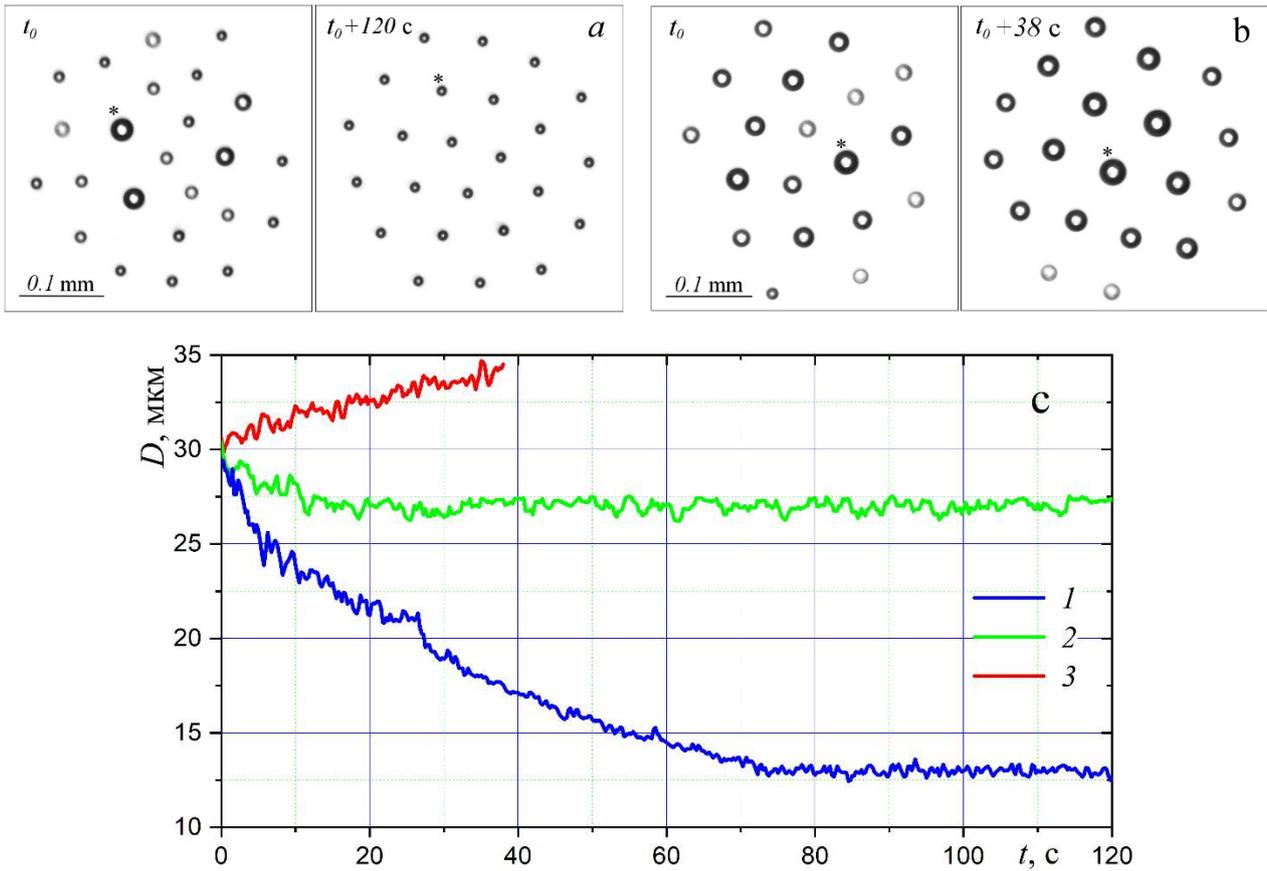


Рис. 1. *a, b* – Изображения капельных кластеров (вид сверху) с из воды (*a*) и раствора KCl (*b*); *c* – изменение диаметра выбранных капель: 1 – вода, 2 – раствор NaCl, 3 – раствор KCl

