

Hydrodynamics and Acoustics of Drop-Liquid Merging in an Electrostatic Field

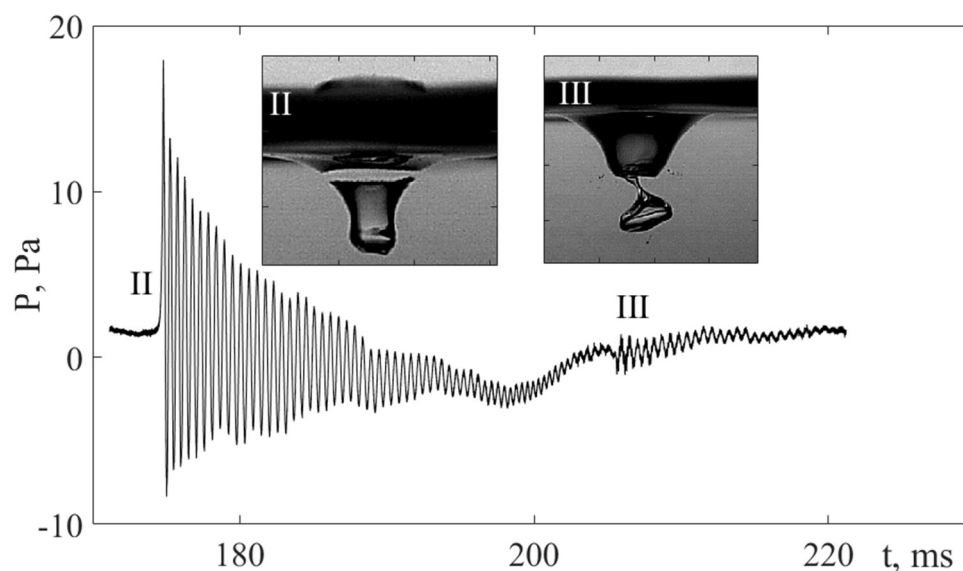
Yu. D. Chashechkin, V. E. Prokhorov

*Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS,
Moscow, 119526, Russia
yulidch@gmail.com*

Abstract

Synchronous recording of the flow pattern and sound packets formed during the merging of a drop of distilled water into water surface under an electrostatic field with a potential of 2 kV was carried out for the first time at the CDD (Charged Drop Dynamics) stand, which is part of the unique equipment "GFK IPMech RAS". The experiments were carried out in the impact mode, when the falling drop forms a cavity, a splash, a secondary cavity, from which a gas cavity breaks away, emitting a retarded sound packet. In an electrostatic field, a sound-emitting bubble of complex shape breaks away from the cylindrical end of the second cavity without forming a thin bridge observed when the bubble breaks away with the voltage turned off. Selections from a video film illustrating the evolution of the fine structure of the flow during sound generation, chronogram of the position of the lowest point of the cavity and an audiogram of acoustic pressure are given. The primary and retarded sound packets of which both the amplitudes and the main frequencies change non-monotonically, are measured and analyzed.

Keywords: drop, electrostatics, collision, cavity, bubble, sound packet.



Resonant acoustic packets II and III, emitted at the moments of separation of gas cavities in video frames II and III

УДК 551.46

Гидродинамика и акустика слияния капли с жидкостью в электростатическом поле

Ю. Д. Чашечкин, В. Е. Прохоров

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН,
Россия, 119526, Москва, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1
yulidch@gmail.com*

Аннотация

Синхронная регистрация картины течения и звуковых пакетов, формирующихся при слиянии капли дистиллированной воды с поверхностью воды в электростатическом поле с потенциалом $\Phi_e = 2$ кВ впервые проведена на стенде ДЗК, входящем в УИУ «ГФК ИПМех РАН». Опыты выполнены в импактном режиме, когда падающая капля формирует каверну, всплеск, вторичную каверну, от которой отрывается газовая полость, излучающая запаздывающий звуковой пакет. В электростатическом поле излучающий звук пузырь сложной формы отрывается от цилиндрического окончания второй каверны без формирования тонкой перетяжки, наблюдаемой при отрыве пузыря с выключенным напряжением. Приведены выборки из видеофильма, иллюстрирующие эволюцию тонкой структуры течения при генерации звука, хронограмма положения нижней точки каверны и аудиограмма акустического давления. Выделены и проанализированы первичный и запаздывающие звуковые пакеты, в которых и амплитуда, и частота наполнения изменяются немонотонно.

Ключевые слова: капля, электростатика, столкновение, каверна, пузырь, звуковой пакет.

1. Введение

Капельные течения – одна из распространенных форм переноса вещества в атмосфере (отдельные капли, группы, облака и облачные системы [1-3]), через межфазные границы между атмосферой, гидросферой и литосферой в виде и падающего дождя, и вылетающих брызг [4, 5], в массовых промышленных технологиях [6], в последние годы активно изучаются в лабораторных условиях [7]. Музыкальные звуки струй и капельных течений, получившие широкое отражение в художественной литературе, стали объектом научного изучения с появлением высокочувствительных микрофонов и гидрофонов в середине прошлого века [8]. Развитие техники регистрации звука, высокоскоростного наблюдения вначале с помощью кино-, и затем и видеокамер [9, 10], открыло возможность согласованного изучения и гидродинамики, и акустики капельных течений.

Аудиограммы звуковых пакетов импакта капли, которые одновременно регистрируются и в водной, и в воздушной среде [11], включают короткий высокочастотный первичный пакет и запаздывающие сигналы различного частотного состава [12, 13]. Сопоставление данных высокоразрешающих видеоизображений картин течения и синхронизованных звуковых пакетов показало, что в излучении звука важную роль играют объемные осцилляции газовых полостей [14], образующихся на различных этапах эволюции сложной картины многофазного течения [15].

В природе капельные течения часто сопровождаются разделением зарядов, появлением областей с большой напряженностью электрических полей, которые заметно влияют на размеры и динамику капель [16]. Атмосферное электричество проявляется в разрядах различных видов – и «тихих» свечениях, и опасных грозах с раскатами грома [17]. В исследованиях влияния электростатического поля на течения жидкостей, которые начали проводиться в начале

прошлого века, был установлен распад вытекающей из насадки струи жидкости на тонкие волокна и капли [18]. Получившие широкое распространение научные результаты способствовали созданию ряда массовых технологий, среди которых отмечается «электроспиннинг» – массовое производство волоконных материалов [19] и электродиспергирование растворов на мелкие капли, использующиеся в масс-спектроскопическом анализе [20]. В последние годы активно развивается теоретическая и экспериментальная электрогидродинамика, объединяющая физику и механику сложных жидкостей. Прослежено влияние напряженности поля на темп отрыва капель от капилляра, их размеры и форму [21, 22].

Развитие капельных электродинамических технологий требует совершенствования методов контроля состояния среды и свойств протекающих процессов, одним из которых является регистрация акустических сигналов. В данной работе экспериментально прослежено влияние электростатического поля на свойства акустических пакетов, возникающих при слиянии отдельной капли в импактном режиме течения, когда кинетическая энергия капли превосходит ее потенциальную поверхностную и электростатическую компоненту полной энергии.

2. Параметризация

Основу методики проведения и анализа результатов эксперимента составляет система фундаментальных уравнений механики гетерогенных жидкостей [23, 24], дополненная уравнениями состояния для потенциала Гиббса G и его производной – плотности ρ [25, 26], которая здесь для краткости не приводится.

Из анализа полной системы уравнений механики жидкостей применительно к задаче генерации звуковых пакетов в капельных течениях следует, что в число основных размерных параметров входят потенциалы Гиббса капли G_d , воздушной среды G_a и принимающей жидкости G_t . Индексы указывают на среду, которая характеризуется данным параметром.

