

Effect of Dissolved Substances on the Size of Water Droplets in Levitating Droplet Clusters

A. A. Fedorets¹, E. E. Kolmakov¹, D. N. Medvedev¹,
V. O. Mayorov², L. A. Dombrovsky^{1,3}

¹ University of Tyumen, Tyumen, 625005, Russia.

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russia

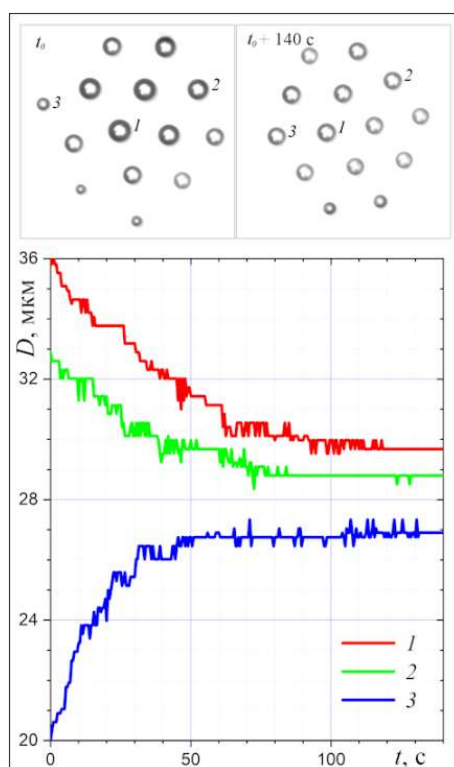
³ Joint Institute for High Temperatures, Moscow, 111116, Russia

fedorets_alex@mail.ru, eekolmakov@mail.ru, dn.medv@yandex.ru,
vyacheslav7794@gmail.com, ldombr@yandex.ru

Abstract

A laboratory technique has been developed to study the effect of dissolved substances on the condensational growth of spherical droplets of water in a self-arranged droplet cluster levitating above a locally heated water surface, as well as on the equilibrium droplet size obtained by infrared heating of the cluster. Inorganic salts such as potassium and sodium chlorides were shown to significantly influence the condensation/evaporation process of water droplets even at low solute concentrations. In contrast, the influence of typical substances used in plant treatments is negligible. The new experimental results can be used in modeling various technological processes involving aqueous aerosols. These results might also be useful in studies of moisture transfer and precipitation formation in the atmosphere.

Keywords: water droplets, droplet cluster, aqueous solutions, evaporation.



Images of a droplet cluster of KCl solution droplets (top) and the change in size of three selected droplets over time

УДК 544.772.3

Влияние растворенных веществ на размер капель воды в левитирующих капельных кластерах

А. А. Федорец¹, Э. Э. Колмаков¹, Д. Н. Медведев¹,
В. О. Майоров², Л. А. Домбровский^{1,3}

¹ ТюмГУ, Россия, Тюмень, 625003, ул. Володарского, д. 6

² МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия, Москва, 119991, Ленинские горы, д. 1

³ 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

Разработана лабораторная методика изучения влияния растворенных веществ на конденсационный рост сферических капель воды в упорядоченном капельном кластере, левитирующем над локально нагретой поверхностью воды, а также на равновесный размер капель, получаемых при инфракрасном нагреве кластера. Было показано, что неорганические соли, такие как хлориды калия и натрия, значительно влияют на процесс конденсации/испарения капель воды даже при низких концентрациях соли. В отличие от них, влияние ряда веществ, используемых при обработке растений, незначительно. Новые экспериментальные результаты могут быть использованы при моделировании различных технологических процессов с участием водных аэрозолей. Эти результаты также могут быть полезны при изучении переноса влаги и образования осадков в атмосфере.

Ключевые слова: капли воды, капельный кластер, водные растворы, испарение.

1. Введение

Изучение испарения взвешенных в воздухе капель жидкостей представляет интерес для решения самых разных задач. Из промышленных приложений наиболее известны получение порошков лекарств в фармацевтической промышленности и, например, распыление топлива в автомобильных и жидкостных ракетных двигателях. Конечно, следует назвать опрыскивание растений специальными растворами как метод борьбы с болезнями и насекомыми-вредителями (намеченное участие авторов статьи в моделировании этой агрономической задачи послужило мотивацией данной экспериментальной работы). Подробности на эту тему, а также современные лабораторные методы и вычислительные модели можно найти в опубликованных обзорных статьях [1–8].