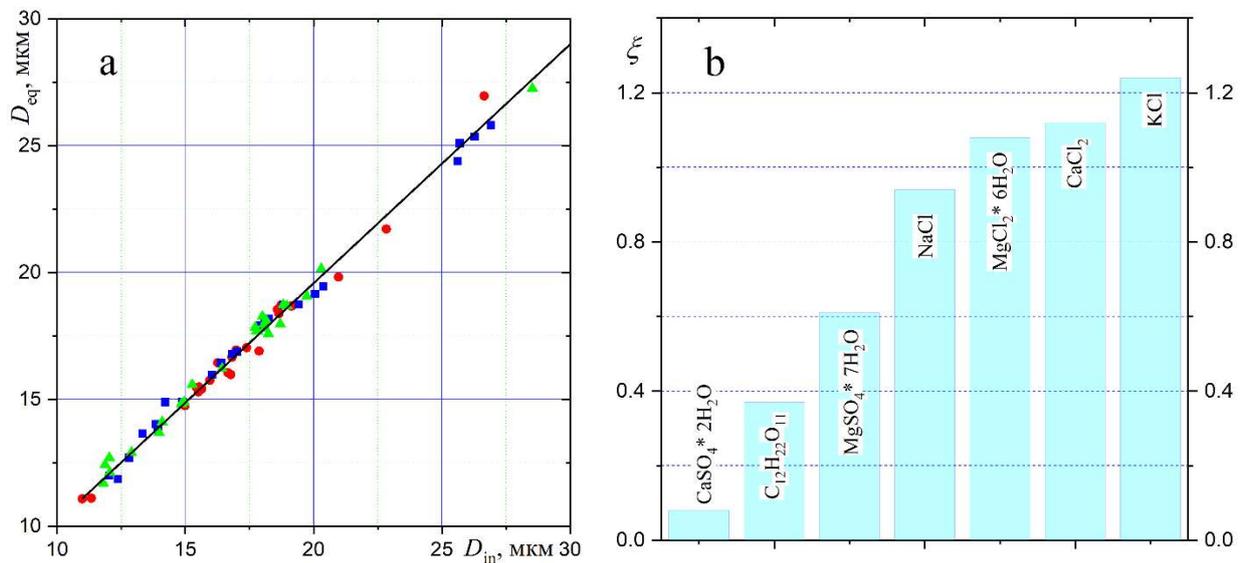


Рис. 2. *a* – Определение параметра  $\xi$  для NaCl по данным трех экспериментов (цветные точки); *b* – Значения  $\xi$  для различных растворов (с погрешностью  $\pm 0.05$ ).

Более сильное влияние хлоридов на размер капель объясняется очень малым коэффициентом диффузии этих веществ в воде [46, 47], что приводит к их повышенной концентрации у поверхности испаряющегося раствора и значительному уменьшению испарения [32, 33], а также гигроскопичностью хлоридов, которая может способствовать конденсационному росту капель.

Используя данные для параметра  $\xi$ , можно получить зависимости концентрации растворенного вещества в равновесной капле,  $C_{eq}$ , от начального диаметра капли, показанные на рис. 3. Как и следовало ожидать, концентрации всех хлоридов в равновесных каплях меньше, чем аналогичные величины для остальных веществ (четыре нижние кривые на рис. 3). Это означает, что растворы хлоридов способствуют более интенсивной конденсации пара из восходящего потока влажного воздуха.

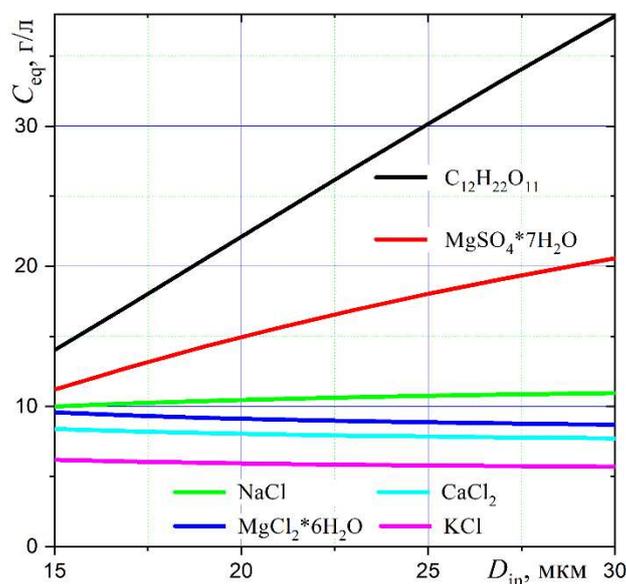


Рис. 3. Зависимости равновесной концентрации растворенных веществ от первоначального диаметра капель.

В некоторых прикладных задачах приходится иметь дело с растворами, содержащими несколько различных растворенных веществ. При этом не исключено неаддитивное взаимодействие даже бинарных растворов, при котором параметр  $\xi$  и концентрация  $C_{eq}$  не являются средними арифметическими значениями аналогичных параметров каждого раствора. Проведенные эксперименты с бинарными растворами хлоридов показали полную аддитивность их параметров. Напротив, результаты, полученные для смесей хлоридов и сахарозы оказались более сложными (см. Табл. 1).