Определяющими параметрами также служат производные потенциала Гиббса – плотность $\rho_{d,a,t}$, давление $P_{d,a,t}$, температура $T_{d,a,t}$ и другие физические величины – кинематическая $\nu_{d,a,t}$ и динамическая $\mu_{d,a,t} = (\rho\nu)_{d,a,t}$ вязкость; полное σ_d^a, σ_t^a и нормализованное на плотность среды значение коэффициента поверхностного натяжения $\gamma_d^a = \sigma_d^a / \rho_d, \gamma_t^a = \sigma_t^a / \rho_t$; эквивалентный диаметр D , площадь поверхности S_D , объем V_D , масса $M = \rho V_D$, импульс $p_D = MU$ и вертикальная скоростью капли U в момент первичного контакта с принимающей жидкостью.

В число базовых параметров также входят экстенсивная кинетическая энергия в момент контакта $En_k = MU^2/2$ и потенциальная поверхностная энергия (ППЭ) $En_\sigma = \sigma_d^a S_D$, которая сосредоточена в тонком приповерхностном слое толщиной порядка размера молекулярного кластера $\delta_\sigma \sim 10^{-6}$ см. ППЭ характеризуется высокой плотностью $W_D^\sigma = En_\sigma / V_\sigma$, в отличие от кинетической энергии, которая рассредоточена по всему объему капли с плотностью $W_D^k = En_k / V_D$. Величина отношения компонентов энергии капли $R_\sigma^k = En_k^k / En_D^\sigma$ может быть и большой, и малой, однако отношение плотностей компонентов энергии $R_W = W_D^k / W_D^\sigma \sim \delta_\sigma / D$ всегда малая величина в условиях проведенных опытов.

Экспериментальное изучение влияния электростатического поля на структуру и динамику капельных течений, которое начиналось в начале прошлого века [18], продолжается на новой технической основе [27]. При описании условий опытов в число базовых размерных параметров задачи включается энергия электростатического поля $En_e = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 V_D}{2} \left(\frac{\Phi_e}{H_e} \right)^2$, величина которой определяется объемом капли V_D и напряженностью приложенного поля $E_e = \Phi_e / H_e$, ко-

торое считается однородным. Здесь ε – относительная диэлектрическая проницаемость жидкости капли, ε_0 – универсальная диэлектрическая постоянная, H_e – расстояние между электродами под напряжением Φ_e .

Набор энергетических параметров также включает потенциальную энергию $En_p = MgD$ в гравитационном поле с ускорением свободного падения g на масштабе D .

Отношения характерных величин задают набор безразмерных параметров, который традиционно включает следующие числа: Рейнольдса с контактной скоростью U капли $Re = UD/\nu$, Фруда $Fr = E_k/E_p = U^2/gD$, Бонда $Bo = gD^2/\gamma$, Онезорге $Oh = \nu/\sqrt{\gamma D}$, Вебера – капиллярное $We = DU^2/\gamma$ и электрическое $We_e = \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{\rho U^2} \left(\frac{\Phi_e}{H_e} \right)^2$, которые используются для сравнительного анализа результатов независимо выполненных опытов.

Дополнительными безразмерными параметрами также служат отношения компонентов энергии капли – кинетической и потенциальной поверхностной $R_{En}^{k\sigma} = En_k/En_\sigma$ (для сферической капли равной $R_{En}^{k\sigma} = DU^2/12\gamma$), кинетической и электрической $R_{En}^{ke} = En_k/En_e$, потенциальной поверхностной энергии и электрической $R_{En}^{ke} = En_\sigma/En_e$.

Большое число безразмерных параметров задачи отражает сложность протекающих процессов, формирующих быстро эволюционирующую пространственную картину течений, многообразие их временных и пространственных масштабов. Высокая плотность компонентов потенциальной поверхностной и электрической энергии обеспечивают возможность нарушения сплошности поверхности и распада жидкости на отдельные струйки и капли, наблюдаемые в картинах слияния капли смешивающих жидкостей в импактном режиме [28]. В данных опытах впервые одновременно исследовалось влияние электрического поля и на картину течения, возникающего при слиянии падающей капли, и на свойства акустического сигнала.

3. Экспериментальная установка

Опыты выполнены на модифицированном стенде «Динамика заряженной капли» (ДЗК), входящем в состав УИУ «ГФК ИПМех РАН» [29]. Стенд, фотография которого приведена на рис. 1, включает следующие блоки: гидравлический, электрический и акустический, оптический, и блок сбора и подготовки данных.

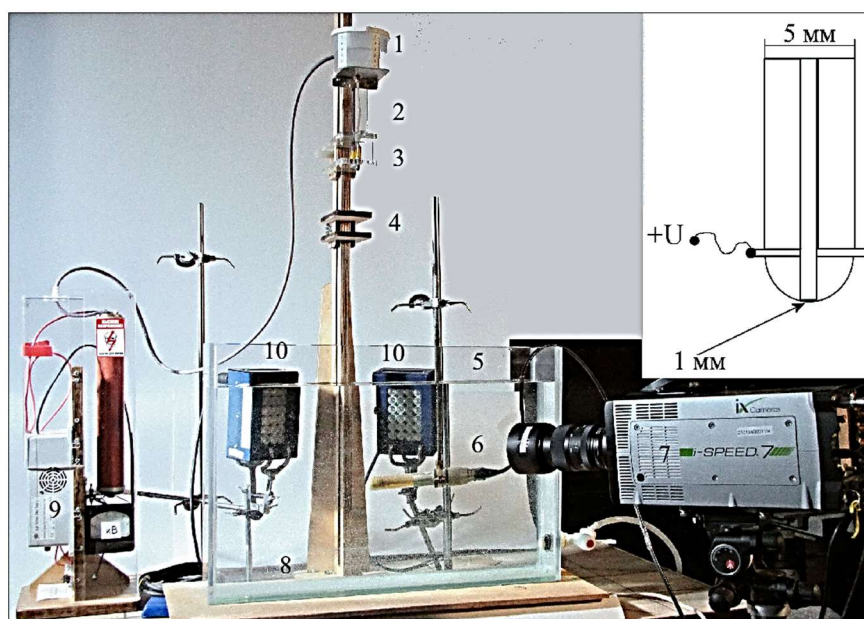


Рис. 1. Фотография экспериментальной установки

Гидравлический блок традиционно включает накопитель 1, систему подвода жидкости с регулировкой расхода 2, дозатор 3 со сменными капиллярами с электродом (анодом), соединенным с положительным полюсом источника постоянного высокого напряжения. Отрывающаяся под действием собственного веса от капилляра капля свободно падает и на пути прерывает световой луч в устройстве регистрации пролета 4, фотоприемник которого формирует импульс, запускающий видеосъемку и регистрацию акустических сигналов. Капля падает в заполненный водопроводной водой прозрачный бассейн 5 размером $60 \times 40 \times 10$ см³, в котором размещен гидрофон 6. Картина течения, создаваемого упавшей каплей в бассейне, регистрируется видеокамерой 7.

Электрод 8 – катод, лежащий на дне бассейна 5, соединен с отрицательным полюсом регулируемого источника постоянного высокого напряжения 9. К положительному полюсу источника подключен анод, выполненный в виде полусферического наконечника дозатора 3 (рис. 1, вставка). Диапазон регулировки напряжения источника $\Phi_e = 0 \div 30$ кВ.

