03

Электрокоалесценция капельного кластера с подстилающим слоем воды

© А.В. Шавлов, И.В. Соколов, В.А. Джуманджи, Е.С. Яковенко

Институт криосферы земли Тюменского научного центра СО РАН,
625026 Тюмень, Россия
e-mail: shavlov@ikz.ru

Поступило в Редакцию 19 июня 2025 г.
В окончательной редакции 14 января 2026 г.
Принято к публикации 2 марта 2026 г.

Впервые измерена напряженность электрического поля, при которой происходит коалесценция капельного кластера с подстилающим слоем воды, в зависимости от среднего радиуса капель в кластере. Установлено, что поверхность подстилающей воды электрически заряжена и влияет на значение напряженности поля, инициирующего коалесценцию. Полученная зависимость подтверждена математически с позиции выигрыша свободной энергии капельно-ионной плазмы при сближении поляризованных капель в электрическом поле. Обсуждена возможная роль электрокоалесценции в быстром формировании капель дождевого размера в атмосферных облаках.

Ключевые слова: капля, кластер, коалесценция, гидрофобная поверхность, облако.

DOI: 10.61011/JTF.2026.06.62991.151-25

Введение

Коалесценция капель воды под действием электрического поля (электрокоалесценция) является одним из вероятных механизмов быстрого образования дождевых капель в атмосферных облаках. Капли воды радиусом менее $10\,\mu$m растут благодаря конденсации водяного пара на ядрах конденсации. Капли размером более $50\,\mu$m растут за счет гравитационной коалесценции, вызванной высокой скоростью падения таких капель, столкновением и слиянием с каплями меньшего размера. Механизм роста капель с размерами от 10 до $50\,\mu$m до конца не ясен [1,2]. Возможно, капли растут за счет электрокоалесценции в электрическом поле облака. В ряде лабораторных экспериментов, например [3–9], сообщается об обнаружении влияния электрического поля на скорость образования капель. В [10] была продемонстрирована корреляция размера дождевых капель, выпадающих на поверхность земли, с напряженностью электрического поля в облаке. Согласно сложившемуся представлению [11], электрокоалесценция может осуществляться благодаря диполь-дипольному притяжению капель, поляризованных в электрическом поле облака. В [12] при изучении электрокоалесценции капель на гидрофобной поверхности было установлено, что диполь-дипольное взаимодействие поляризованных капель не является причиной коалесценции. Так, например, было экспериментально установлено, что капли, расположенные друг за другом в направлении линий электрического поля, коалесцируют между собой столь же эффективно, как и капли, расположенные на линиях, перпендикулярных направлению электрического поля. В первом случае диполь-дипольное взаимодействие приводит к притяжению капель, а во втором случае — к отталкиванию. Поэтому в [12] был предложен другой механизм электрокоалесценции, основанный на электростатическом взаимодействии заряженных капель с ионами в капельно-ионной плазме и на выигрыше электростатической энергии плазмы при уменьшении межкапельного расстояния в электрическом поле. С помощью рассчитанной диаграммы состояний капельно-ионной плазмы было вычислено критическое значение напряженности электрического поля, при превышении которого происходит коалесценция, в зависимости от среднего радиуса капель. Данная зависимость была подтверждена полученной в работе [12] аналогичной экспериментальной зависимостью. Подчеркнем, что в цитируемой работе [12] облачную капельную среду в экспериментах моделировали с помощью системы капель, осажденных на плоской гидрофобной поверхности. Преимуществом такого моделирования было то, что положение капель было фиксированным на поверхности. Это делало удобной их фото- и видеорегистрацию и определение геометрических параметров капель. Недостатком способа являлось то, что взаимодействие капель с поверхностью являлось помехой для изучения взаимодействия капель друг с другом. Интерес представляют исследования взаимодействия капель в свободном состоянии. Таковыми могут служить капли так называемого „капельного кластера“ [13]. Капельный кластер представляет собой однослойную систему гексагонально упорядоченных капель воды радиусом в несколько десятков микрон, спонтанно конденсирующихся из пересыщенного пара над локально нагретой поверхностью воды и свободно парящих над этой поверхностью. Межкапельное расстояние и высота их левитации над поверхностью сравнимы с радиусом капель. Пространственное положение кластера определяется положением локально нагретой поверхности

воды, и капли кластера также удобны для фото- и видеорегистрации.