Таблица 1

#### Параметры смеси растворов хлоридов и сахара

	Раствор сахара	Раствор KCl/NaCl	Смесь раствора сахара с раствором KCl/NaCl	
			Формальное среднее	Эксперимент
$\xi$	0.37	1.24/0.94	0.80/0.66	<b>0.95/0.86</b>
$C_{eq}$ , г/л	37.8	5.7/11.0	21.8/24.4	<b>10.3/12.8</b>

Согласно табл. 1, при попарном смешивании в пропорции 1:1 водных растворов хлоридов калия или натрия с раствором сахарозы влияние хлоридов явно преобладает. Объяснение полученного результата не очевидно и может быть основанием для продолжения работы. Возможно, для дальнейшего исследования потребуется недавно предложенная в [48] более простая экспериментальная методика, в которой капли только испаряются, а конденсация пара отсутствует.

## 4. Заключение

С применением ранее разработанной лабораторной методики, использующей левитирующие кластеры из капель различных растворов, проведена серия экспериментов по изучению влияния повышенной концентрации растворенных в воде веществ на конденсационный рост и равновесные параметры капель в стабилизации кластера путем совместного действия инфракрасного нагрева и растворения поваренной соли в слое воды под кластером. Экспериментально показана возможность выхода на равновесную концентрацию примеси в каплях кластера даже для растворенных веществ, которые наиболее сильно препятствуют достижению равновесия. Впервые проведены эксперименты для смесей растворов различных веществ. В ряде случаев наблюдалось неаддитивное влияние компонентов растворов на испарение и стабилизацию капель. Полученные результаты демонстрируют сложное взаимодействие некоторых растворов в малых каплях воды, что указывает на важность использования альтернативных методов и технических средств в дальнейших экспериментальных исследованиях.

## Благодарности и ссылки на гранты

Авторы благодарны Российскому научному фонду за финансовую поддержку работы по гранту № 24-29-00303: <https://rscf.ru/project/24-29-00303/>

## Литература

1. Dombrovsky L. A., Levashov V. Yu., Shoval S., Bormashenko Ed. Progress in understanding of evaporation of droplets: Fundamentals and applications // *Adv. Colloid Interface Sci.* 2025. Vol. 344, 103605. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2025.103605>
2. Ziaee A., Albadarin A. B., Padrela L., Femmer T., O'Reilly E., Walker G. Spray drying of pharmaceuticals and biopharmaceuticals: Critical parameters and experimental process optimization approaches // *Eur. J. Pharm. Sci.* 2019. Vol. 127, pp. 300–318. <https://doi.org/10.1016/j.ejps.2018.10.026>
3. O'Sullivan J. J., Norwood E. A., O'Mahony J. A., Kelly A. L. Atomisation technologies used in spray drying in the dairy industry: A review // *J. Food Eng.* 2019. Vol. 243, pp. 57–69. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.08.027>
4. Baumann J. M., Adam M. S., Wood J. D. Engineering advances in spray drying for pharmaceuticals // *Annu. Rev. Chem. Biomol. Eng.* 2021. Vol. 12, pp. 217–240. <https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-091720-034106>
5. Hardy D. A., Archer J., Lemaitre P., Vehring R., Reid J. P., Walker J. S. High time resolution measurements of droplet evaporation kinetics and particle crystallization // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2021, Vol. 23, No. 34, pp. 18568–18579. <https://doi.org/10.1039/D1CP02840E>
6. Hardy D. A., Robinson J. F., Hildich T. G., Neal E., Lemaitre P., Walker J. S., Reid J. P. Accurate measurements and simulations of the evaporation and trajectories of individual solution droplets // *J. Phys. Chem. B* 2023. Vol. 127, No. 15, pp. 3416–3430. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.2c08909>
7. Leung G. R., Saleeby S. M., Sokolowsky G. A., Freeman S.W., van den Heever S. C. Aerosol–cloud impacts on aerosol detrainment and rainout in shallow maritime tropical clouds // *Atm. Chem. Phys.* 2023. Vol. 23, pp. 5263–5278. <https://doi.org/10.5194/acp-23-5263-2023>
8. Jiang Y., Yang Z., Xu X., Shen D., Jiang T., Xie B., Duan J. Wetting and deposition characteristics of air-assisted spray droplet on large broad-leaved crop canopy // *Front. Plant Sci.* 2023. Vol. 14, 1079703. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1079703>
9. Aminpour Y., Dehghan D., Playán E., Maroufpoor E. Estimation of wind drift and evaporation losses of sprinkler irrigation systems using dimensional analysis // *Agric. Water Manag.* 2023. Vol. 289, 108518. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108518>