Акустический блок включает гидрофон ГИ-54 (полоса пропускания 0.002-100 кГц, неравномерность 3дБ), выход которого подключен к 8-канальному блоку подготовки данных (БПД), синхронизирующему процессы регистрации видео- и акустических сигналов. Блок преобразует аналоговый сигнал гидрофона в двоичный 12-разрядный код (частота дискретизации до 58 МГц), который вместе со служебной информацией передается в компьютер.

Оптический блок включает осветители 10 (типа Multiled) и видеокамеру 7 i-Speed 717 (iX-Cameras), которой управляет блок подготовки данных (БПД) собственной разработки. Видеопоток поступает в компьютер, преобразуется в стандартный формат и сохраняется в накопителе. Дополнительно в некоторых опытах картина течения освещалась светодиодными прожекторами Godox, располагающимися за матовым экраном.

В опытах после включения высокого напряжения открывалось поступление воды в дозатор 3. Оторвавшаяся от капилляра дозатора капля дистиллированной воды пересекала световой луч и падала в бассейн, заполненный водопроводной водой. Сигнал с фотоприемника запускал видеокамеру и гидрофон. Погрешность синхронизации акустических и оптических сигналов составляла 20 мкс. Данные опыты выполнены при разности потенциалов $\Phi_e = 2$ кВ. Частота видеосъемки при регистрации картины течения составляла 50000 к/с, разрешение 380×456 (абсолютное разрешение 0.06 мм). Результаты изучения влияния электростатического поля на отрыв капли приведены в [22].

4. Картины течения и аудиограмма акустических сигналов в электростатическом поле с потенциалом $\Phi_e = 2$ кВ

Эволюцию картины течения, возникающего в принимающей жидкости при слиянии капли диаметром $D = 5.0$ мм, соприкасающейся с принимающей жидкостью при скорости $U = 2.4$ м/с, в электростатическом поле с потенциалом $\Phi_e = 2$ кВ иллюстрирует выборка из видеогаммы, приведенная на рис. 2. Временная изменчивость положения крайней нижней точки деформированной поверхности жидкости показана на рис. 2, *и*.

В импактном режиме сливающаяся капля деформирует свободную поверхность принимающей жидкости и формирует каверну [28]. В стадии максимального заглубления первичная каверна, изображение которой приведено на рис. 2, *а*, перечеркнута системой слабовыраженных горизонтальных полос, визуализирующих группу капиллярных волн, сбегających с кромки венца. Длина волны, составляющая $\lambda = 1.4$ мм при $t = 23.2$ мс (рис. 2, *а*) возрастает до $\lambda = 2$ мм при $t = 43.2$ мс. Каверна, достигающая максимальной глубины $h_1 = 11.2$ мм при $t = 23.2$ мс (метка 2, рис. 2, *и*), далее коллапсирует до глубины $h_1 = 3.0$ мм ($t = 55.2$ мс, время отсчитывается от момента первичного контакта капли, метка 3 на хронограмме рис. 2, *и*) и переходит в медленно эволюционирующую депрессию, глубина которой нерегулярно меняется вблизи аппроксимирующей зависимости $h_1 = -0.016t + 4.22$ мм на интервале $55.2 < t < 137.2$ мс (метки 3, 4).

В процессе схлопывания каверны над поверхностью жидкости формируется всплеск конической формы ($t = 142.2$ мс, рис. 2, б), с вершины которого выбрасывается сравнительно большая капля.

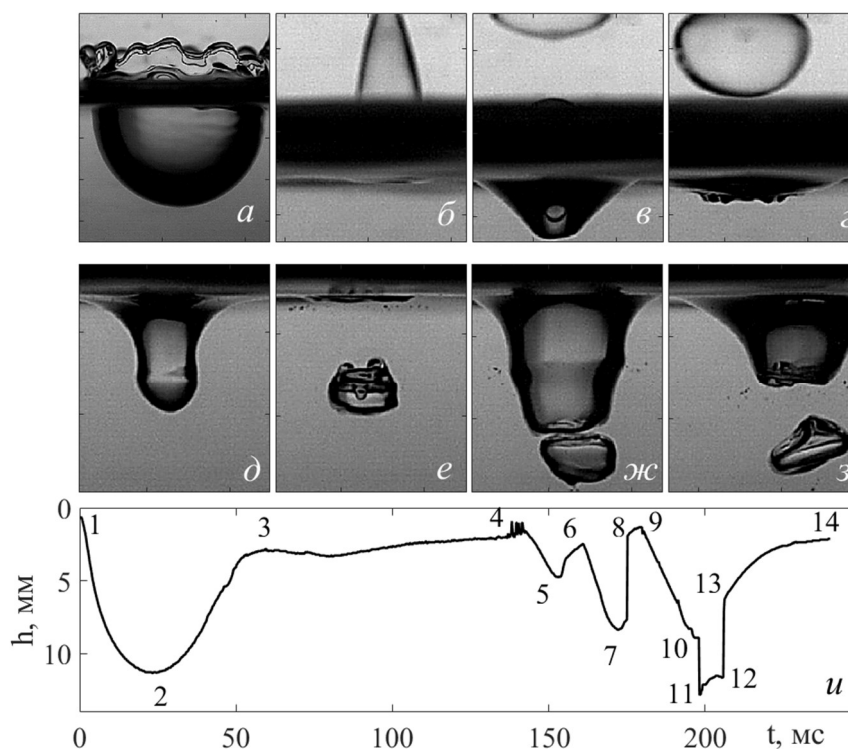


Рис. 2. Эволюция картины течения при слиянии падающей капли жидкости в электростатическом поле с потенциалом $\Phi_e = 2$ кВ в импактном режиме слияния: а-з – выборки из видеोगраммы картины течения, $t = 23.2, 142.2, 153.0, 161.0, 172.4, 179.8, 198.4, 205.8$ мс; и – график зависимости глубины нижней кромки деформированной поверхности жидкости от времени ($D = 5.0$ мм, $U = 2.4$ м/с, $Re = 11950$, $Fr = 117$, $Bo = 3.3$, $Oh = 1.6 \times 10^{-3}$, $We = 390$, $We_e = 2.0 \times 10^{-6}$, $R_{En}^{k\sigma} = 33$, $R_{En}^{ke} = 5 \times 10^5$, масштабы изображений – индивидуальные, деление шкалы – 5 мм)

Далее всплеск, начинающий спадать, продавливая своим весом медленно поднимающееся дно депрессии и формирует кольцевую впадину, охватывающую его основание. В технике, реализованной в данном опыте, на изображении в боковой проекции на просвет визуализируется только внешний контур впадины на рис. 2, в. Глубина впадины достигает локального значения $h_i = 4.8$ мм при $t = 153$ мс (метка 5, рис. 2, и) и начинает уменьшаться, вначале быстро, затем медленнее до момента $t = 160.8$ мс (метка 6), когда в поле зрения появляется новая каверна, порождается опускающимся цилиндрическим телом всплеска.

Одновременно в картине течения появляется возвращающаяся вторичная капля овоидной формы диаметром $D_2 = 6.6$ мм, ранее выброшенная с вершины всплеска, и вторичная цилиндрическая каверна, которую формирует погружающаяся цилиндрическая часть всплеска. Плоское дно развивающейся второй каверны обильно покрыто мелкими газовыми пузырьками. Вторая каверна, порождая спадом всплеска, начинает отмечаться на хронограмме при $t = 160.8$ мс резким увеличением глубины дна возмущения свободной поверхности, максимальной значение которой $h_2 = 8.3$ мм достигается при $t = 172.4$ мс (метка 7).

Видеокадр картины течения приведен на рис. 2, д.