В связи со сказанным целью настоящей работы является экспериментальное исследование явления электрокоалесценции капельного кластера и проверка предложенного в [12] механизма электрокоалесцеции в условиях, когда взаимодействие капель с поверхностью сведено к минимуму.

1. Экспериментальная техника

Капельный кластер получали с помощью устройства, изображенного на рис. 1, *a*. В центре текстолитовой пластины *5* площадью около 10 cm^2 располагался точечный нагреватель в виде медного стержня *8* диаметром 2 mm, прикрепленного к медной теплоинерционной пластине *8*, снабженной системой терморегуляции *6* и регистрации температуры *7*. Погрешность регулирования и измерения температуры в месте крепления систем *6, 7* не превышала $\pm 1^\circ$. Разность температур между местом крепления систем *6, 7* и верхней точкой точечного нагревателя *8* составляла не более 5°. Зону получения кластера вокруг точечного нагревателя защищали полым пластиковым цилиндром диаметром 10 mm высотой 5 mm для уменьшения влияния на кластер воздушных потоков в помещении. На текстолитовую пластину с точечным нагревателем наливали слой дистиллированной воды *4* толщиной 0.3–0.5 mm. При температуре нагревателя более 70 °C из пересыщенного водяного пара на поверхность воды выпадали единичные капли, которые затем в течение около 10 s группировались в капельный кластер *3*. Кластер левитировал над поверхностью на расстоянии капельного радиуса в виде монослоя гексагонально упорядоченных капель (численностью до 100 капель). На рис. 1, *b* приведена фотография капельного кластера под углом зрения от вертикали 40°. После образования кластера размеры его капель немного увеличивались, затем стабилизировались в течение нескольких десятков секунд. Размеры капель можно было регулировать в интервале значений радиусов 3–30 μm, меняя температуру точечного нагревателя в интервале 70 °C–100 °C и толщину слоя воды. Фото и видеорегистрацию кластера выполняли с помощью микроскопа ОГМЭ-ПЗ (МБС-10) с $F = 90$ mm и цифровой камеры U3CMOS14000KPA. По фотографиям определяли радиусы капель в пикселях с помощью инструмента Webbers ScopePhoto. Далее пиксели пересчитывали в миллиметры. Относительная погрешность определения геометрических размеров капель была менее 10 %. Погрешность была обусловлена нерезкостью границ капель на фотографиях.

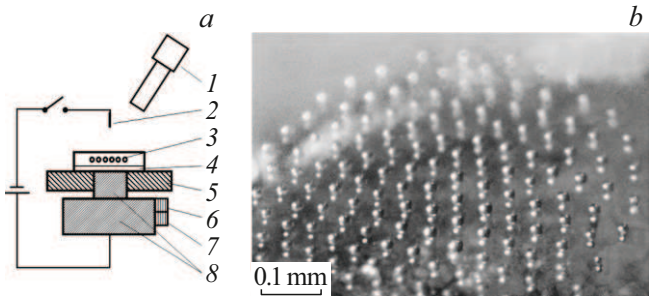


Рис. 1. *a* — устройство для получения и изучения электрокоалесценции капельного кластера: *1* — микроскоп с цифровой видеокамерой, *2* — электрод, *3* — капельный кластер, *4* — слой воды, *5* — текстолитовая пластина, *6* — система терморегуляции, *7* — система терморегистрации, *8* — нагреватель; *b* — фотография капельного кластера (капли и их зеркальные отражения поверхностью воды).

Для создания электрического поля в объеме кластера положительный либо отрицательный провод от источника напряжения подключали к нижней части нагревателя, имеющего электрический контакт со слоем воды. Другой провод от источника напряжения подключали к вертикальному цилиндрическому электроду диаметром 1 mm, расположенному над точечным нагревателем на высоте 25 mm. Напряженность электрического поля определяли делением напряжения источника на межэлектродное расстояние, равное 25 mm. В отдельных случаях для повышения точности измерений напряженности использовали плоский верхний электрод в виде свитого в плоскую спираль проводника. Плоскость спирали располагали параллельно плоскости поверхности воды. Внешний диаметр спирали электрода был примерно равен межэлектродному расстоянию. Результаты измерения напряженности поля при коалесценции с помощью вертикального цилиндрического электрода и электрода в виде плоской спирали отличались не более чем на 30 %. Небольшой разброс результатов объяснен тем, что электроды находятся не в вакууме (в вакууме отличие было бы значительно больше), а в электропроводящей среде — плазме. В результате вокруг каждого электрода образуется высокопроводящая плазменная оболочка, изменяющая „эффективную“ геометрию электродов [14]. Толщина плазменной оболочки, например, вокруг проводящего шара диаметром 1 mm, составляет не менее нескольких миллиметров. (Внутри оболочки потенциальная электрическая энергия носителей заряда плазмы превышает их кинетическую энергию.) В обоих случаях система электродов с „эффективной“ геометрией приближается к геометрии плоского конденсатора.