В последние годы внимание авторов и коллег привлекло исследование переноса вирусов в микроскопических каплях влаги, которое, в частности, помогло понять физическую причину сезонного характера вирусных эпидемий [9, 10]. Природные процессы в атмосфере и поверхностном слое океана, которые во многом определяют формирование и известное значительное изменение климата на нашей планете, связаны с особенностями испарения капель морской воды и разнообразных (часто с природными или техногенными загрязнениями) капель воды в облачной атмосфере [11–14]. Следует отметить, что задачи, связанные с испарением жидкостей и конденсацией пара остаются одной из тем современных исследований [15, 16].

Очевидно, что разработка и применение современных физико-химических методов изучения конденсации и испарения микроскопических капель воды с растворенными в них веществами может дать качественно новую информацию общего характера. Весьма заманчивой представляется возможность работы со стабильно левитирующими малыми каплями, поведение которых может контролироваться с использованием современных оптических методов. Открытое немногим более 20 лет назад формирование относительно устойчивых капельных кластеров регулярной структуры над локально нагретой поверхностью воды или другой испаряющейся жидкости дает такую возможность. В результате экспериментальной и теоретической работы по изучению поведения капельных кластеров удалось научиться ими управлять и работать с задаваемым количеством стабильно левитирующих капель разного химического состава. История открытия этого явления, необычные свойства капельных кластеров и управление ими для решения различных прикладных задач изложены в монографии [17], а также в краткой обзорной статье [18]. В данной работе капельные кластеры впервые использованы для разработки лабораторной методики, позволяющей получить количественные данные по влиянию различных растворимых примесей на конденсационный рост и испарение малых капель воды.

Заметим, что работа с контролируруемыми капельными кластерами имеет очевидные преимущества по сравнению с использованием акустической левитации [19–23]: (1) капли не деформируются, оставаясь строго сферическими, (2) можно работать с равновесными каплями, размер, состав и температура которых не изменяются в течение эксперимента, и (3) составляющие стабильный кластер равновесные капли различного размера и состава наблюдаются одновременно.

2. Экспериментальная методика

Эксперименты проводились на созданной ранее лабораторной установке, подробно описанной в статье [24], где впервые был обнаружен эффект самопроизвольной стабилизации кластера из капель чистой воды, левитирующих над слоем соленой воды, а также в статье [25], где рассматривалась инфракрасная стабилизация кластера из соленых капель над слоем чистой воды. Во всех опытах в слой воды добавлялось поверхностно-активное вещество (лаурилсульфат натрия, 0.02 г/л), необходимое для подавления термокапиллярного течения [26]. Для усиления эффекта стабилизации капельного кластера, в данной работе в слой воды добавлялось также немного поваренной соли (концентрация NaCl составляла 1 г/л). Для предотвращения существенного повышения концентрации соли в области локального нагрева из-за испарения воды [27] слой соленой воды непрерывно обновлялся путем подачи раствора со скоростью 0.1 ± 0.01 г/мин. Температура поверхности воды под кластером (в области локального лазерного нагрева) поддерживалась на уровне $65 \pm 1^\circ\text{C}$. Расчетное исследование осесимметричного поля температуры нагреваемых лазером подложки из ситалла и слоя воды представлено в статье [28].

Для печати исходного кластера, капли которого затем росли благодаря конденсации пара, поступающего от слоя нагретой воды, применялись ультразвуковые диспенсеры (Altrasonic, Китай). Во всех экспериментах кластер печатался из водных растворов с одинаковой концентрацией растворенной примеси $C_{\text{sol}} = 2.5 \pm 0.05$ г/л. Это типичная концентрация распыляемых растворов химических средств защиты растений. В серии сравнительных лабораторных экспериментов использовались растворы NaCl и KCl, раствор сахара, а также растворы фунгицидов «Терапевт Про» и «Диамонд супер» (<https://www.pesticidy.ru/pesticide/terapevt-pro> и <https://www.pesticidy.ru/pesticide/dajmond-super>).

