

# Modeling the Effect of an Electric Field on Drop Flows

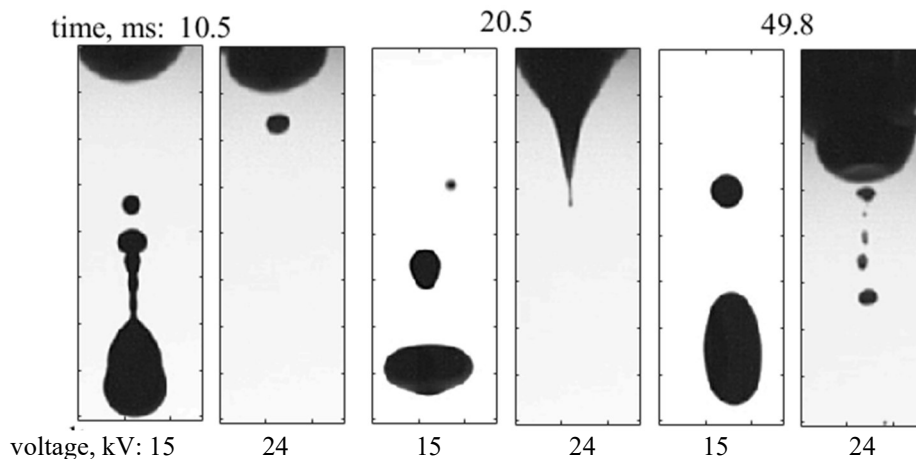
Yu. D. Chashechkin, V. E. Prokhorov, V. N. Androsenko

*Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics, Russian Academy of Sciences (IPMech RAS),  
Moscow, 119526, Russia  
yulidch@gmail.com*

## Abstract

A stand has been developed for modeling the effect of an electric field on the structure and dynamics of drop flows. The system of fundamental equations of fluid mechanics was chosen as the theoretical basis of the technique, including the equations of state for the Gibbs potential and the density of the medium, differential equations of continuity and transfer of momentum, matter and energy, the properties of which are analyzed taking into account the compatibility condition. The estimates of the total energy components, the main dimensionless parameters of the flows under study, are given. A high-resolution video recording of the flow pattern was carried out under the gravitational separation of a freely falling drop and under the additional action of an external electrostatic field. The evolution of the shape and dynamics of the structural components motion – the drop itself and the satellite, as well as the secondary satellite in the absence of an electric field – is traced.

Keywords: drop pinch-off, gravity, high-voltage field, decay, satellite.



Pairs of flow patterns for two voltages of  $\Phi_e = 15$  and 24 kV, recorded at the same time points. The transition to a high voltage abruptly changes the separation scenario, generating, along with single drops, filamentous structures and multiple small droplets.

УДК 532.5

# Моделирование влияния электрического поля на капельные течения

Ю. Д. Чашечкин, В. Е. Прохоров, В.Н. Андросенко

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

## Аннотация

Разработан стенд для моделирования влияния электрического поля на структуру и динамику капельных течений. В качестве теоретической основы методики выбрана система фундаментальных уравнений механики жидкостей, включающая уравнения состояния для потенциала Гиббса и плотности среды, дифференциальные уравнения неразрывности и переноса импульса, вещества и энергии, свойства которой анализируются с учетом условия совместности. Приведены оценки компонентов полной энергии, основных безразмерных параметров изучаемых течений. Проведена высокоразрешающая видеорегистрация картины течения при гравитационном отрыве свободно падающей капли и при дополнительном воздействии внешнего электростатического поля. Прослежена эволюция формы и динамики движения структурных компонентов – собственно капли и сателлита, а также вторичного сателлита в отсутствие электрического поля.

Ключевые слова: гравитация, высоковольтный источник, отрыв, капля, сателлит.

## 1. Введение

Темп экспериментальных исследований капельных течений, которые стали систематически проводиться в конце XIX века [1–3] и вскоре были дополнены изучением влияния статического электрического поля [4–6], значительно ускорился в последние годы. Развитие изучения электрогидродинамических течений обусловлено действием нескольких взаимно дополняющих факторов: научной содержательностью темы, детально обоснованной еще в [7], совершенствованием осветительной и регистрирующей техники эксперимента, растущим числом практических приложений научных результатов в различных технологиях химической (электрораспыление в масс-спектрокопии и хромато-масс-спектральном анализе [8, 9]), фармацевтической, пищевой промышленности, нанесении лакокрасочных покрытий, объемной печати и в сельском хозяйстве (электрораспыление удобрений и средств защиты растений [10]).