В разрыв электрической цепи, соединяющей источник напряжения с верхним электродом, был включен высоковольтный коммутатор с дистанционным управлением. Источник напряжения имел выходное напряжение до 40 kV с возможностью плавной регулировки напряжения многооборотным регулятором с разрешением 100 V на один оборот регулятора. Напряжение измеряли цифровым вольтметром с погрешностью ± 1 V. Систематическую погрешность измерения напряженности поля оценивали в 30 %, а случайную погрешность, вызванную флуктуациями потока воздуха в области локализации

кластера и пространственной неоднородностью поля, — в 20 %.

Методика проведения электрических опытов с кластером состояла в том, что после достижения кластером стабильных размеров на источнике напряжения устанавливали минимальное напряжение. Затем напряжение плавно увеличивали и одновременно, с периодичностью 1 s, включали и выключали коммутатор напряжения. Повышение напряжения выполняли до тех пор, пока кластер не коалесцировал с поверхностью подстилающего слоя воды. По визуальной оценке коалесценция всего кластера происходила мгновенно или, по крайней мере, за время менее 0.1 s, определяемое частотой кадров видеосъемки 10 Hz. В опыте регистрировали напряжение коалесценции и средний радиус капель. Время проведения одного опыта занимало около 1 min. В течение этого времени никакие заметные изменения размеров капель за счет процессов конденсации (испарения) не наблюдались. Время существования кластера в отсутствие электрического поля могло исчисляться десятком минут. Температура воздуха во время проведения опытов была близка к стандартной (20 °C). Влажность составляла около 40 %.

2. Результаты опытов и обсуждения

На рис. 2 маркерами представлены результаты измерения напряженности электрического поля, при которой происходит коалесценция кластера с подстилающим слоем воды (критическая напряженность поля E_c) в зависимости от среднего радиуса капель r. Пунктирные кривые аппроксимируют экспериментальные значения с достоверностями аппроксимации $R^2 = 0.8$ для зависимости *1* и 0.45 для зависимости *2*. Из рисунка следует, что критическое значение напряженности поля уменьшается

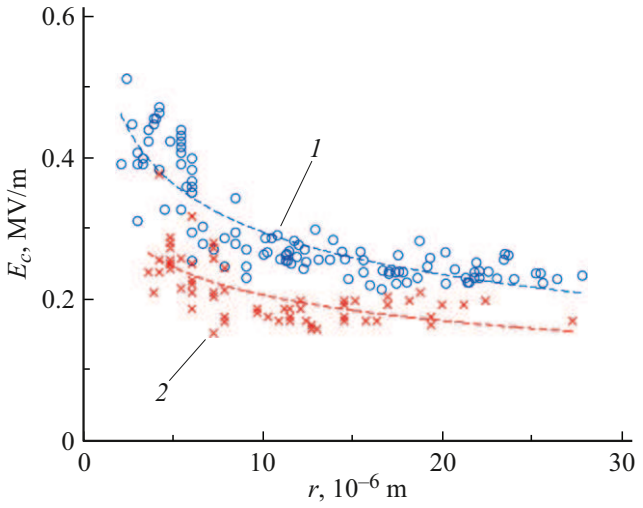


Рис. 2. Зависимость критической напряженности электрического поля коалесценции капельного кластера от среднего радиуса капель: *1* — „минус“ на электроде, контактирующем с поверхностью воды, *2* — „плюс“ на данном электроде.