Течения, возникающие в принимающей жидкости при слиянии капли, и действие электрических полей вызывают отделение нижней вытянутой цилиндрической части каверны и формированию газовой полости (более детально процесс отделения иллюстрируется на

рис. 3). При этом глубина каверны резко уменьшается и при $t = 179.8$ мс достигает значения $h_2 = 1.3$ мм.

Оторвавшаяся часть каверны образует газовый пузырь сложной формы с округлым дном и плоской вершиной, форма которого быстро и нерегулярно меняется. Пузырь, к вершине и боковой поверхности которого присоединены газовые пузыри, показан на рис. 2, *е*. Вторая каверна вначале схлопывается довольно быстро – в течение $\Delta t = 7.4$ мс, далее более медленно до выхода на горизонт всплывающей депрессии до глубины $h_2 = 1.9$ мм (метка 8, $t = 175.2$ мс).

После погружения всплеска в жидкости сохраняется остаток стягивающейся к поверхности жидкости впадины, к которой приближается капля, ранее выброшенная с вершины всплеска. Капля, погружающаяся в остаток второй каверны, соприкасается с ее боковой стенкой и формирует третью каверну. Боковая поверхность капли, контактирующая со стенкой каверны, образует «полосу слияния» большой площади. Конвертируемая часть ППЭ уничтоженных поверхностей и передаваемая кинетическая энергия части капли участвуют в формировании быстро растущей третьей каверны, которая энергично вторгается в толщу жидкости (рис. 2, *ж*). Глубина каверны цилиндрической формы резко увеличивается и при $t = 197.8$ мс (метка 10, рис. 2, *и*) равна $h_3 = 8.9$. Далее происходит сложный процесс соприкосновения дна каверны с поверхностью осциллирующей газовой полости и образование общей газовой полости.

В фазе контакта дно растущей каверны приближается к верхней части газового пузыря, положение которого поддерживается сформировавшимися течениями. При этом сближающиеся поверхности синхронно искривляются. Они совершают сложные движения, в ходе которых локально соприкасаются, затем разделяются, вновь контактируют, формируя тонкие быстро эволюционирующие структуры. При $t = 198.4$ мс каверна и газовый пузырь окончательно соединяются и формируют вытянутую каверну глубиной $h_3 = 12.8$ мм (метка 11). После отсоединения пузыря при $t = 205.8$ мс (метка 12) глубина каверны резко уменьшается до $h_3 = 11.6$ мм и далее медленно выходит на уровень продолжающего всплытие дна депрессии при $t = 206.6$ (метка 13)

Приведенная на рис. 2, *и* хронограмма иллюстрирует общую эволюцию положения точки максимального заглубления свободной поверхности. На начальном этапе ключевым элементом течения является каверна (рис. 2, *а*), которая достигает максимальной глубины $h_1 = 11.3$ мм при $t = 23.2$ мс (метка 2 на рис. 2, *и*). Далее каверна начинает стягиваться к свободной поверхности, на которой одновременно формируется область депрессии за хвостом группы расходящихся кольцевых капиллярных волн. Начиная с $t = 55.2$ мс (метка 3) положение точки максимальной глубины определяет динамика медленно поднимающейся депрессии, плоское дно которой медленно смещается к свободной поверхности.

Характер кривой резко меняется при $t = 142.6$ мс, когда в поле зрения появляется дно кольцевой впадины, охватывающей погружающийся пьедестал и основание всплеска (метка 4, $t = 137.8$ мс). Максимальное значение глубины впадины $h_t = 4.7$ мм достигается при $t = 153.4$ мс (рис. 2, *в*, метка 5, рис. 2, *и*). Далее впадина энергично заполняется до момента $t = 160.6$ мс (метка 6, рис. 2, *и*), когда в поле зрения появляется быстро углубляющаяся вторая каверна, инициированная погружением цилиндрической части всплеска (рис. 2, *з*). После достижения максимальной глубины $h = 8.4$ мм ($t = 172.2$ мс) вторая каверна начинает энергично схлопываться до момента $t = 175.8$ мс ($h_2 = 1.8$ мм), когда она выходит на уровень поднимающегося дна депрессии.

После короткого временного интервала при $t = 179.8$ мс (метка 9) резко меняющийся характер хронограммы отражает появление третьей каверны, достигающей глубины $h_3 = 8.9$ мм ($t = 178.0$ мс). В этот момент дно каверны соприкасается с верхней кромкой всплывающего газового пузыря. Общая глубина деформированной контактной поверхности начинает резко увеличиваться (метка 10) и достигает значения $h_3 = 12.8$ мм при $t = 198.6$ мс (метка 11). После короткого интервала общего существования каверны и пузыря, совместное воздействие поля и локальных течений разрывает конструкцию и отделяет газовый пузырь (рис. 2, *з*, метка 12,

$t = 205.4$ мс). Глубина урезанной каверны резко уменьшается при $t = 206.4$ мс (метка 13), и далее ее дно плавно выходит на уровень дна всплывающей депрессии. Глубина каверны составляет $h_3 = 2.1$ мм при $t = 240$ мс (метка 13, рис. 4, *u*).

В целом геометрия положения дна депрессии, интерполируемая на временном интервале $t = 58.6 \div 240$ мс (без учета вклада каверн) аппроксимируется линией $h_e = a_e t + b_e$ ($a_e = -0.004$ мм/мс, $b_e = 3.0$ мм), наклон которой заметно меньше, чем при слиянии капли в отсутствие поля.

Ранее проведенные исследования показали, что при контакте одиночной капли с покоящейся жидкостью в отсутствие внешнего электростатического поля акустический сигнал включает два вида последовательных звуковых пакетов: высокочастотный, возникающий в момент первичного контакта капли с поверхностью принимающей жидкости, и сравнительно низкочастотный (резонансный), которой излучается с задержкой, определяемой длительностью процесса формирования излучающего звук пузыря [11–15].

Как следует из анализа аудиограммы, отражающей временную изменчивость акустического давления, общая структура сигнала сохраняется при слиянии падающей капли в электростатическом поле с потенциалом $\Phi_e = 2$ кВ. Однако параметры акустических пакетов изменяются, поскольку поле заметно влияет на перемещение и геометрию свободной поверхности. Особенности процесса отрыва излучающей звуковой пакет газовой полости в электростатическом поле иллюстрирует выборка из видеофильма, представленная на рис. 4.

В отсутствие электростатического поля отрыву излучающего газового пузыря предшествует деформация второй каверны, дно которой вытягивается и принимает цилиндрическую форму. Затем на поверхности цилиндра появляется пояс, диаметр которого прогрессивно уменьшается. Примыкающие к пояску участки цилиндрической каверны принимают коническую форму. Они остаются связанными тонким каналом – перетяжкой [14]. Излучение звука начинается после разрыва перетяжки.

Электростатическое поле, даже относительно слабое, с потенциалом $\Phi_e = 2$ кВ существенно изменяет картину отрыва газовой полости, приведенную на рис. 2, *д*. В электростатическом поле нижняя цилиндрическая часть второй каверны со скругленным основанием отделяется как целое, без образования стягивающегося пояска. Разрыв каверны происходит одновременно по всему сечению без изменения формы ее внешнего контура (рис. 3, *а*). Излучение резонансного звукового пакета II (рис. 4), аудиограмма которого приведена на рис. 4, начинается в момент разрыва цилиндрического участка каверны и отделения ее нижней части. От появления разрыва на теле каверны до полного отделения пузыря в данном опыте проходит 140 мкс.