Для стабилизации капельного кластера (во избежание излишнего конденсационного роста капель и их последующей коалесценции со слоем воды) использовались четыре миниатюрных источника инфракрасного 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 пучка излучения проходила через капельный кластер. В результате, кластер и слой воды в области локализации кластера освещались инфракрасным излучением почти равномерно (параметры ЕК-8520 приведены в [29]). Спектр инфракрасного излучения примерно соответствует тепловому излучению абсолютно черного тела при температуре 1223 К и включает полосу поглощения воды на длине волны 3 мкм [30, 31]. Благодаря этому даже очень мелкие капли воды поглощают значительную часть падающего на них излучения. Поглощение излучения уединенными сферическими каплями воды рассчитывается по теории Ми [32–34]. При этом влияние соседних капель кластера пренебрежимо мало, поскольку в рассматриваемой задаче применима так называемая гипотеза независимого рассеяния [35, 36]. Расчеты равновесных размеров капель стабилизированных капельных кластеров с учетом поглощения инфракрасного излучения хорошо согласуются с экспериментальными данными [37].

В данной работе эксперименты проводились при фиксированной мощности источников инфракрасного излучения (напряжение питающего тока 3.00 ± 0.01 В, поток излучения в области локализации кластера – 1.24 мВт/мм²). Температура поверхности слоя воды под капельным кластером контролировалась пирометрическим датчиком CТL-CF1-C3 (Micro-Epsilon, США, рабочий спектральный диапазон 8 до 14 мкм, NETD 0.1° С).

В каждом эксперименте видеозапись начиналась непосредственно перед моментом 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. Полученная видеозапись обрабатывалась специально составленной компьютерной программой, которая позволяет отслеживать каждую каплю и изменение ее диаметра с течением времени [17]. Далее используются следующие обозначения: D_{in} – начальный диаметр капли (в момент печати исходного кластера), D_{eq} – равновесный диаметр капли (после стабилизации кластера).

3. Результаты измерений

На рис. 1 приведены данные для кластеров из чистой воды и раствора КСl, иллюстрирующие влияние растворенного вещества на конденсационный рост капель и их испарение. Следует отметить, что особенностью используемого ультразвукового диспенсера, применяемого для “печати” исходного кластера, является существенный разброс размеров капель. Благодаря этому, в разных каплях исходного кластера содержится различное количество растворенного вещества. Результаты измерений приведены для трех капель первоначально разного размера. Масштаб изображений кластера в верхней части рис. 1 не указан, поскольку размеры отмеченных цифрами капель кластера достаточно точно указаны на графиках в нижней части рис. 1. Пульсации кривых $D(t)$ на этом рисунке имеют амплитуду на уровне 1 мкм и объясняются погрешностью измерений.

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 $V_{in} = \pi D_{in}^3/6$ – начальный объем капли. Чем больше влияние примеси, тем сильнее отличаются размеры равновесных капель в стабилизированном кластере (рис. 1, *b*). Поэтому обработка одной видеозаписи дает не одну экспериментальную точку, а зависимость диаметра равновесных капель от их начального размера (рис. 2). Показанные на рис. 2 зависимости $D_{eq}(D_{in})$ допускают линейную интерполяцию. При этом тангенс угла наклона K приближенной линейной зависимости характеризует влияние примеси на конденсационный рост и испарение капли. Чем сильнее это влияние, тем больше значение безразмерного параметра K . Для чистой воды $K = 0$, для раствора сахара $K = 0.05 \pm 0.01$, тогда как для раствора КСl имеем $K = 0.24 \pm 0.01$. Значительно более

сильное влияние солей NaCl и KCl на размер капель объясняется очень малым коэффициентом диффузии этих веществ в воде [38, 39], что приводит к повышенной концентрации соли у поверхности испаряющегося раствора и значительному уменьшению испарения [24, 25].