10. Spaska O. A., Daszykowski M., Bushuev Yu. G. Evaluation of evaporation fluxes for pesticides and low volatile hazardous materials based on evaporation kinetics of net liquids // *ACS Omega* 2024. Vol. 9, pp. 18617–18623. <http://pubs.acs.org/journal/acsofd>
11. Dombrovsky L. A., Fedorets A. A., Levashov V. Yu., Kryukov A. P., Bormashenko E., Nosonovsky M. Modeling evaporation of water droplets as applied to survival of airborne viruses // *Atmosphere* 2020. Vol. 11. No. 9, 965. <https://doi.org/10.3390/atmos11090965>
12. Hasan S., Sobolev K., Nosonovsky M. Evaporation of droplets capable of bearing viruses airborne and on hydrophobic surfaces // *J. Appl. Phys.* 2021. Vol. 129, 024703. <https://doi.org/10.1063/5.0023501>
13. Kaufman Y. J., Koren I., Remer L. A., Rosenfeld D., Rudich Y. The effect of smoke, dust, and pollution aerosol on shallow cloud development over the Atlantic Ocean // *PNAS*. 2005. Vol. 102. No. 32, pp. 11207–11212. <https://doi.org/10.1073/pnas.0505191102>
14. Nguyen T. B., Lee P. B., Updyke K. M., Bones D. L., Laskin J., Laskin A., Nizkorodov S. A. Formation of nitrogen- and sulfur-containing light-absorbing compounds accelerated by evaporation of water from secondary organic aerosols // *J. Geophys. Res.: Atmospheres* 2012. Vol. 117. No. D1, D01207. <https://doi.org/10.1029/2011JD016944>
15. Karset I. H. H., Gettelman A., Storelvmo T., Alterskjær K., Berntsen T. K. Exploring impacts of size-dependent evaporation and entrainment in a global model // *J. Geophys. Res.: Atmospheres* 2020. Vol. 125, No. 4, e2019JD031817. <https://doi.org/10.1029/2019JD031817>
16. Leung G. R., Saleeby S. M., Sokolowsky G. A., Freeman S.W., van den Heever S. C. Aerosol–cloud impacts on aerosol detrainment and rainout in shallow maritime tropical clouds // *Atm. Chem. Phys.* 2023. Vol. 23, pp. 5263–5278. <https://doi.org/10.5194/acp-23-5263-2023>
17. Назаров В. С. Приложение моментного метода для моделирования гетерогенной конденсации и испарения // *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*. 2021. Т. 22, вып. 5. <http://chemphys.edu.ru/issues/2021-22-5/articles/949/>
18. Корценштейн Н. М., Петров Л. В., Рудов А. В., Ястребов А. К. Численное моделирование объемной конденсации пара вблизи межфазной поверхности при интенсивном испарении // *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*. 2023. Т. 24, вып. 5. <http://chemphys.edu.ru/issues/2023-24-5/articles/1076/>
19. Fedorets A. A., Kolmakov E. E., Medvedev D. N., Mayorov V. O., Dombrovsky L. A. Effect of dissolved substances on the size of water droplets in levitating droplet clusters // *Fluid Dynamics*. 2025. Vol. 60, No. 3, 50. <https://doi.org/10.1134/S001546282560097X>
20. Fedorets A. A., Bormashenko E., Dombrovsky L. A., Nosonovsky M., Droplet clusters: Nature-inspired biological reactors and aerosols // *Philos. Trans. Royal Soc. A*. 2019. Vol. 377. No. 2150, 20190121; DOI: 10.1098/rsta.2019.0121
21. Fedorets A. A., Dombrovsky L. A., Bormashenko E., Nosonovsky M. *Levitating Droplet Clusters* // New York: Begell House, 2023. 196 pp. <https://doi.org/10.1615/978-1-56700-532-5.0>
22. Yarin A. L., Brenn G., Kastner O., Rensink D., Tropea C. Evaporation of acoustically levitated droplets // *J. Fluid Mech.* 1999. Vol. 399, pp. 151–204. <https://doi.org/10.1017/S0022112099006266>
23. Combe N. A., Donaldson D. J. Water evaporation from acoustically levitated aqueous solution droplets // *J. Phys. Chem. A*. 2017. Vol. 121. No. 38, pp. 7197–7204. <https://doi.org/10.1021/acs.jpca.7b08050>
24. Zang D., Yu Y., Chen Z., Li X., Wu H., Geng X. Acoustic levitation of liquid drops: Dynamics, manipulation and phase transition // *Adv. Colloid Interface Sci.* 2017. Vol. 243, pp. 77–85. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2017.03.003>
25. Di W., Zhang Z., Li L., Lin K., Li J., Li X., Binks B. P., Chen X. Shape evolution and bubble formation of acoustically levitating drops // *Phys. Rev. Fluids*. 2018. Vol. 3, 103606. <https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.3.103606>
26. Maruyama Y., Hasegawa K. Evaporation and drying kinetics of water-NaCl droplets via acoustic levitation // *RSC Adv.* 2020. Vol. 10, pp. 1870–1877. <https://doi.org/10.1039/C9RA09395H>