от 0.5 до 0.2 MV/m при увеличении среднего радиуса капель в кластере от 3 до 30 μm. Критическая напряженность зависит от полярности прикладываемого напряжения. При отрицательном потенциале, приложенном к поверхности воды, критическое значение напряженности (маркеры *1*) примерно на 0.05–0.1 MV/m (или, в процентном отношении, примерно на 30 %) выше, чем при положительном потенциале (маркеры *2*). Последнее, вероятно, связано с тем, что подогретая поверхность воды под кластером имеет небольшой собственный положительный заряд из-за испарения и создает дополнительное электрическое поле. (Испарение/конденсация, как известно [14], приводят к электрическому заряжению поверхности воды относительно пара вследствие переноса носителей заряда — протонов и гидроксид-ионов между фазами воды.) Поле поверхности воды складывается с полем от внешнего источника, когда к поверхности воды приложен положительный потенциал, и вычитается из поля внешнего источника при отрицательном потенциале. Согласно выполненной нами оценке, при радиусе капель кластера 10 μm напряженность электрического поля подстилающего слоя воды равна $(5 \pm 2) \cdot 10^4$ V/m. Плотность поверхностного заряда слоя воды составляет $\rho = (2.7 \pm 1) \cdot 10^{12}\,\mathrm{m}^{-2}$ в единицах элементарного заряда. Полученное значение совпадает по порядку величины с плотностью поверхностного заряда капель в кластере при той же температуре [14].

Относительно механики коалесценции кластера можно сделать следующие предположения. В работе [13] с помощью скоростной видеосъемки изучали спонтанную коалесценцию кластера в отсутствие электрических воздействий. Было установлено, что коалесценция кластера начиналась с утопления одной капли. Эта капля рождала на поверхности воды расходящиеся концентрические волны, которые, распространяясь по поверхности воды от центра, приводили к утоплению всех капель кластера. В нашем случае, который инициировали электрическим полем, по-видимому, процесс начинался по одному из двух сценариев:

1) происходила электрокоалесценция какой-либо пары капель друг с другом над водной поверхностью. Затем образовавшаяся крупная капля тонула, порождая при этом волну, смывающую весь кластер;

2) капля над водной поверхностью коалесцировала непосредственно с подстилающим слоем воды. Затем волна, возникающая на поверхности воды, смывала весь кластер.

Основываясь на методе изображений, используемом в электростатике [15], фразу „коалесценция капли со слоем воды“ можно заменить на фразу „коалесценция капли с каплей-избражением, расположенным под проводящей водной поверхностью“. То есть и в том, и в другом сценарии стартовым процессом является слияние пары капель. В первом сценарии межкапельное расстояние выше, чем во втором, и процесс слияния может быть затруднен. Но во втором сценарии коалесценции мешает

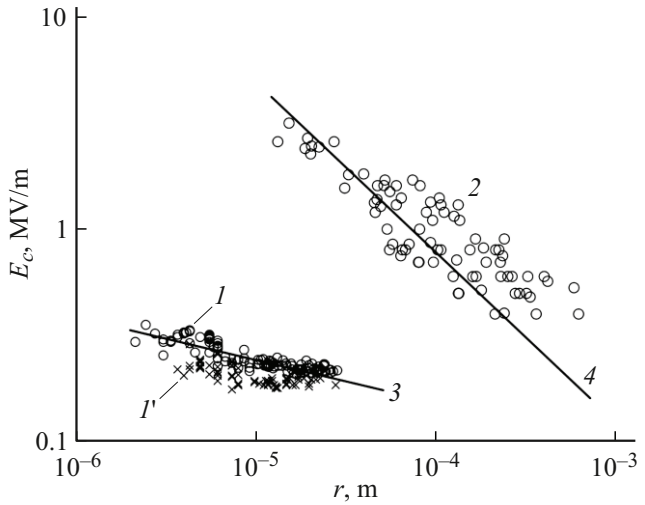


Рис. 3. Зависимости критической напряженности поля коалесценции от радиуса капель. *1, 1′* — маркеры для капельного кластера соответственно при отрицательной полярности электрода, контактирующего с поверхностью воды, и положительной полярности; *2* — маркеры для капель на гидрофобной поверхности ([12] с дополнениями); *3, 4* — соответствующие расчетные зависимости на основе диаграммы состояний.

сила Стокса, действующая на каплю со стороны восходящего пока пара от поверхности воды. Какой из сценариев преобладает, покажет дальнейшая высокоскоростная видеорегистрация электрокоалесценции.

Физический механизм слияния капель в электрическом поле рассматривался ранее в работе [12], где капли в опытах располагались тесно друг к другу на гидрофобной поверхности. Имеет смысл рассмотреть явления электрокоалесценции капельного кластера и капель на гидрофобной поверхности в сравнении друг с другом.