Расходящиеся поверхности дна каверны и вершины отделившейся газовой полости принимают вогнутую форму (рис. 3, *б*). На острой кромке вершины пузыря сохраняется группа газовых пузырьков. Отделившаяся газовая полость с «приклеенными» пузырьками медленно погружается под действием фоновых течений. Над свободной поверхностью прослеживается верхушка погружающейся вторичной капли, ранее выброшенной с вершины всплеска (рис. 3, *б*). Остаток второй каверны стягивается к свободной поверхности.

Форма отделившейся газовой полости, по поверхности которой бегут капиллярные волны, непрерывно видоизменяется. Пузырь практически останавливается, его форма приближается к цилиндрической с округлым дном и плоской вершиной (рис. 3, *в*). Фазовые поверхности волн визуализируют чередующиеся темные и светлые полосы. На верхней кромке полости сохраняются несколько газовых пузырьков, более крупных, чем на рис. 3, *б*. Дно полости энергично осциллирует: выпуклое на рис. 3, *а*, *б*, оно становится вогнутым в центре на рис. 3, *в*. Положение и размеры отдельных газовых пузырьков непрерывно меняются.

Постепенно полость принимает чечевицеобразную форму с выпуклым дном и вогнутой в центре верхушкой, на кромке которой располагаются все более крупные газовые пузырьки

(рис. 3, *г*). Пузырьки движутся вдоль кромки, постепенно сливаясь во все более крупные. Погружающаяся вторичная капля формирует новую каверну, основание которой просматривается на рис. 3, *г*.

Дрейфующий газовый пузырь постепенно принимает эллиптическую форму, искаженную отдельными мелкомасштабными возмущениями (выпуклость в левом верхнем углу и группа капиллярных волн в правом верхнем углу). По его поверхности перемещаются отдельные газовые пузырьки (в центре и вверху слева). Растущая каверна имеет сложную форму: ее верхняя часть цилиндрическая, в нижней части прослеживается кольцевой ободок, в центре дна – коническая впадина. Кромка каверны деформирована капиллярными волнами (рис. 3, *д*).

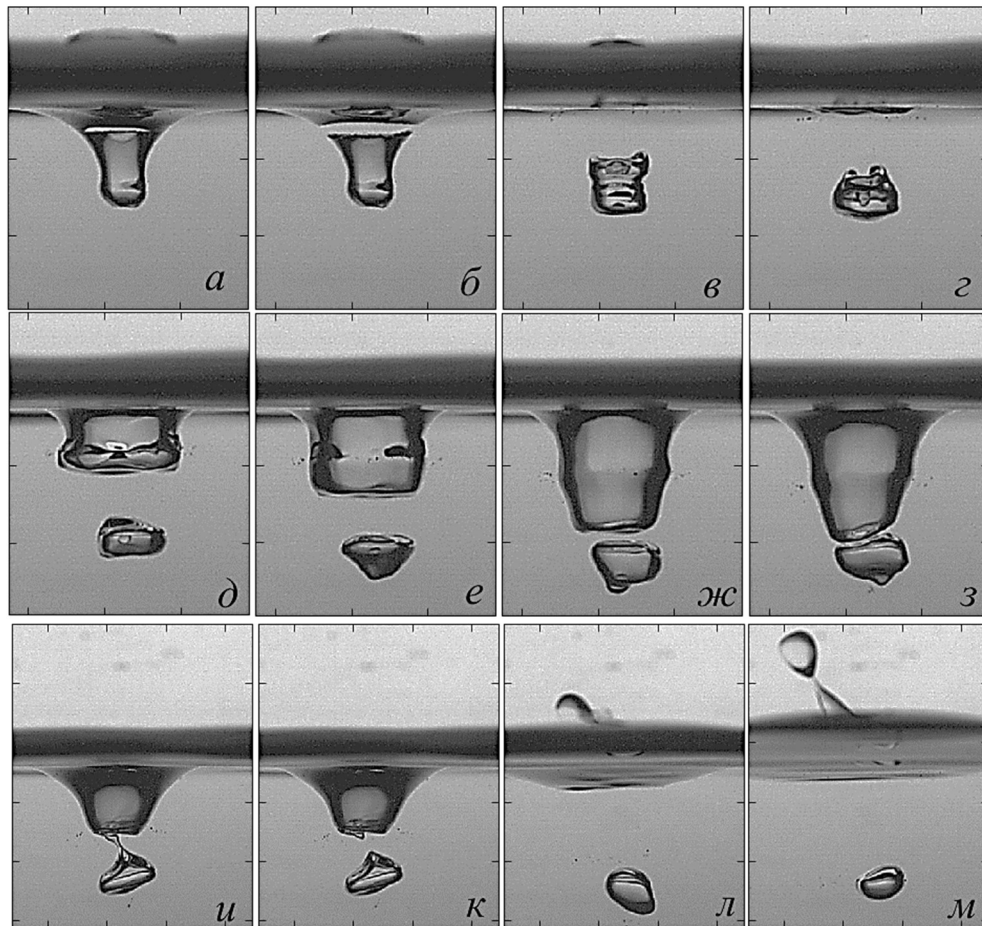


Рис. 3. Эволюция картины течения в процессе отрыва и переприсоединения излучающей звук газовой полости при слиянии падающей капли жидкости в электростатическом поле с потенциалом $\Phi_e = 2$ кВ: *а-м* – $t = 175.2, 175.4, 178.5, 180.8, 188.4, 192.1, 197.3, 201, 205.9, 206.2, 224.5, 243$ мс, деление шкалы – 5 мм

Постепенно форма растущей каверны сглаживается, ободок растягивается, оставляя небольшое утолщение. Газовая полость под дном каверны принимает форму перевернутого конуса, по верхней кромке и стенкам которого перемещаются и сливаются газовые пузырьки (рис. 3, *е*).

Далее нижняя часть растущей каверны принимает коническую форму с плоским основанием. Быстро растущая каверна приближается к видоизменяющему свою форму газовому пузырю, положение которого в пространстве практически не меняется. Несколько слившихся газовых пузырей образуют характерную выпуклость на дне пузыря, которая со временем отрывается и образует новый пузырек сфероидальной формы (рис. 3, *ж*).

При приближении третьей каверны к пузырю наблюдается сложное синхронизованное изменение форм сближающихся поверхностей, которые, оставаясь разделенными, попеременно становятся выпуклыми и вогнутыми (рис. 3, з). При этом на поверхности пузыря наблюдается активное движение мелких пузырьков. Длительность интервала взаимодействия приближающихся поверхностей составляет $\Delta t_i = 9$ мс.

Во время интенсивных перемещений поверхность газовой полости вытягивается и соприкасается с дном каверны (рис. 2, ж), которая начинает стягивание к свободной поверхности. Соединяющий вершины конических заострений обеих полостей тонкий газовый канал (перемычка) истончается в средней части (рис. 3, и) и разрывается (рис. 3, к).

Конические отростки постепенно втягиваются в коллапсирующую каверну и дрейфующий газовый пузырь. Разрыв тонкого воздушного канала, соединяющего конические заострения части дна каверны и отрывающейся газовой полости, сопровождается возбуждением осцилляций пузыря и генерацией нового звукового пакета III (рис. 4).

Оторвавшийся пузырь медленно эволюционирует, по его поверхности бегут короткие капиллярные волны. Плоское дно каверны постепенно выпучивается вверх и формирует растущий стример (рис. 3, л). С вершины стримера выбрасывается капля, вначале связанная с его телом тонкой перемычкой. Дрейфующая газовая полость сглаживается, по ее поверхности продолжают бежать капиллярные волны.