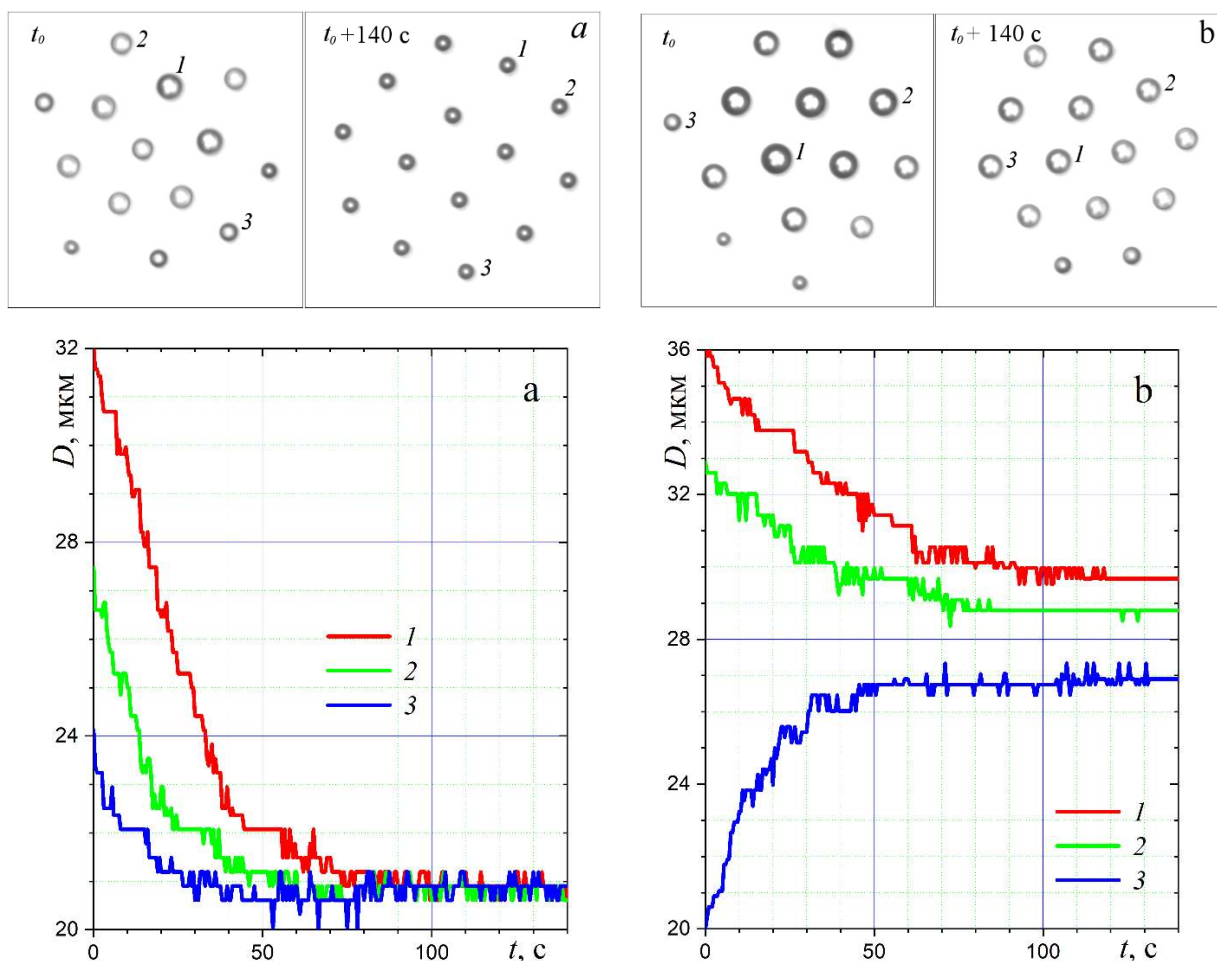


Рис. 1. Изображения капельного кластера (сверху) и изменение размера трех выбранных капель с течением времени: (а) – вода; (б) – раствор KCl при $C_{sol} = 2.5$ г/л