Наряду с общими задачами отрывных течений [11] исследуются явления электризации в слабопроводящих жидкостях [12], изучается динамика отрыва нейтральной капли от капилляра [13, 14], объемные осцилляции и распространение коротких капиллярных волн по ее поверхности во время свободного падения [15]. Анализ форм растущей капли и расчеты быстрой фазы процесса ее отрыва от среза капилляра, эволюция сателлита – быстро осциллирующей капельки, в которую трансформируется оторвавшаяся перемычка, соединяющая растущую каплю с жидкостью на срезе капилляра, приведены в [16–18]. Режимы картины слияния свободно падающей капли с покоящейся принимающей жидкостью в отсутствие внешних электрических и магнитных полей изучены в [19, 20].

В последние годы активно развивается общая термодинамика капельных течений неоднородных жидкостей со свободной поверхностью [21, 22]. Одновременно совершенствуются

методы анализа полной системы фундаментальных уравнений [23], учитывающие трансформацию потенциальной внутренней энергии, освобождающейся при уничтожении свободной поверхности [24]. Применение методов теории сингулярных возмущений, при реализации условия совместности, позволяет одновременно рассчитывать разномасштабные структурные компоненты формирующихся течений и волн [25].

Уже в первых опытах было установлено сильное влияние внешнего электрического поля на картину течения в процессе отрыва капли под действием собственного веса, и выделены несколько характерных режимов течений [4–6]. Воздействие слабого электрического поля, формирующего электрический заряд на поверхности жидкости, вызывает изменение формы и некоторое уменьшение объема капли [5]. Отдельные данные экспериментальных исследований картины отрыва и оценки размеров заряженных капель воды в воздухе, циклогексане и трансформаторном масле приведены в [26].

В сильном электрическом поле на капилляре формируются единичные или множественные тонкие нити, распадающиеся на мелкие капельки [4,5]. Большая разность потенциалов также вызывает изменение формы плоской поверхности заряженной жидкости, на которой образуются «конуса Тейлора» – заостренные шипы, с вершин которых вылетают мелкие капельки [27].

Учитывая научную содержательность темы, распространенность электрокапельных технологий, интерес представляет детальное изучение полной картины отрыва капли в электрическом поле и прослеживание ее дальнейшей эволюции с применением современной техники регистрации картин течений. В данной работе приводятся описание новой установки и сравнительные результаты высокоразрешающей визуализации картины течений при гравитационном отрыве висящей на срезе капилляра капли в отсутствие и под действием электрического поля, когда в течении сохраняются капельные элементы, и не происходит полный распад течения на нитевидные струи.

## 2. Параметризация

В соответствии с рекомендациями Международной ассоциации свойств воды и пара [28] жидкость или газ определяются как «текущая среда», которая характеризуется потенциалом Гиббса  $G = -s_e T + VP + S_b \sigma + \mu_i S_i$  [29], а также его производными – термодинамическими величинами – плотностью  $\rho$ , удельным объемом  $V = 1/\rho$ , энтропией  $s_e$ , давлением  $P$ , температурой  $T$ , концентрацией растворенных веществ или взвешенных частиц  $S_i$ , химическим потенциалом  $\mu_i$ , коэффициентом поверхностного натяжения  $\sigma$  на контактной поверхности площадью  $S_b$ . В число определяющих параметров также входят кинетические коэффициенты: кинематической вязкости  $\nu$ , температуропроводности  $\kappa_T$ , диффузии  $\kappa_S$ ; термодинамические коэффициенты: сжимаемости  $\alpha_P$ , теплового расширения  $\alpha_T$ , солевой контракции  $\alpha_S$ ; параметры другой физической природы, в частности, скорости звука  $c_s^w$ , света  $c_l^w$ , электропроводности  $\eta$  и других физических свойств [21–24]. На твердых стенках и свободной поверхности система уравнений дополняется физически обоснованными граничными условиями [23–25].