На рис. 3 приведены сравнительные экспериментальные данные по критическому значению электрического поля коалесценции для капельного кластера (маркеры *1, 1′*) и системы капель на гидрофобной поверхности (маркеры *2*). Во-первых, обращает на себя внимание то, что маркеры для капельного кластера лежат ниже маркеров для капель на поверхности. Это частично связано с тем, что капли в кластере имеют шарообразную форму, а на гидрофобной поверхности они имеют вид шаровых сегментов, и электроиндуцированный заряд капель в первом случае выше, поэтому требуется меньшее электрическое поле для коалесценции. Во-вторых, видно, что положения маркеров для капельного кластера и для капель на гидрофобной поверхности удовлетворительно аппроксимируются аналитическими кривыми *3* и *4* соответственно, полученными на основе предложенного в работе [12] механизма электрокоалесценции. Таким образом, сходство механизмов электрокоалесценции капельного кластера и капель на гидрофобной поверхности получает экспериментальное обоснование.

Рассмотрим подробнее механизм электрокоалесценции, предложенный в [12]. Систему капель на гидрофобной поверхности в [12] рассматривали как капельно-ионную плазму, состоящую из заряженных капель воды (для определенности — отрицательно заряженных), окруженных взвешенными в воздухе положительными однозарядными противоионами (протонами) и отрицательными однозарядными ионами (гидроксид-ионами). Без изменения результатов можно рассмотреть плазму с положительно заряженными каплями и противоионами и ионами, знак заряда которых изменен на противоположный. Механизм электрокоалесценции основан на корреляции носителей заряда капельно-ионной плазмы вокруг заряженных капель воды и стремлении капель к сближению благодаря выигрышу свободной энергии плазмы. На диаграмме рис. 4 изображены расстояния между поверхностями ближайших капель $\delta_{F\,\max}$ и $\delta_{F\,\min}$ соответственно, в точках локальных максимумов и минимумов свободной энергии Гельмгольца капельно-ионной плазмы, в зависимости от электрического заряда капель Z (в единицах элементарного заряда). Свободная энергия была вычислена по методике [16,17] с использованием уравнения Пуассона–Больцмана.

Область фазового пространства, лежащая между кривыми $\delta_{F\,\max}$ и $\delta_{F\,\min}$ на рис. 4 является областью сжатия плазмы. На верхнюю границу области сжатия удовлетворительно ложатся экспериментальные значения расстояний между поверхностями ближайших друг к другу капель в капельном кластере и в системе

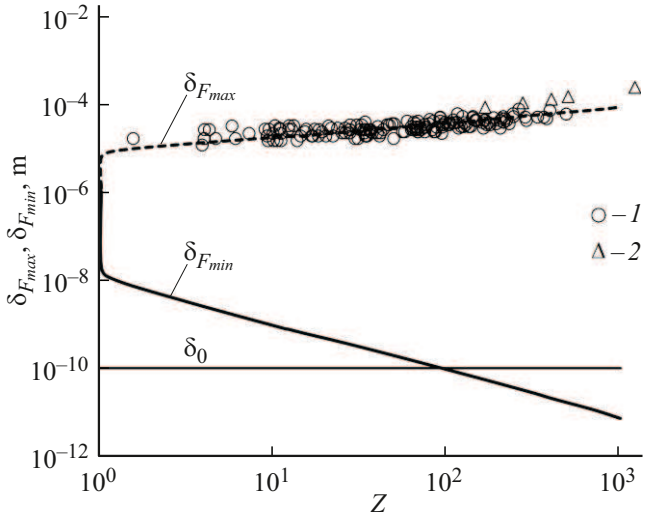


Рис. 4. Диаграмма состояний, представляющая зависимость расстояния между поверхностями ближайших капель $\delta_{F\,\max}$ и $\delta_{F\,\min}$, соответственно, в точках локальных максимумов и минимумов свободной энергии капельно-ионной плазмы, от электрического заряда капель Z ([18] с изменениями) (расчетный радиус капель $r = 10^{-6}$ m, радиус ионов и противоионов — 10^{-10} m). δ_0 — расстояние, на котором возможно действие межатомных сил притяжения: *1* — экспериментальные значения межповерхностных расстояний для капель на гидрофобной поверхности; *2* — то же для капель капельного кластера.

капель на гидрофобной поверхности [18]. Верхняя граница описывается законом $\delta_{F\max} = \gamma Z^{1/3}$, где $\gamma = 10^{-5}$ m. Капли могут также находиться в состояниях на нижней границе области сжатия и образовывать плотные группы с малым зазором между поверхностями капель. Такие группы — тандемы из двух, трех и более капель — экспериментально наблюдали внутри капельного кластера в работе [19]. Положение нижней границы на диаграмме зависит от доли ионов по отношению к противоионам χ, от заряда Z и радиуса r капель и, например, при $\chi = 0.1$, описывается законом

$$\delta_{F\min} = a\,\frac{r^{1.2}}{Z}, \tag{1}$$

где $a \approx 1\,\mathrm{m}^{-0.2}$.