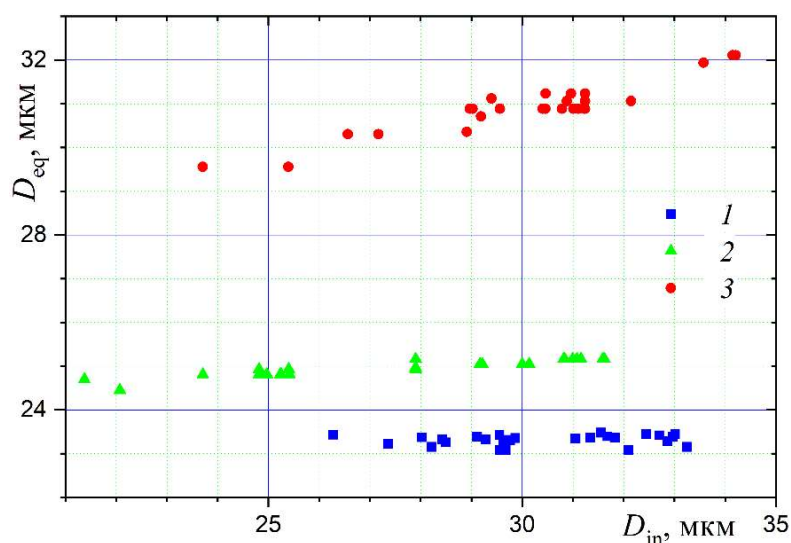


Рис. 2. Зависимости равновесного диаметра капли от ее начального диаметра: 1 – чистая вода, 2 – раствор сахара, 3 – раствор KCl

При известном коэффициенте K несложно получить зависимости, связывающие массу растворенного в капле вещества с диаметром равновесной капли D_{eq} и с равновесной концентрацией примеси $C_{s,eq}$ (рис. 3). В частности, оказывается, что влияние рассмотренных фунгицидов на конденсационный рост и испарение капель незначительно. Поэтому расчет времени испарения, скорости осаждения и других параметров распыляемых капель аэрозоля, содержащих эти препараты, может проводиться так же, как для чистой воды. В этом отношении, ситуация оказывается такой же, как для рассматривавшихся авторами в работе [9] микронных капель воды, содержащих болезнетворные вирусы. Свойства водных аэрозолей хорошо изучены, и это значительно упрощает моделирование процесса аэрозольной обработки сельскохозяйственных культур. Вместе с тем, согласно расчетам [9], температура и, в особенности, влажность воздуха сильно влияют на испарение капель, а следовательно, на эффективность обработки растений. Разумеется, это влияние вполне поддается расчету с использованием кинетической модели испарения, учитывающей слой Кнудсена на поверхности капли [40, 41].

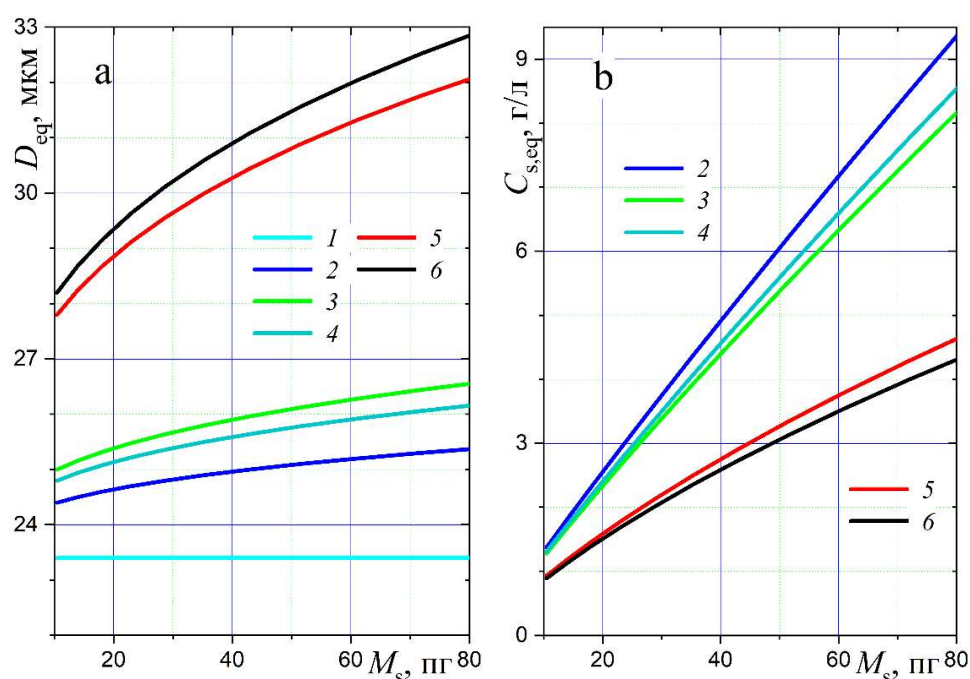


Рис. 3. Расчетные зависимости (а) равновесного диаметра капель и (б) равновесной концентрации раствора от массы растворенного в капле вещества: 1 – чистая вода, 2 – сахар, 3 – «Терапевт Про», 4 – «Диамонд супер», 5 – NaCl, 6 – KCl