27. Yang Z., Yang S., He Y., Shi Z., Dong T. Evaporation issues of acoustically levitated fuel droplets // *Ultrasonics Sonochem.* 2023. Vol. 98, 106480. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106480>
28. Zeng H., Wakata Y., Chao X., Lia M., Sun C. On evaporation dynamics of an acoustically levitated multicomponent droplet: Evaporation-triggered phase transition and freezing // *J. Colloid Interface Sci.* 2023. Vol. 648, pp. 736–744. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2023.06.012>
29. Chen H., Hong Z., Zang D. New insight into suspended drops: When soft matter meets acoustic levitation // *Droplet.* 2024. Vol. 3. No. 1, e95. <https://doi.org/10.1002/dro2.95>
30. Fedorets A. A., Shcherbakov D. V., Levashov V. Yu., Dombrovsky L. A. Self-stabilization of droplet clusters levitating over heated salt water // *Int. J. Therm. Sci.* 2022. Vol. 182, 107822. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2022.107822>
31. Fedorets A. A., Medvedev D. N., Levashov V. Yu., Dombrovsky L. A. Stabilization of levitating clusters containing saltwater droplets // *Int. J. Therm. Sci.* 2023. Vol. 188, 108222. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2023.108222>
32. Dombrovsky L. A., Fedorets A. A., Medvedev D. N. The use of infrared irradiation to stabilize levitating clusters of water droplets // *Infrared Phys. Techn.* 2016. Vol. 75, pp. 124–132. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2015.12.020>
33. Dombrovsky L. A., Fedorets A. A., Levashov V. Yu., Kryukov A. P., Bormashenko E., Nosonovsky M. Stable cluster of identical water droplets formed under the infrared irradiation: Experimental study and theoretical modeling // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2020. Vol. 161, 120255. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120255>
34. Fedorets A. A., Kolmakov E. E., Dombrovsky L. A. Experimental study of the effect of water salinity on the parameters of an equilibrium droplet cluster levitating over a water layer // *Front. Heat Mass Transf.* 2024. Vol. 22. No. 1, pp. 1–14. <https://doi.org/10.32604/fhmt.2024.049335>
35. Fedorets A. A., Dombrovsky L. A. Generation of levitating droplet clusters above the locally heated water surface: A thermal analysis of modified installation // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2017. Vol. 104, pp. 1268–1274. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.09.087>
36. Hale G. M., Querry M. R. Optical constants of water in the 200 nm to 200  $\mu\text{m}$  wavelength region // *Appl. Optics* 1973. Vol. 12. No. 3, pp. 555–563. <https://doi.org/10.1364/AO.12.000555>
37. Золотарев В. М., Демин А. В. Оптические постоянные воды в широком диапазоне волн  $0.1 \text{ \AA} \div 1 \text{ м}$  // *Оптика и спектроскопия.* 1977. Т. 43. № 2, С. 271–279.
38. Van de Hulst H.C. *Light Scattering by Small Particles.* New York: Dover Publ., 1981. 496 pp.
39. Bohren C. F., Huffman D. R. *Absorption and Scattering of Light by Small Particles.* New York: Wiley, 1998. 530 pp.
40. Mishchenko M. I., Travis L. D. Gustav Mie and the evolving discipline of electromagnetic scattering by particles // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2008. Vol. 89. No. 12, pp. 1853–1862. <https://doi.org/10.1175/2008BAMS2632.1>
41. Gouesbet G., Lock J. A., Gréhan G. Generalized Lorenz–Mie theories and description of electromagnetic arbitrary shaped beams: Localized approximations and localized beam models, a review // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2011. V. 112, pp. 1–27. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2010.08.012>
42. Hergert W., Wriedt T. *The Mie Theory: Basics and Applications.* Berlin: Springer, 2012. 273 pp.
43. Drolen B. L., Tien C. L. Independent and dependent scattering in packed-sphere systems // *J. Thermophys. Heat Transfer.* 1987. Vol. 1, No. 1, pp. 63–68. <https://doi.org/10.2514/3.8>
44. Mishchenko M. I. *Electromagnetic Scattering by Particles and Particle Groups: An Introduction.* Cambridge (UK): Cambridge University Press, 2014. 450 p.
45. Mishchenko M. I. “Independent” and “dependent” scattering by particles in a multi-particle group // *OSA Continuum* 2018. Vol. 1. No. 1, pp. 243–260. <https://doi.org/10.1364/OSAC.1.000243>
46. Fell C. J. D., Hutchison Y. P. Diffusion coefficients for sodium and potassium chlorides in water at elevated temperatures // *J. Chem. Eng. Data* 1971. Vol. 16. No. 4, pp. 427–429. <https://doi.org/10.1021/je60051a005>