В аудиограмме акустического сигнала, регистрируемой гидрофоном при слиянии падающей капли дистиллированной воды с водопроводной водой в бассейне при включенном электростатическом поле с разностью потенциалов $\Phi_e = 2$ кВ, которая приведена на рис. 4, сохраняются ключевые особенности сигнала, отмеченные при регистрации звуковых пакетов в отсутствие поля [11–15]. В момент первичного контакта капли с принимающей жидкостью начинает излучаться короткий высокочастотный звуковой пакет I. При разрыве второй газовой полости формируется более низкочастотный (резонансный) пакет II. После затухания сигнала II, когда отделяется пузырь, присоединенный к дну второй, быстро коллапсирующей каверны, генерируется пакет III.

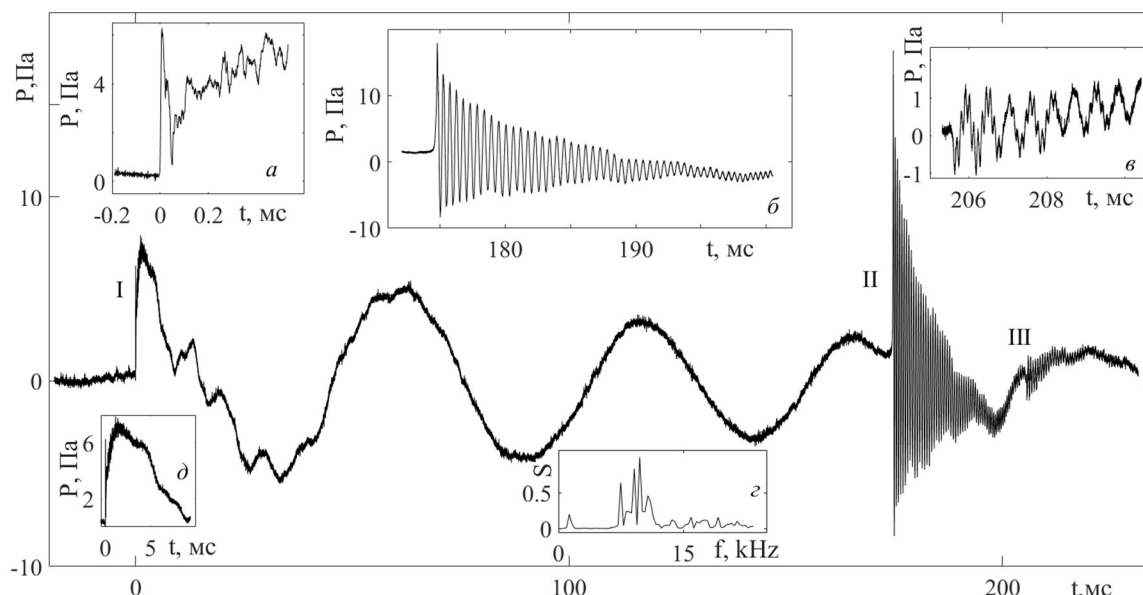


Рис. 4. Аудиограмма (а), выборки первичного импульса (I), резонансного пакета (II), его высокочастотного дополнения (III), иллюстрирующие картины течения при $\Phi_e = 2$ кВ: б-д – $t = 193.4, 193.8, 205.4, 224.2$ мс, масштаб шкалы 2 мм

Первичный звуковой пакет, развертки которого приведены на вкладках а и д, включает начальный импульс амплитудой $P = 6.2$ Па, с длительностью переднего фронта $\tau_f = 7$ мкс

(вкладка *а*). К нему примыкает более продолжительный пакет амплитудой $P = 6.8$ Па с передним фронтом длительностью $\tau_{fp} = 1$ мс (вкладка *д*). В спектре осцилляций на интервале $0.15 < \Delta t < 3.2$ мс (вкладка *з*), выделены частоты $f_I = 1.3, 7.5, 9.1$ и 9.8 кГц.

Первичный пакет сменяется группой низкочастотных осцилляций гидродинамического происхождения, обусловленных формирующимися возмущениями формы и положения свободной поверхности. Их максимумы следуют с интервалами $T_1 = 60, 56, 50$ и 53 мс. На спаде первой осцилляции появляются дополнительные возмущения, максимальные значения которых следуют с более короткими интервалами $T_2 = 11, 6, 10$ и 10 мс (первый максимум общий для обеих групп). Осцилляции связываются с формированием группы поверхностных возмущений, включающей каверну, венец, всплеск, расходящиеся кольцевые капиллярные волны и депрессию.

С задержкой $\Delta t = 174.5$ мс, в течение которой формируется первичная каверна, растущий и спадающий всплеск, кольцевая впадина и вторая каверна, регистрируется резонансный пакет *II* с максимальной размахом $P_s = 26$ Па. Формирование сигнала согласуется с появлением разрыва первичной каверны (рис. 3, *б*). Причем, в отличие от течений с выключенным полем [3, 14], отделение газовой полости от основания каверны происходит без формирования истонченного участка – перемычки. Совместное действие течений и электростатического поля приводят к “перерезанию” каверны и формированию отделяющейся газовой полости с острыми кромками и плоской вершиной.

Анализ акустического сигнала, растянутый график вариаций звукового давления которого приведен на рис. 4, вкладка *б*, показывает, что его частота f_{II} плавно увеличивается от 2030 Гц в начале до 2100 Гц в конце пакета. Изменение на $\Delta f_{II} = 70$ Гц может быть связано со сглаживанием формы и уменьшением объема излучающей газовой полости.

Амплитуда сигнала неравномерно затухает. В развертке сигнала *II* выражен начальный участок быстрого спадания, темп которого далее резко снижается. Акустическое излучение практически прекращается, когда пузырь начинает соприкасаться с набегающей каверной.

На контуре плоской вершины пузыря при большом увеличении прослеживаются мелкие газовые пузырьки. Дно каверны быстро поднимается, а пузырь погружается течением с сохранением плоской вершины и заостренных кромок. В центре дна пузыря появляется остроконечная впадина (рис. 3, *в*).

На интервале $197.3 < t < 224.2$ мс происходит активное изменение картины течения. Быстро растущая каверна с плоским дном (рис. 3, *ж*) приближается к газовой полости сложной формы, положение которой фиксируется сформировавшимися течениями. Верхний выступ на пузыре приближается к дну каверны и соприкасается с ним на небольшой поверхности (рис. 3, *з*). Расположение фазовых поверхностей между полостью и пузырем быстро и нерегулярно меняется. Далее каверна, часть дна которой принимает коническую форму, начинает стягиваться к свободной поверхности и оставляет остроконечный выступ, связанный тонкой перетяжкой с коническим выступом на пузыре.

Разрыв перемычки сопровождается излучением нового резонансного звукового пакета *III*, возникающего с задержкой $\Delta t = 31$ мс ($t = 205.5$ мс). Форма оторвавшегося пузыря модифицируется (рис. 3, *и, к*).

Структура растянутого сигнала на графике (вкладка *в*) свидетельствует о сложности многочастотного источника излучения звукового пакета *III*, который может создаваться осцилляциями нескольких связанных газовых полостей быстро меняющейся формы, по поверхности которых бегут капиллярные волны (рис. 3, *и, к*). На начальном участке частота сигнала *III* составляет $f_{III} = 1860$ Гц, в средней части – 1630 Гц, на хвосте – 1820 Гц. В спектре сигнала также присутствуют высокочастотные осцилляции $f_{III} = 9400$ Гц, существование которых можно объяснить излучением одного из мелких пузырей, покрывающих неровную поверхность дна стягивающейся каверны (рис. 4, *з*). Со временем все акустические и гидродинамические возмущения затухают.