Идея электрокоалесценции, основанная на диаграмме состояний, заключается в том, что коалесценция капель возможна, если расстояние между поверхностями капель становится меньше, чем межатомное расстояние в воде, равное примерно $\delta_0 = 10^{-10}$ m, т.е. когда выполняется неравенство $\delta_{F\min} \le \delta_0$ (рис. 4). При этом в действие вступают межатомные силы и обеспечивают слияние. Согласно кривой $\delta_{F\min}$ на рис. 4, капли микронного размера могут коалесцировать при заряде $Z > 10^2$, так как при этом неравенство выполняется. При меньшем заряде коалесценция невозможна. Необходимый для коалесценции заряд капли можно индуцировать с помощью внешнего электрического поля. Известно, что электрическое поле напряженностью E индуцирует на поверхности проводящего шара (капли) поверхностный заряд с плотностью [15]:

$$\sigma = \frac{3\varepsilon_0 E}{4\pi}\cos(\vartheta), \tag{2}$$

где ε_0 — электрическая постоянная, θ — зенитный угол сферических координат, рис. 5. В расчетах для системы капель на гидрофобной поверхности выбирали модель капли в форме сегмента шара. Половина капли приобретала положительный заряд, а другая половина — отрицательный. Например, чтобы вычислить величину положительного заряда, нужно проинтегрировать (2) по поверхности капли в интервалах углов $\theta = [\pi/6, \pi/2]$, $\varphi = [\pi/6, \pi(5/6)]$ (φ — полярный угол) (рис. 5). Значения углов были выбраны согласно визуальной оценке формы капель на гидрофобной поверхности. Получим величину индуцированного полем положительного заряда

$$Z = \frac{3\varepsilon_0 E r^2}{16e}. \tag{3}$$

Подставим удвоенное выражение (3) в (1) и получим выражение для критической напряженности электрического поля E_c, при которой происходит коалесценция. Удвоение выражения (3) выполнено для учета вклада положительно и отрицательно заряженных половин поверхности капли.

$$E_c = \frac{8ae}{3\varepsilon_0\delta_0 r^{0.8}}. \tag{4}$$

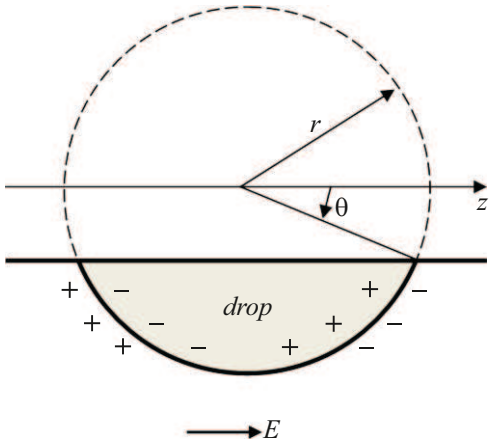


Рис. 5. Капля воды на гидрофобной поверхности в сферической системе координат: z — ось сферических координат, θ — азимутальный угол, r — радиус капли, E — вектор напряженности электрического поля.

Теоретическая зависимость (4) изображена сплошной кривой *4* на рис. 3. Эта зависимость близка по наклону и абсолютным значениям напряженности поля к экспериментальной зависимости (2), представленной маркерами. Таким образом, предложенный механизм электрокоалесценции капель воды на гидрофобной поверхности выдержал простую численную проверку.

Отметим, что коалесценция капель под действием электрического поля, согласно диаграмме рис. 4, возможна при не слишком больших межкапельных расстояниях. Так, если межкапельное расстояние лежит в области расстояний, значительно выше кривой $\delta_{F\max}$, то притяжение в капельно-ионной плазме отсутствует, и коалесценция невозможна.

Для того чтобы описать с вышеизложенных позиций коалесценцию капель в капельном кластере потребовалось сделать следующие два предположения:

1) концентрация противоионов в капельном кластере в 5 раз выше чем в случае капель на гидрофобной поверхности (в системе капель на гидрофобной поверхности концентрация противоионов равнялась $ZN_z(1-\chi)^{-1}$, где N_z — концентрация капель, а в капельном кластере она должна быть равна $5 \times ZN_z(1-\chi)^{-1}$);

2) доля ионов по отношению к противоионам в десять раз меньше, т.е. в капельном кластере параметр χ равен 0.01. (Первое предположение приводит к сдвигу кривой *3* на рис. 3 вниз, а второе предположение уменьшает наклон кривой *3* к оси абсцисс).