47. Hamann C. H., Hamnett A., Vielstich W. *Electrochemistry*. Second Edition. Weinheim (Germany): Wiley-VCH, 2007. 550 p.
48. Fedorets A. A., Kolmakov E. E., Nasyrova A. V., Medvedev D. N., Mayorov V. O., Levashov V. Yu., Dombrovsky L. A. Experimental method for studying the effect of dissolved substances on the evaporation rate of water droplets suspended in air // *Front. Heat Mass Transf.* 2025. **In press** (published online 07 August 2025). <https://doi.org/10.32604/fhmt.2025.068244>

## References

1. Dombrovsky L. A., Levashov V. Yu., Shoval S., Bormashenko Ed., Progress in understanding of evaporation of droplets: Fundamentals and applications, *Adv. Colloid Interface Sci.*, 2025, vol. 344, 103605. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2025.103605>
2. Ziaee A., Albadarin A. B., Padrela L., Femmer T., O'Reilly E., Walker G., Spray drying of pharmaceuticals and biopharmaceuticals: Critical parameters and experimental process optimization approaches, *Eur. J. Pharm. Sci.*, 2019, vol. 127, pp. 300–318. <https://doi.org/10.1016/j.ejps.2018.10.026>
3. O'Sullivan J. J., Norwood E. A., O'Mahony J. A., Kelly A. L., Atomisation technologies used in spray drying in the dairy industry: A review, *J. Food Eng.*, 2019, vol. 243, pp. 57–69. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.08.027>
4. Baumann J. M., Adam M. S., Wood J. D., Engineering advances in spray drying for pharmaceuticals, *Annu. Rev. Chem. Biomol. Eng.*, 2021, vol. 12, pp. 217–240. <https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-091720-034106>
5. Hardy D. A., Archer J., Lemaitre P., Vehring R., Reid J. P., Walker J. S., High time resolution measurements of droplet evaporation kinetics and particle crystallization, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2021, vol. 23, no. 34, pp. 18568–18579. <https://doi.org/10.1039/D1CP02840E>
6. Hardy D. A., Robinson J. F., Hildich T. G., Neal E., Lemaitre P., Walker J. S., Reid J. P., Accurate measurements and simulations of the evaporation and trajectories of individual solution droplets, *J. Phys. Chem. B*, 2023, vol. 127, no. 15, pp. 3416–3430. <https://doi.org/10.1021/acs.jpccb.2c08909>
7. Leung G. R., Saleeby S. M., Sokolowsky G. A., Freeman S.W., van den Heever S. C., Aerosol–cloud impacts on aerosol detrainment and rainout in shallow maritime tropical clouds, *Atm. Chem. Phys.*, 2023, vol. 23, pp. 5263–5278. <https://doi.org/10.5194/acp-23-5263-2023>
8. Jiang Y., Yang Z., Xu X., Shen D., Jiang T., Xie B., Duan J., Wetting and deposition characteristics of air-assisted spray drop-let on large broad-leaved crop canopy, *Front. Plant Sci.*, 2023, vol. 14, 1079703. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1079703>
9. Aminpour Y., Dehghan D., Playán E., Maroufpoor E., Estimation of wind drift and evaporation losses of sprinkler irrigation systems using dimensional analysis, *Agric. Water Manag.*, 2023, vol. 289, 108518. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108518>
10. Spaska O. A., Daszykowski M., Bushuev Yu. G., Evaluation of evaporation fluxes for pesticides and low volatile hazardous materials based on evaporation kinetics of net liquids, *ACS Omega*, 2024, vol. 9, pp. 18617–18623. <http://pubs.acs.org/journal/acsodf>
11. Dombrovsky L. A., Fedorets A. A., Levashov V. Yu., Kryukov A. P., Bormashenko E., Nosonovsky M., Modeling evaporation of water droplets as applied to survival of airborne viruses, *Atmosphere*, 2020, vol. 11, no. 9, 965. <https://doi.org/10.3390/atmos11090965>
12. Hasan S., Sobolev K., Nosonovsky M., Evaporation of droplets capable of bearing viruses airborne and on hydrophobic surfaces, *J. Appl. Phys.*, 2021, vol. 129, 024703. <https://doi.org/10.1063/5.0023501>
13. Kaufman Y. J., Koren I., Remer L. A., Rosenfeld D., Rudich Y., The effect of smoke, dust, and pollution aerosol on shallow cloud development over the Atlantic Ocean, *PNAS*, 2005, vol. 102, no. 32, pp. 11207–11212. <https://doi.org/10.1073/pnas.0505191102>