5. Заключение

Стенд ДЗК, входящий в состав УИУ "ГФК ИПМех РАН" позволяет согласовано изучать структуру картины течения, формируемого в принимающей жидкости свободно падающей каплей в электростатическом поле, и регистрировать сопутствующие акустические сигналы.

Впервые проведена согласованная регистрация картины слияния капли в импактном режиме в электростатическом поле напряжением 2 кВ, установлено заметное влияние поля на картину отрыва излучающей газовой полости. В отсутствие поля полость отрывается с образованием утонченной перемычки, в электрическом поле отделяется без изменения общего контура каверны.

Первичный акустический сигнал в электростатическом поле дополняется двумя резонансными акустическими пакетами, частоты которых со временем изменяются, что указывает на нестационарные изменения объема поверхности излучающей газовой полости в электростатическом поле.

Благодарности и ссылки на гранты

Эксперименты выполнены на стенде «Динамика заряженной капли» (ДЗК) в составе УИУ "ГФК ИПМех РАН" в рамках госбюджетной темы «Разработка аналитико-численных алгоритмов для изучения процессов в механике сплошных сред, термодинамике и квантовой механике, изучение волновых, конвективных, тепловых и фрагментационных процессов в сложных жидкостях и разработка согласованных методов теоретических и экспериментальных исследований механики и термодинамики течений жидкостей», номер госрегистрации: 124012500442-3.

Авторы благодарны Н.Г. Соловьеву за помощь в организации эксперимента.

Литература

1. Cha J. W., Koo H. J., Kim B. Y., Belorid M., Hwang H. J., Kim H. K., Chang K.-H., Lee Y. H. Analysis of Rain Drop Size Distribution to Elucidate the Precipitation Process using a Cloud Microphysics Conceptual Model and In Situ Measurement // *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.* 2023. Vol. 59. Pp. 257–269. <https://doi.org/10.1007/s13143-022-00299-w>
2. Devrankar M., Dhulekar K. A Comparative study on cloud drops // *Intern. Res. J. Innov. Engin. Techn. (IRJIET)*. 2020. Vol. 4(1). Pp. 1–4.
3. Ali M., Bilal K., Khan S. U., Zomaya A. DROPS: Division and Replication of Data in the Cloud for Optimal Performance and Security // *IEEE Transactions on Cloud Computing*. 2015. Vol. 6(99). Pp. 1–17. DOI: 10.1109/TCC.2015.2400460
4. Kathiravelu G., Lucke T., Nichols P. Rain Drop Measurement Techniques: A Review // *Water*. 2016. Vol. 8(1). P. 29. DOI:10.3390/w8010029
5. Terry J. A rain splash component analysis to define mechanisms of soil detachment and transportation // *Austr. J. Soil Res.* 1998. Vol. 36(3). Pp. 525–542. DOI: 10.1071/S97078
6. Karim A. Physics of droplet impact on various substrates and its current advancements in interfacial science: A review // *J. Appl. Phys.* 2023. Vol. 133. P. 030701. DOI: 10.1063/5.0130043
7. Чашечкин Ю. Д. Закономерности распределения вещества свободно падающей окрашенной капли в прозрачной принимающей жидкости (обзор) // *Известия РАН. Механика жидкости и газа*. 2025. № 1. С. 34–76.
8. Prosperetti A., Ogüz H. The impact of drops on liquid surfaces and the underwater noise of rain // *Ann. Rev. Fluid Mech.* 1993. Vol. 25. Pp. 577–602. DOI: 10.1146/annurev.fl.25.010193.003045
9. Versluis M. High-speed imaging in fluids // *Exp. Fluids*. 2013. Vol. 54(2). Pp. 1–55. DOI: 10.1007/s00348-013-1458-x

10. Xu Q., Peters I., Wilken S., Brawn E., Jaeger H. Fast Imaging Technique to Study Drop Impact Dynamics of Non-Newtonian Fluids // J. of visual. exp. 2014. <http://dx.doi.org/10.3791/51249>
11. Чашечкин Ю. Д., Прохоров В. Е. Аэро- и гидроакустика удара свободно падающей капли о поверхность воды // Доклады РАН. 2010. Т. 434(1). С. 51–55.
12. Pumphrey H. C., Crum L. A., Bjørnø L., Underwater sound produced by individual drop impacts and rainfall // J. Acoust. Soc. Am. 1989. Vol. 85. Pp. 1518–1526.
13. Phillips S., Agarwal A., Jordan P. The sound produced by a dripping tap is driven by resonant oscillations of an entrapped air bubble // Sci. Reports. 2018. Vol. 8(1). Pp.1–12. DOI:10.1038/s41598-018-27913-0
14. Prokhorov V. E. Underwater gas bubbles produced by droplet impact: mechanism to trigger volumetric oscillations // Phys. Fluids. 2023. Vol. 35. P. 033314. <https://doi.org/10.1063/5.0140484>
15. Gillot G., Derec C., Genevaux J.-M., et al. A new insight on a mechanism of air-borne and underwater sound of a drop impacting a liquid surface // Phys. Fluids. 2020. Vol. 32(6). P. 062004.
16. Mudiar D., Pawar S., Gopalakrishnan V., et al. Electric field enlarges rain drops beneath electrified clouds: Observational evidence // Geophysical Research Letters. 2021. Vol. 48. P. e2021GL093577. DOI: 10.1029/2021GL093577
17. Григорьев А. И., Ширяева С. О. Этюды о грозе: Огни св. Эльма, свечение воронок смерчей, разные молнии. М.: Директ-Медиа, 2021.
18. Zeleny J. The electrical discharge from liquid points, and a hydrostatic method of measuring the electric intensity at their surfaces // Phys. Rev. 1914. Vol. 3(2). Pp. 69–91. DOI:10.1103/PhysRev.3.69
19. Tucker N., Stanger J., Staiger M.P., et al. The history of the science and technology of electrospinning from 1600 to 1995 // J. of Eng. Fibers and Fabrics, Special iss. 2012. Vol. 7(2). Pp. 63–71. DOI:10.1177/155892501200702S10
20. Wesdemiotis C., Williams-Pavlatos K., Keating A., et al. Mass spectrometry of polymers: A tutorial review // Mass. Spec. Rev. 2023. Pp. 1–50. DOI: 10.1002/mas.21844
21. Чашечкин Ю. Д., Прохоров В. Е. Андросенко В. Н. Моделирование влияния электрического поля на капельные течения // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2023. Т. 24(4). С. 15. DOI: 10.33257/PhChGD.24.4.1057
22. Чашечкин Ю. Д., Прохоров В. Е. Влияние электрического поля на динамику структурных компонентов течения при гравитационном отрыве капли воды // Известия РАН. МЖГ. 2024. № 3. С. 29–42.
23. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. М.: Наука, 1986.
24. Chashechkin Yu. D. Foundations of engineering mathematics applied for fluid flows // Axioms. 2021. Vol. 10. P. 286. DOI: 10.3390/axioms10040286
25. Feistel R. Thermodynamic properties of seawater, ice and humid air: TEOS-10, before and beyond // Ocean Sciences. 2018. Vol. 14. Pp. 471–502.
26. Harvey A., Hrubý J., Meier K. Improved and always improving: reference formulations for thermophysical properties of water // J. of Phys. and Chem. Ref. Data. 2023. Vol. 52. P. 011501. DOI: 10.1063/5.0125524
27. Notz P. K., Basaran O. A. Dynamics of drop formation in an electric field // J. of Colloid and Interface Sci. 1999. Vol. 213(1). Pp. 218–237. doi:10.1006/jcis.1999.6136
28. Chashechkin Yu. D., Ilinykh A. Y. Intrusive and impact modes of a falling drop coalescence with a target fluid at rest // Axioms. 2023. Vol. 12(4). P. 374. <https://doi.org/10.3390/axioms12040374>
29. УИУ «ГФК ИПМех РАН: Гидрофизический комплекс для моделирования гидродинамических процессов в окружающей среде и их воздействия на подводные технические объекты, а также распространения примесей в океане и атмосфере: site: <https://ipmnet.ru/uniquequip/gfk/>