Термодинамический потенциал распределен в капельных жидкостях неравномерно [30, 31]. Методами оптической и рентгеновской рефлектометрии, атомно-силовой микроскопии установлено, что плотность, диэлектрическая проницаемость, дипольный момент в толще жидкости и в структурно выделенном приповерхностном слое толщиной порядка размера молекулярного кластера ( $\delta_\sigma \sim 10^{-6}$  см) заметно отличаются [31, 32]. С анизотропией атомно-молекулярных взаимодействий связывается формирование доступной потенциальной поверхностной энергии  $En_\sigma$ , химической и других видов внутренней энергии,  $En_{i,a}$ , которая может трансформироваться в тепловую или механическую энергию течений жидкости, а также работу по созданию новой свободной поверхности.

Как показывают опыты, поверхности жидкости часто оказываются спонтанно заряженными, вследствие влияния растворенных веществ или действия внешних электромагнитных полей [33, 34]. Появление зарядов, взаимодействующих между собой и внешними полями, вносит в общий баланс дополнительную энергию  $En_e$ , которая также влияет на динамику и структуру сред.

Дополнительно следует отметить, что, как правило, жидкости и газы имеют сложную метастабильную внутреннюю структуру, включающую кластеры, клатраты, сетки, войды, свободные молекулы и другие ассоциаты физической и химической природы [35, 36]. С поверхностями ассоциатов связаны собственные компоненты внутренней энергии  $En_{i,a}$ . Ассоциаты непрерывно перестраиваются под действием тепловых флуктуаций и внешних возмущений. Изменения структуры среды сопровождаются преобразованием части внутренней энергии в другие формы и наоборот, потерей части кинетической энергии при образовании новых контактных поверхностей. Возникающие градиенты термодинамических потенциалов формируют тонкие прослойки или волокна в толще и на поверхности жидкости [37].

С учетом сложной и перестраиваемой внутренней структуры среды, влияющей на динамику и структуру капельных течений, в число основных размерных параметров, характеризующих изучаемые явления, включаются потенциалы Гиббса капли  $G_d$  и воздушной среды  $G_a$  (индексы отмечают принадлежность параметра), плотности  $\rho_{d,a}$ , кинематическая  $\nu_{d,a}$  и динамическая  $\mu_{d,a}$  вязкости; полный  $\sigma_d^a$  и нормированный на плотность жидкости коэффициент поверхностного натяжения  $\gamma_d^a = \sigma_d^a / \rho_d$ , эквивалентный диаметр  $D$ , площадь поверхности  $S_d$ , объем  $V_d$ , масса  $M = \rho V_d$ , импульс  $p_d = MU$  и скорость  $U$  в момент отсоединения капли от перемычки; доступная потенциальная поверхностная энергия (ДППЭ)  $En_\sigma = \sigma S_d$ , кинетическая энергия  $En_k = MU^2/2$ . В число параметров процесса также входят потенциальная энергия капли  $En_p = MgD$  на масштабе  $D$  в гравитационном поле с ускорением свободного падения  $g$ , энергия электрического поля  $En_e = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 V_d}{2} \left( \frac{\Phi_e}{H_e} \right)^2$ , значение которой определяется объемом капли  $V_d$  и напряженностью приложенного поля  $E_e = \Phi_e / H_e$ , которое обычно принимается однородным [20, 38]. Здесь  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость жидкости капли,  $\varepsilon_0$  – универсальная диэлектрическая постоянная,  $H_e$  – расстояние между электродами, к которым приложен потенциал  $\Phi_e$ .

Полная энергия падающей сферической капли  $En_d = En_k + En_\sigma + En_e$  складывается из экстенсивной кинетической энергии с дифференциалом  $dE_k = 0.5 \rho U^2 dV$ , ДППЭ, заключенной в приповерхностном шаровом слое толщиной порядка размера молекулярного кластера  $\delta_\sigma \sim 10^{-6}$  см объемом  $V_\sigma = \delta_\sigma S_d$  и массой  $M_\sigma = \rho V_\sigma$ , а также энергии электростатического поля  $En_e = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 V_d}{2} \left( \frac{\Phi_e}{H_e} \right)^2$ . По мере свободного падения капли ее кинетическая энергия растет вследствие преобразования потенциальной энергии с масштабом  $En_p = MgD$ .

Базовая группа линейных масштабов, которые определяются физическими свойствами сред, включает капиллярно-гравитационное отношение  $\delta_g^\gamma = \sqrt{\gamma/g}$ , входящее в дисперсионное уравнение коротких поверхностных волн [23], и диссипативно-капиллярный масштаб  $\delta_\gamma^\nu = \nu^2/\gamma$ . Группа линейных масштабов, зависящих от скорости капли, включает прандтлев  $\delta_U^\nu = \nu/U$  и капиллярный  $\delta_U^\gamma = \gamma/U^2$  масштабы.