14. Nguyen T. B., Lee P. B., Updyke K. M., Bones D. L., Laskin J., Laskim A., Nizkorodov S. A., Formation of nitrogen- and sulfur-containing light-absorbing compounds accelerated by evaporation of water from secondary organic aerosols, *J. Geophys. Res.: Atmospheres* 2012, vol. 117, no. D1, D01207. <https://doi.org/10.1029/2011JD016944>
15. Karset I. H. H., Gettelman A., Storelvmo T., Alterskjær K., Berntsen T. K., Exploring impacts of size-dependent evaporation and entrainment in a global model, *J. Geophys. Res.: Atmospheres*, 2020, vol. 125, no. 4, e2019JD031817. <https://doi.org/10.1029/2019JD031817>
16. Leung G. R., Saleeby S. M., Sokolowsky G. A., Freeman S.W., van den Heever S. C., Aerosol–cloud impacts on aerosol detrainment and rainout in shallow maritime tropical clouds, *Atm. Chem. Phys.*, 2023, vol. 23, pp. 5263–5278. <https://doi.org/10.5194/acp-23-5263-2023>
17. Nasarov V. S., The moment method applying for modeling heterogeneous condensation and evaporation, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2021, vol. 22, no. 5. [in Russian]. <http://chemphys.edu.ru/issues/2021-22-5/articles/949>
18. Kortsenstein N. M., Petrov L. V., Rudov A. V., Yastrebov A. K., Numerical simulation of vapor bulk condensation near the interphase surface under intensive evaporation conditions, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2023, vol. 24, no. 5. [in Russian]. <http://chemphys.edu.ru/issues/2023-24-5/articles/1076>
19. Fedorets A. A., Kolmakov E. E., Medvedev D. N., Mayorov V. O., Dombrovsky L. A., Effect of dissolved substances on the size of water droplets in levitating droplet clusters, *Fluid Dynamics*, 2025, vol. 60, no. 3, 50. <https://doi.org/10.1134/S001546282560097X>
20. Fedorets A. A., Bormashenko E., Dombrovsky L. A., Nosonovsky M., Droplet clusters: Nature-inspired biological reactors and aerosols, *Philos. Trans. Royal Soc. A*, 2019, vol. 377, no. 2150, 20190121. DOI: 10.1098/rsta.2019.0121
21. Fedorets A. A., Dombrovsky L. A., Bormashenko E., Nosonovsky M., *Levitating Droplet Clusters*, New York: Begell House, 2023, 196 pp. <https://doi.org/10.1615/978-1-56700-532-5.0>
22. Yarin A. L., Brenn G., Kastner O., Rensink D., Tropea C., Evaporation of acoustically levitated droplets, *J. Fluid Mech.*, 1999, vol. 399, pp. 151–204. <https://doi.org/10.1017/S0022112099006266>
23. Combe N. A., Donaldson D. J., Water evaporation from acoustically levitated aqueous solution droplets, *J. Phys. Chem. A*, 2017, vol. 121, no. 38, pp. 7197–7204. <https://doi.org/10.1021/acs.jpca.7b08050>
24. Zang D., Yu Y., Chen Z., Li X., Wu H., Geng X., Acoustic levitation of liquid drops: Dynamics, manipulation and phase transition, *Adv. Colloid Interface Sci.*, 2017, vol. 243, pp. 77–85. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2017.03.003>
25. Di W., Zhang Z., Li L., Lin K., Li J., Li X., Binks B. P., Chen X., Shape evolution and bubble formation of acoustically levitating drops, *Phys. Rev. Fluids*, 2018, vol. 3, 103606. <https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.3.103606>
26. Maruyama Y., Hasegawa K., Evaporation and drying kinetics of water-NaCl droplets via acoustic levitation, *RSC Adv.*, 2020, vol. 10, pp. 1870–1877. <https://doi.org/10.1039/C9RA09395H>
27. Yang Z., Yang S., He Y., Shi Z., Dong T., Evaporation issues of acoustically levitated fuel droplets, *Ultrasonics Sonochem.*, 2023, vol. 98, 106480. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106480>
28. Zeng H., Wakata Y., Chao X., Lia M., Sun C., On evaporation dynamics of an acoustically levitated multicomponent droplet: Evaporation-triggered phase transition and freezing, *J. Colloid Interface Sci.*, 2023, vol. 648, pp.736–744. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2023.06.012>
29. Chen H., Hong Z., Zang D., New insight into suspended drops: When soft matter meets acoustic levitation, *Droplet*, 2024, vol. 3, no. 1, e95. <https://doi.org/10.1002/dro2.95>
30. Fedorets A. A., Shcherbakov D. V., Levashov V. Yu., Dombrovsky L. A., Self-stabilization of droplet clusters levitating over heated salt water, *Int. J. Therm. Sci.*, 2022, vol. 182, 107822. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2022.107822>