References

1. Cha J. W., Koo H. J., Kim B. Y., Belorid M., Hwang H. J., Kim H. K., Chang K.-H., Lee Y. H., Analysis of Rain Drop Size Distribution to Elucidate the Precipitation Process using a Cloud Microphysics Conceptual Model and In Situ Measurement, *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, 2023, vol. 59, pp. 257–269. <https://doi.org/10.1007/s13143-022-00299-w>
2. Devrankar M., Dhulekar K., A Comparative study on cloud drops, *Intern. Res. J. Innov. Engin. Techn. (IRJIET)*, 2020, vol. 4(1), pp. 1–4.
3. Ali M., Bilal K., Khan S.U., Zomaya A., DROPS: Division and Replication of Data in the Cloud for Optimal Performance and Security, *IEEE Transactions on Cloud Computing*, 2015, vol. 6(99), pp. 1–17. DOI: 10.1109/TCC.2015.2400460
4. Kathiravelu G., Lucke T., Nichols P., Rain Drop Measurement Techniques: A Review, *Water*, 2016, vol. 8(1), pp. 29. DOI:10.3390/w8010029
5. Terry J., A rain splash component analysis to define mechanisms of soil detachment and transportation, *Austr. J. Soil Res.*, 1998, vol. 36(3), pp. 525–542. DOI: 10.1071/S97078
6. Karim A., Physics of droplet impact on various substrates and its current advancements in interfacial science: A review, *J. Appl. Phys.*, 2023, vol. 133, pp. 030701. DOI: 10.1063/5.0130043
7. Chashechkin Yu. D., The laws of the matter distribution in a colored free-falling drop in a transparent target fluid (Review), *Fluid Dynamics*, 2024, vol. 59(6), pp. 1693–1734. DOI: 10.1134/S0015462824604315
8. Prosperetti A., Ogüz H., The impact of drops on liquid surfaces and the underwater noise of rain, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 1993, vol. 25, pp. 577–602. DOI: 10.1146/annurev.fl.25.010193.003045
9. Versluis M., High-speed imaging in fluids, *Exp. Fluids*, 2013, vol. 54(2), pp. 1–55. DOI: 10.1007/s00348-013-1458-x
10. Xu Q., Peters I., Wilken S., Brawn E., Jaeger H., Fast Imaging Technique to Study Drop Impact Dynamics of Non-Newtonian Fluids, *J. of Visual. Exp.*, 2014. <http://dx.doi.org/10.3791/51249>
11. Chashechkin Yu. D., Prokhorov V. E., Aero_ and Hydroacoustics of the Impact for a Droplet Freely Falling onto the Water Surface, *Doklady Physics*, 2010, vol. 55, no. 9, pp. 460–464. DOI: 10.1134/S1028335810090090
12. Pumphrey H. C., Crum L. A., Bjørnø L., Underwater sound produced by individual drop impacts and rainfall, *J. Acoust. Soc. Am.*, 1989, vol. 85, pp. 1518–1526.
13. Phillips S., Agarwal A., Jordan P., The sound produced by a dripping tap is driven by resonant oscillations of an entrapped air bubble, *Sci. Rep.*, 2018, vol. 8(1), pp. 1–12. DOI:10.1038/s41598-018-27913-0
14. Prokhorov V. E., Underwater gas bubbles produced by droplet impact: mechanism to trigger volumetric oscillations, *Phys. Fluids*, 2023, vol. 35, pp. 033314. <https://doi.org/10.1063/5.0140484>
15. Gillot G., Derec C., Genevaux J.-M., et al., A new insight on a mechanism of air-borne and underwater sound of a drop impacting a liquid surface, *Phys. Fluids*, 2020, vol. 32(6), pp. 062004.
16. Mudiar D., Pawar S., Gopalakrishnan V., et al., Electric field enlarges rain drops beneath electrified clouds: Observational evidence, *Geo. Research Lett.*, 2021, vol. 48, pp. e2021GL093577. DOI: 10.1029/2021GL093577
17. Grigor'ev A. I., Shirjaeva S. O., *Storm sketches: St. Elmo's fire, glow of tornado funnels, various lightnings*, M.: Direkt-Media; 2021 [in Russian].
18. Zeleny J., The electrical discharge from liquid points, and a hydrostatic method of measuring the electric intensity at their surfaces, *Phys. Rev.*, 1914, vol. 3(2), pp. 69–91. DOI:10.1103/PhysRev.3.69
19. Tucker N., Stanger J., Staiger M. P., et al., The history of the science and technology of electrospinning from 1600 to 1995, *J. of Eng. Fibers and Fabrics, Special iss.*, 2012, vol. 7(2), pp. 63–71. DOI:10.1177/155892501200702S10
20. Wesdemiotis C., Williams-Pavlangos K., Keating A., et al., Mass spectrometry of polymers: A tutorial review, *Mass. Spec. Rev.*, 2023, pp. 1–50. DOI: 10.1002/mas.21844

21. Chashechkin Yu. D., Prokhorov V. E., Androsenko V. N., Modeling the effect of an electric field on drop flows, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2023, vol. 24, iss. 4 [in Russian]. <http://chem-phys.edu.ru/issues/2023-24-4/articles/1057>
22. Chashechkin Yu. D., Prokhorov V. E., Electric Field effect on the dynamics of the structural flow components in the case of gravity-induced separation of a water drop, *Fluid Dynamics*, 2024, vol. 59(3), pp. 401–414. DOI: 10.1134/S0015462824602419
23. Landau L. D., Lifshitz E. M., *Gidrodinamika*, M.: Nauka, 1986, 736 p. [in Russian].
24. Chashechkin Yu. D., Foundations of engineering mathematics applied for fluid flows, *Axioms*, 2021, vol. 10, pp. 286. DOI: 10.3390/axioms10040286
25. Feistel R., Thermodynamic properties of seawater, ice and humid air: TEOS-10, before and beyond, *Ocean Sciences*, 2018, vol. 14, pp. 471–502.
26. Harvey A., Hrubý J., Meier K., Improved and always improving: reference formulations for thermo-physical properties of water, *J. of Phys. and Chem. Ref. Data*, 2023, vol. 52, pp. 011501. DOI: 10.1063/5.0125524
27. Notz P. K., Basaran O. A., Dynamics of drop formation in an electric field, *J. of Colloid and Interface Sci.*, 1999, vol. 213(1), pp. 218–237. doi:10.1006/jcis.1999.6136
28. Chashechkin Yu. D., Ilinykh A. Y., Intrusive and impact modes of a falling drop coalescence with a target fluid at rest, *Axioms*, 2023, vol. 12(4), pp. 374. <https://doi.org/10.3390/axioms12040374>
29. GFK IPMech RAS: Hydrophysical complex for modeling hydrodynamic processes in the environment and their impact on underwater technical objects, as well as the spread of impurities in the ocean and atmosphere. <http://www.ipmnet.ru/uniquequip/gfk/#equip>

Статья поступила в редакцию 6 мая 2025 г.