Соответственно, одна часть временных масштабов задачи включает только параметры среды –  $\tau_\gamma^\nu = \nu^3/\gamma^2$ ,  $\tau_g^\gamma = \sqrt[4]{\gamma/g^3}$ , другая – размер капли  $\tau_\gamma^D = \sqrt{D^3/\gamma}$ ,  $\tau_\gamma^{\nu D} = \nu D/\gamma$ , третья –

ее скорость  $\tau_U^D = D/U$ ,  $\tau_g^U = U/g$ . Отношения базовых масштабов длины и времени определяют набор характерных капиллярно-диссипативных скоростей задачи:

$$U_v^\gamma = \frac{\delta_\gamma^v}{\tau_\gamma^v} = \frac{\gamma}{\nu}, \quad U_g^\gamma = \frac{\delta_g^\gamma}{\tau_g^\gamma} = \sqrt[4]{\gamma g}, \quad U_g^v = \frac{\delta_\gamma^v}{\tau_g^\gamma} = \sqrt[4]{\frac{\nu^8 g^3}{\gamma^5}}, \quad U_v^g = \frac{\delta_g^\gamma}{\tau_\gamma^v} = \sqrt{\frac{\gamma^5}{g \nu^6}},$$

а также капиллярную скорость  $U_D^\gamma = \sqrt{\gamma/D}$  [32]. Большое число масштабов однородной размерности отражает многообразие и сложность процессов, протекающих в широком диапазоне масштабов – от надмолекулярных порядка  $\delta_c \sim 10^{-6}$  см в процессах освобождения и накопления доступной потенциальной поверхностной энергии, до полного размера области течения.

Отношения характерных масштабов одинаковой размерности задают набор традиционных безразмерных параметров процесса [20, 37]. Он включает следующие числа:

– Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{D}{\delta_U^v} = \frac{UD}{\nu};$$

– Фруда

$$\text{Fr} = \frac{E_k}{E_p} = \frac{U^2}{gD};$$

– Бонда [31, 32]

$$\text{капиллярное } \text{Bo} = \frac{gD^2}{\gamma} \text{ и электрическое } \text{Bo}_e = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 R}{\sigma} \left( \frac{\Phi_e}{H} \right)^2;$$

– Онезорге

$$\text{Oh} = \nu / \sqrt{\gamma D};$$

– Вебера

$$\text{капиллярное } \text{We} = \frac{DU^2}{\gamma} \text{ и электрическое } \text{We}_e = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 R}{\rho U^2} \left( \frac{\Phi_e}{H} \right)^2$$

Здесь скорость капли  $U$  определяется в момент ее отрыва. Отношения скоростей движения отрывающейся капли и собственных скоростей задачи образуют набор капиллярных отношений

$$\text{Ca}_1 = \frac{U}{U_v^\gamma}, \quad \text{Ca}_2 = \frac{U}{U_g^\gamma}, \quad \text{Ca}_3 = \frac{U}{U_g^v}, \quad \text{Ca}_4 = \frac{U}{U_v^g}, \quad \text{Ca}_5 = \frac{U}{U_D^\gamma}$$

Отношения компонентов энергии образуют собственные безразмерные комбинации

$$\mathbf{R}_{En}^{k,\sigma} = \frac{En_k}{En_\sigma}, \quad \mathbf{R}_{En}^{k,e} = \frac{En_k}{En_e}, \quad \mathbf{R}_E^{\sigma,e} = \frac{En_\sigma}{En_e}$$

Два первых отношения независимы, а третье приводится для удобства сравнения условий опытов.

Собственные масштабы задачи определяют требования к выбору размеров области наблюдения, пространственно-временной разрешающей способности инструментов, длительности регистрации быстро эволюционирующей картины течения. Безразмерные отношения позволяют оценить относительный вклад процессов различной природы в общую картину течения и сравнивать условия независимых опытов. Большое число размерных и безразмерных параметров отражает сложность и многообразие одновременно протекающих разномасштабных процессов.