При сделанных предположениях положение нижней границы сжатия на диаграмме состояний рис. 4 описывается законом

$$\delta_{F\min} = b\,\frac{r^{1.8}}{Z}, \tag{5}$$

где $b \approx 200\,\mathrm{m}^{-0.8}$.

В капельном кластере капли имеют форму шара. Поэтому заряд одной капли будет в 4 раза больше, чем в формуле (3). Умножим выражение (3) на коэффициент 4 и умножим еще на коэффициент 2 для учета положительно заряженной половины капли и отрицательно заряженной половины. Далее подставим полученное выражение в (5). Получим выражение для E_c, которое на рис. 3, кривая *3*, удовлетворительно согласуется с экспериментальными значениями (*1, 1′*):

$$E_c = \frac{2be}{3\varepsilon_0\delta_0 r^{0.2}}. \qquad (6)$$

Таким образом, предложенный для системы капель на гидрофобной поверхности механизм электрокоалесценции [12] может быть пригоден для капельного кластера.

Обсудим теперь обоснованность сделанных выше двух предположений. Основным отличием условий существования капельного кластера от системы капель на гидрофобной поверхности является более высокая температура капель и наличие слоя нагретой воды под капельным кластером. Вследствие этого концентрация противоионов в плазме капельного кластера более высокая, чем в системе капель на гидрофобной поверхности. Таким образом, первое предположение о высокой концентрации противоионов в кластере оправданно. Вопрос о справедливости второго предположения о том, что параметр χ в капельном кластере может быть меньше на порядок, чем в системе капель на гидрофобной поверхности, также может быть связан с высокой концентрацией противоионов в капельном кластере. Действительно, в системе капель на гидрофобной поверхности параметр χ по порядку величины равен отношению двух концентраций: концентрации равновесных противоионов/ионов, существующих в окружающем воздухе в отсутствие исследуемой системы капель, и концентрации, создаваемой системой капель. Параметр χ может составлять около 0.1. В случае капельного кластера параметр χ во много раз меньше этого значения вследствие более высокой концентрации противоионов в капельном кластере по сравнению с каплями на гидрофобной поверхности, тогда как равновесная концентрация предположительно остается такой же. Таким образом, обсуждаемые предположения представляются непротиворечивыми.

Заключение

В заключение отметим, что в работе была получена экспериментальная зависимость напряженности внешнего электрического поля, при которой происходит коалесценция капельного кластера с подстилающим слоем воды, при различных значениях среднего радиуса капель в кластере. Установлено, что при отрицательном потенциале, приложенном к подстилающей поверхности воды, значение электрического поля коалесценции на 30 % превышает соответствующее значение при положительном потенциале. Данное различие объяснено влиянием собственного заряда водяного слоя на результирующую напряженность поля в объеме кластера. Математически обосновано, что электрокоалесценция кластера протекает по механизму, сходному с механизмом электрокоалесценции капель на гидрофобной поверхности [12]. Капли кластера стремятся к сближению благодаря выигрышу свободной энергии капельно-ионной плазмы. Этот выигрыш энергии возрастает при индуцировании электрического заряда капель под действием внешнего электрического поля.

Достигнутые представления о механизме электрокоалесценции капель могут быть использованы для продвижения понимания причин быстрого образования капель дождевого размера в электрически активных атмосферных облаках. Согласно рис. 2, электрокоалесценция капель радиусом от 3 до 30 μm осуществляется при значениях критической напряженности поля от 0.5 до 0.2 MV/m. Эти значения напряженности на порядок меньше пробойного значения напряженности поля в воздухе, равного 3 MV/m. Таким образом, электрокоалесценция в электрически активных облаках может начинаться задолго до достижения в облаке пробойной напряженности поля, а также протекать в условиях, когда пробойное значение достигнуто.