4. Заключение

Опыт управления капельными кластерами, образующимися над локально нагреваемой поверхностью воды, и наблюдения стабильных кластеров из равновесных капель различного размера оказался весьма полезным для лабораторного изучения влияния различных растворенных веществ на испарение малых капель. Предложенный в работе экспериментально определяемый безразмерный коэффициент оказался удобным для разделения практически важных растворенных веществ на две группы. Как и ожидалось в связи с ранее полученными результатами, к наиболее «активной» первой группе, относятся неорганические соли NaCl и KCl, которые отличаются малым коэффициентом диффузии в воде и значительным влиянием на испарение капель. Испарение капель из таких водных растворов затруднено из-за повышения локальной концентрации соли у поверхности капли. Вторая группа, к которой относятся рассмотренные растворы веществ, применяемых при опылении растений, напротив,

дает капли, которые испаряются почти так же, как и капли чистой воды. Последнее обстоятельство значительно упрощает моделирование микрокапельного орошения растений, которое широко используется в сельском хозяйстве. Данная работа была предпринята, главным образом, в связи с потребностями агрономических технологий и полученный результат является благоприятным для последующего моделирования и совершенствования аэрозольных методов обработки растений.

Вместе с тем, физические эффекты, сопутствующие испарению капель соленой воды, исключительно важны не только в промышленных технологиях, но и в связи с изучением приповерхностного слоя океана, который во многом определяет климат на нашей планете. Некоторые связанные с этим вопросы, в частности, электризация испаряющихся капель, по мнению авторов, также могут изучаться с использованием левитирующих капельных кластеров.

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. 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>
2. 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>
3. 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>
4. 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>
5. 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>
6. Li H., Cryer S., Raymond J., Acharya L. Interpreting atomization of agricultural spray image patterns using latent Dirichlet allocation techniques // *Artif. Intell. Agricult.* 2020. Vol. 4, pp. 253–261. <https://doi.org/10.1016/j.aiia.2020.10.004>
7. 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>
8. Lankinen Å., Witzell J., Aleklett K., Furenhed S., Green K. K., Latz M., Liljeroth E., Larsson R., Löfkvist K., Meijer J., Menkis A., Ninkovic V., Olson Å., Grenville-Briggs L. Challenges and opportunities for increasing the use of low-risk plant protection products in sustainable production. A review // *Agron. Sustain. Dev.* 2024. Vol. 44, 21. <https://doi.org/10.1007/s13593-024-00957-5>
9. 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>
10. 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>

11. 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>
12. 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. V. 117, No. D1, D01207. <https://doi.org/10.1029/2011JD016944>
13. 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>
14. 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>
15. 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/>
16. 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/>
17. 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>
18. Fedorets A. A., Dombrovsky L. A. Levitating droplet clusters: from the discovery to potential applications // *Academia Engineering* 2023. Vol. 1, No. 1, 6093. <https://doi.org/10.20935/AcadEng6093>
19. 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>
20. 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>
21. 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>
22. 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>
23. 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. Coll. Interface Sci.* 2023. Vol. 648, pp.736–744. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2023.06.012>
24. 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>
25. 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>
26. Fedorets A. A., Shcherbakov D. V., Dombrovsky L. A., Bormashenko E., Nosonovsky M. Impact of surfactants on the formation and properties of droplet clusters // *Langmuir* 2020. Vol. 36, No. 37, pp. 11154–11160. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.0c02241>
27. 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>

28. 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>
29. 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>
30. Hale G. M., Querry M. R. Optical constants of water in the 200 nm to 200 μm wavelength region // *Appl. Optics* 1973. Vol. 12, No. 3, pp. 555–563. <https://doi.org/10.1364/AO.12.000555>
31. 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.
32. Van de Hulst H.C. *Light Scattering by Small Particles.* New York: Dover Publ., 1981. 496 pp.
33. Bohren C. F., Huffman D. R., *Absorption and Scattering of Light by Small Particles.* New York, Wiley, 1998. 530 pp.
34. Hergert W., Wriedt T. *The Mie Theory: Basics and Applications.* Berlin: Springer, 2012. 273 pp.
35. Mishchenko M. I. *Electromagnetic Scattering by Particles and Particle Groups: An Introduction.* Cambridge (UK): Cambridge University Press, 2014. 450 pp.
36. 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>
37. 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>
38. 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>
39. Hamann C. H., Hamnett A., Vielstich W. *Electrochemistry.* Second Edition. Weinheim (Germany): Wiley-VCH, 2007. 550 pp.
40. Левашов В. Ю., Крюков А. П. Численное моделирование испарения капель воды в парогазовую среду // *Коллоидный журнал.* 2017. Т. 79, № 5, С. 606–612.
41. Levashov V. Y., Kryukov A. P., Shishkova I. N. Influence of the noncondensable component on the characteristics of temperature change and the intensity of water droplet evaporation // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2018. Vol. 127, pp. 115–122. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.07.069>