### 3. Стенд для моделирования процессов отрыва заряженных капель

Опыты выполнены на стенде «Моделирования динамики капельных течений в электрическом поле» (ДЗК – динамика заряженной капли), входящем в состав УИУ «ГФК ИПМех РАН» [39], который включает блоки генерации капель, приемную кювету, источник высокого напряжения, осветители, фото- или видео регистрирующую аппаратуру, блок управления и сбора данных. Схема установки представлен на рис. 1.

Принципиальным отличием стенда ДЗК от остальных стендов УИУ «ГФК ИПМех РАН» для моделирования капельных течений [14] является высоковольтный источник 1, обеспечивающий подачу напряжения в диапазоне  $\Phi_e = 0 \div 30$  кВ между анодом и катодом, положение которых определяется условиями опытов. Жидкость в капилляр 2, металлический наконечник которого является анодом, поступает из мерного резервуара 3 (диаметр 9.0 см, объем 400 мл).

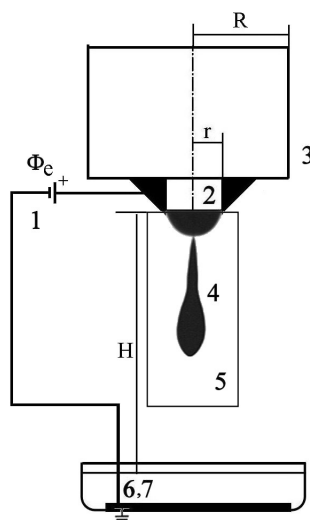


Рис. 1. Схема эксперимента. 1 – высоковольтный источник, 2 – выходной наконечник капилляра (анод,  $r = 0.5$  мм), 3 – мерный резервуар (объем 400 мл,  $R = 45$  мм), 4 – вид капли на экране 5, 6 и 7 – кювета и электрод (катод)

Отрывающаяся капля 4, которая визуализируется на матовом экране 5, падает в кювету 6 с электродом 7. Кювета наполнена водопроводной водой. Экран равномерно освещен двумя светодиодными прожекторами Multiled.

Фотография установки ДЗК приведена на рис. 2. Полюса высоковольтного источника 1 соединены с анодом – выходным наконечником капилляра 2, и пластиной 7 (катодом) на дне кюветы 6. Постоянно натекающая рабочая жидкость из мерного резервуара 3, образует отрывающуюся каплю на срезе капилляра 2, в том числе при наличии электрического поля при включении источника 1. Видеокамера 4 типа *i-speed 717* регистрирует картину течения 8. Полученные видеофильмы накапливаются в памяти (2 Tb) ПК для дальнейшей обработки.

Установка позволяет проводить эксперименты по отрыву капель с высоты до 1 м. Регулировка высоковольтного напряжения – в диапазоне  $\Phi_e = 0 \div 30$  кВ проводится с шагом 1 кВ. Видеокамера *i-speed 717* обеспечивает пространственное разрешение не хуже 0.015 мм (размер пикселя 13.5 мкм).

Видеокамера 4 установлена на штативной головке с четырьмя степенями свободы. Скорость съемки в данных опытах составляла 20000 к/с. Запуск камеры производился в момент максимальной скорости движения маточной жидкости перед отрывом капли (после появления выраженной перемычки, означающей начало активной фазы процесса отделения капли). Обработка данных проводилась в лабораторной системе координат  $x, z$ , в которой ось  $z$  направлена вниз, а ее начало совпадает с верхним краем видеокадра.

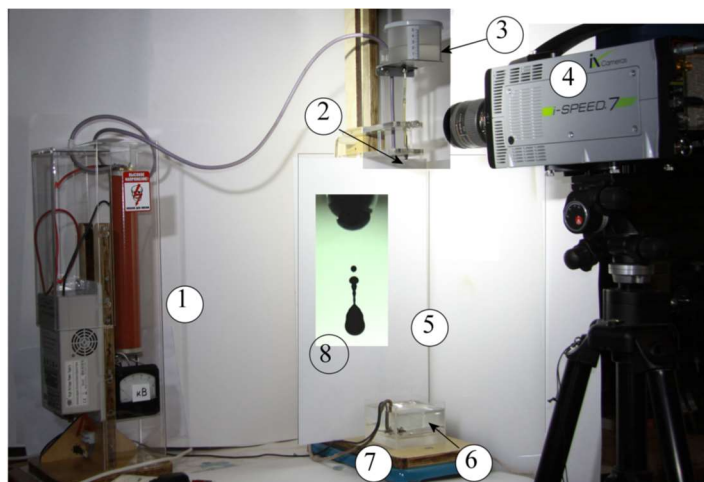


Рис. 2. Экспериментальный стенд: 1 – высоковольтный источник, 2 – выходной наконечник капилляра (анод), 3 – мерный резервуар, 4 – видеокамера *i-speed 717*, 5 – составной экран, 6 – кювета, 7 – подводящий провод с проводящей пластиной (катод), 8 – видеокадр с оторвавшейся каплей