31. Fedorets A. A., Medvedev D. N., Levashov V. Yu., Dombrovsky L. A., Stabilization of levitating clusters containing saltwater droplets, *Int. J. Therm. Sci.*, 2023, vol. 188, 108222. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2023.108222>
32. Dombrovsky L. A., Fedorets A. A., Medvedev D. N., The use of infrared irradiation to stabilize levitating clusters of water droplets, *Infrared Phys. Techn.*, 2016, vol. 75, pp. 124–132. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2015.12.020>
33. Dombrovsky L. A., Fedorets A. A., Levashov V. Yu., Kryukov A. P., Bormashenko E., Nosonovsky M., Stable cluster of identical water droplets formed under the infrared irradiation: Experimental study and theoretical modeling, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2020, vol. 161, 120255. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120255>
34. Fedorets A. A., Kolmakov E. E., Dombrovsky L. A., Experimental study of the effect of water salinity on the parameters of an equilibrium droplet cluster levitating over a water layer, *Front. Heat Mass Transf.*, 2024, vol. 22, no. 1, pp. 1–14. <https://doi.org/10.32604/fhmt.2024.049335>
35. Fedorets A. A., Dombrovsky L. A., Generation of levitating droplet clusters above the locally heated water surface: A thermal analysis of modified installation, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2017, vol. 104, pp. 1268–1274. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.09.087>
36. Hale G. M., Querry M. R., Optical constants of water in the 200 nm to 200  $\mu\text{m}$  wavelength region, *Appl. Optics*, 1973, vol. 12, no. 3, pp. 555–563. <https://doi.org/10.1364/AO.12.000555>
37. Zolotarev V. M., Demin A. V., Optical constants of water over the broad  $0.1\text{\AA}\div 1\text{ m}$  wavelength range, *Opt. Spectrosc.*, 1977, vol. 43, pp. 271–277 [in Russian].
38. Van de Hulst H.C., *Light Scattering by Small Particles*, New York: Dover Publ., 1981. 496 p.
39. Bohren C. F., Huffman D. R., *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*, New York: Wiley, 1998. 530 p.
40. Mishchenko M. I., Travis L. D., Gustav Mie and the evolving discipline of electromagnetic scattering by particles, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 2008, vol. 89, no. 12, pp. 1853–1862. <https://doi.org/10.1175/2008BAMS2632.1>
41. Gouesbet G., Lock J. A., Gréhan G., Generalized Lorenz–Mie theories and description of electromagnetic arbitrary shaped beams: Localized approximations and localized beam models, a review, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, 2011, vol. 112, pp. 1–27. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2010.08.012>
42. Hergert W., Wriedt T., *The Mie Theory: Basics and Applications*. Berlin: Springer, 2012. 273 pp.
43. Drolen B. L., Tien C. L., Independent and dependent scattering in packed-sphere systems, *J. Thermophys. Heat Transfer*, 1987, vol. 1, no. 1, pp. 63–68. <https://doi.org/10.2514/3.8>
44. Mishchenko M. I., *Electromagnetic Scattering by Particles and Particle Groups: An Introduction*, Cambridge (UK): Cambridge University Press, 2014. 450 p.
45. Mishchenko M. I., “Independent” and “dependent” scattering by particles in a multi-particle group, *OSA Continuum*, 2018, vol. 1, no. 1, pp. 243–260. <https://doi.org/10.1364/OSAC.1.000243>
46. Fell C. J. D., Hutchison Y. P., Diffusion coefficients for sodium and potassium chlorides in water at elevated temperatures, *J. Chem. Eng. Data*, 1971, vol. 16, no. 4, pp. 427–429. <https://doi.org/10.1021/je60051a005>
47. Hamann C. H., Hamnett A., Vielstich W., *Electrochemistry. Second Edition*. Weinheim (Germany): Wiley-VCH, 2007. 550 p.
48. Fedorets A. A., Kolmakov E. E., Nasyrova A. V., Medvedev D. N., Mayorov V. O., Levashov V. Yu., Dombrovsky L. A., Experimental method for studying the effect of dissolved substances on the evaporation rate of water droplets suspended in air, *Front. Heat Mass Transf.*, 2025, **in press** (published online 07 August 2025), <https://doi.org/10.32604/fhmt.2025.068244>

Статья поступила в редакцию 19 августа 2025 г.