References

1. 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, v. 127, pp. 300–318. <https://doi.org/10.1016/j.ejps.2018.10.026>
2. 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>
3. 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>
4. 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>
5. 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>

6. Li H., Cryer S., Raymond J., Acharya L., Interpreting atomization of agricultural spray image patterns using latent Dirichlet allocation techniques, *Artif. Intell. Agricult.*, 2020, vol. 4, pp. 253–261. <https://doi.org/10.1016/j.aiia.2020.10.004>
7. 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>
8. Lankinen Å., Witzell J., Aleklett K., Furenhed S., Green K. K., Latz M., Liljeroth E., Larsson R., Löfkvist K., Meijer J., Menkis A., Ninkovic V., Olson Å., Grenville-Briggs L., Challenges and opportunities for increasing the use of low-risk plant protection products in sustainable production. A review, *Agron. Sustain. Dev.*, 2024, vol. 44, 21. <https://doi.org/10.1007/s13593-024-00957-5>
9. 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>
10. 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>
11. 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>
12. 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, v. 117, n. D1, D01207. <https://doi.org/10.1029/2011JD016944>
13. 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>
14. 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>
15. 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>
16. 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>
17. 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>
18. Fedorets A. A., Dombrovsky L. A., Levitating droplet clusters: from the discovery to potential applications, *Academia Engineering*, 2023, vol. 1, no. 1, 6093. <https://doi.org/10.20935/AcadEng6093>
19. 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>
20. 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>
21. 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>
22. 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>
23. 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. Coll. Interface Sci.*, 2023, vol. 648, pp.736–744. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2023.06.012>

24. 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>
25. 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>
26. Fedorets A. A., Shcherbakov D. V., Dombrovsky L. A., Bormashenko E., Nosonovsky M., Impact of surfactants on the formation and properties of droplet clusters, *Langmuir*, 2020, vol. 36, no. 37, pp. 11154–11160. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.0c02241>
27. 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>
28. 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>
29. 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>
30. Hale G. M., Querry M. R., Optical constants of water in the 200 nm to 200 μm wavelength region, *Appl. Optics*, 1973, vol. 12, no. 3, pp. 555–563. <https://doi.org/10.1364/AO.12.000555>
31. Zolotarev V. M., Demin A. V., Optical constants of water over the broad 0.1 \AA –1 m wavelength range, *Opt. Spectrosc.*, 1977, vol. 43, pp. 271–277 [in Russian].
32. Van de Hulst H.C., *Light Scattering by Small Particles*, New York: Dover Publ., 1981. 496 pp.
33. Bohren C. F., Huffman D. R., *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*, New York, Wiley, 1998. 530 pp.
34. Hergert W., Wriedt T., *The Mie Theory: Basics and Applications*. Berlin: Springer, 2012. 273 pp.
35. Mishchenko M. I. *Electromagnetic Scattering by Particles and Particle Groups: An Introduction*, Cambridge (UK): Cambridge University Press, 2014. 450 pp.
36. 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>
37. 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>
38. 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>
39. Hamann C. H., Hamnett A., Vielstich W., *Electrochemistry. Second Edition*. Weinheim (Germany): Wiley-VCH, 2007. 550 pp.
40. Levashov V. Yu., Kryukov A. P., Numerical simulation of water droplet evaporation into vapor–gas Medium, *Colloid J.*, 2017, vol. 79, pp. 647–653. <https://doi.org/10.1134/S1061933X1705009X>
41. Levashov V. Y., Kryukov A. P., Shishkova I. N., Influence of the noncondensable component on the characteristics of temperature change and the intensity of water droplet evaporation, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2018, vol. 127, pp. 115–122. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.07.069>

Статья поступила в редакцию 22 октября 2024 г.