Полученные результаты могут способствовать поиску „электрических“ технологий управления, например, интенсивностью осадков в засушливых районах. Интересны технологии прогнозирования сильных осадков в городах на основе данных мониторинга электрического состояния облаков и сведений из диаграммы состояния капельно-ионной плазмы. Возможное техническое применение — это применение в совершенствовании технологии струйной 3*D*-печати, где электрокоалесценция может быть использована для слияния капель чернил в линии и сплошные пленки [20]. Результаты работы могут быть востребованы при разработке новых электроизоляционных материалов, устойчивых к разрушению под действием полей, сидящих на их поверхностях водяных капель и электрических процессов при капельной электрокоалесценции [21]. Еще одно применение — это повышение эффективности осаждения капельных аэрозолей на технологических поверхностях с использованием электрокоалесценции. Имеются и другие применения.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках госзадания FWRZ-2021-0007.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] T. Elperin, N. Kleeorin, B. Krasovitov, M. Kulmala, M. Liberman, I. Rogachevskii, S. Zilitinkevich. Phys. Rev. E, **592** (1), 013012 (2015).
[2] W.W. Grabowski, L.P. Wang. Annu. Rev. Fluid Mech., **45**, 293 (2013). DOI: 10.1146/annurev-fluid-011212 140750
[3] C.B. Moore, B. Vonnegut. *Physics of Precipitation, Proceedings of the Cloud Physics Conference* (Woods Hole, Massachusetts, 1959)
[4] G.G. Goyer, J.E. McDonald, F. Baer, R.R. Braham. J. Atmos. Sci., **17** (4), 442 (1960). DOI: 10.1175/1520 0469(1960)0172.0.CO;2
[5] G. Freier. J. Geophys. Res., **65**, 3979 (1960). DOI: 10.1029/JZ065i012p03979
[6] O.W. Jayaratne, B.J. Mason. Proc. Roy. Soc. London A, **280** (1383), 545 (1964). DOI: 10.1098/rspa.1964.0161
[7] S.G. Jennings. J. Electrostat., **1** (1), 15 (1975). DOI: 10.1016/0304 3886(75)90004-2
[8] R.J. Schlamp, S.N. Grover, H.R. Pruppachcr. J. Atmos. Sci., **33**, 1747 (1976). DOI: 10.1175/1520 0469(1976)0332.0.CO;2
[9] M.H.P. Ambaum, T. Auerswald, R. Eaves, R.G. Harrison. Proc. Roy. Soc. A, **478**, 20210714 (2022). DOI: 10.1098/rspa.2021.0714
[10] D. Mudiar, S.D. Pawar, V. Gopalakrishnan, E. Williams. Geophys. Res. Lett., **48** (14), e2021GL093577 (2021). DOI: 10.1029/2021GL093577
[11] Л.С. Ивлев, Ю.А. Довгалюк. *Физика атмосферных аэрозольных систем* (НИИХ СПбГУ, СПб., 1999)
[12] A.V. Shavlov, V.A. Dzhumandzhi, E.S. Yakovenko. Plasma, **6**, 127 (2023). DOI: 10.3390/plasma6010011
[13] А.А. Федорец, И.В. Марчук, О.А. Кабов. Письма в ЖЭТФ, **99**, 307 (2014). [A.A. Fedorets, I.V. Marchuk, O.A. Kabov. JETP Lett., **99** (5), 266 (2014). DOI: 10.1134/S0021364014050087]
[14] A.V. Shavlov, V.A. Dzhumandzhi, S.N. Romanyuk. Phys. Lett. A, **376**, 39 (2011).
[15] В.В. Батыгин, И.Н. Топтыгин. *Сборник задач по электродинамике*, под ред. М.М. Бредова (Наука, М., 1970), изд. 2-е.
[16] P. Debye, E. Huckel. Physik Z., **24**, 185 (1923).
[17] Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. *Курс теоретической физики* (Наука, М., 1976), т. 5, ч. 1, 3-е изд. [L.D. Landau, E.M. Lifshitz. *Course of Theoretical Physics, Statistical Physics*, 3rd ed. (Pergamon, Oxford, 1980, Part 1), v. 5.]
[18] A.V. Shavlov, V.A. Dzhumandzhi, A.A. Yakovenko. Atmosphere, **12**, 486 (2021). DOI: 10.3390/atmos12040486
[19] A.A. Fedorets, L.A. Dombrovsky, E. Bormashenko, M. Nosonovsky. Microfluid. Nanofluidics, **26**, 52 (2022).
[20] J. Plog, Y. Jiang, Y. Pan, A.L. Yarin. Experiments in Fluids, **62**, 56 (2021). DOI: 10.1007/s00348-021-03153-3/
[21] J.-M. Lowe, V. Hinrichsen, C. Tropea. *Droplet behavior under the impact of lightning and switching impulse voltage, Electrical Insulation Conference (EIC)* (San Antonio, TX, USA, 2018)