В данной серии опытов окрашенная черными ализариновыми чернилами вода непрерывно поступала в капилляр с постоянным расходом  $Q = 0.006$  мл/с, при этом расходная скорость истечения через выходное отверстие капилляра (диаметр  $d_c = 1$  мм) составляла  $u = 7.6$  мм/с. Высота свободного падения каплей в данных опытах равнялась  $H = 50$  см.

#### 4. Визуализация процесса отрыва незаряженной капли

При выключенном источнике высокого напряжения из отверстия капилляра вытекает жидкость, постепенно принимающая каплевидную форму (рис. 3, *a*). В одном из сечений вытекшего объема жидкости образуется быстро сужающаяся перетяжка (рис. 3, *b*), вытягиваемая в почти цилиндрическую перемычку. Сужение развивается лавинообразно, при этом наибольшая скорость стягивания перетяжки наблюдается внизу перемычки.

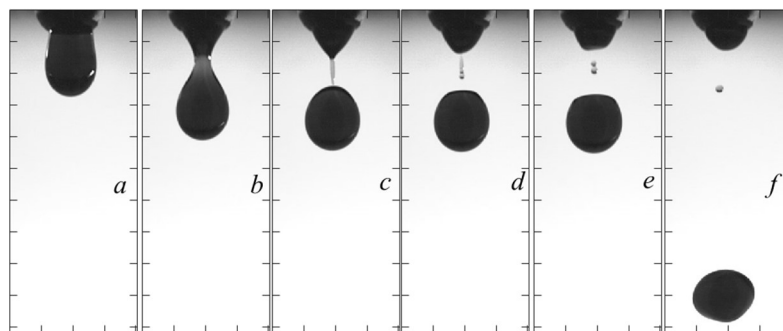


Рис. 3. Отрыв незаряженной капли ( $\Phi_e = 0$  кВ).  
*a-f*:  $t = -258.6, -7.1, 0, 0.75, 1.55, 39$  мс, деление – 4 мм

Далее от перемычки отрывается капля при  $t = 0$ . Перемычка начинает сокращаться, нижний край ее скругляется. Одновременно маточная жидкость начинает быстро стягиваться к срезу капилляра. Область контакта перемычки и маточной жидкости истончается, и, наконец, разрывается. Остаток перемычки стягивается с образованием нескольких перетяжек вначале в форме четок (рис. 3, *d*), а затем в капельку сложной формы (рис. 3, *e, f*). Форма оторвавшейся капли быстро меняется: на рис. 3, *d* верхний край плоский, а далее постепенно скругляется. В момент отрыва от перемычки капля имеет скорость  $u = 0.24$  м/с. Диаметр капли и скорость капли в момент, когда она принимает сферическую форму, равны  $D = 5.3$  мм и  $U = 0.46$  м/с.

Эквивалентный сферический диаметр сателлита составляет  $d_s = 0.6$  мм. Безразмерные параметры основной капли приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Безразмерные параметры при отрыве капли в отсутствии электрического поля

$\Phi_e$ , кВ	Re	Fr	Bo	Bo <sub>e</sub>	Oh	We	We <sub>e</sub>	$R \frac{k, \sigma}{E, n}$
0	1267	1.1	51670	0	0.0016	9.0	0	0.75

Таблица 2

Отношения характерных капиллярных скоростей

$\Phi_e$ , кВ	Ca <sub>1</sub>	Ca <sub>2</sub>	Ca <sub>3</sub>	Ca <sub>4</sub>	Ca <sub>5</sub>
0	1267	2.0	$4 \times 10^5$	0.01	2.0

Качественно картина течения согласуется с фотографиями, представленными в [14, 15], где процесс отрыва и последующей эволюции капли описан более подробно.

## 5. Влияние электрического поля на отрыв капли

### 5.1. Отрыв при напряжении 15 кВ

В условиях проведенных опытов сохранились основные элементы течения, наблюдаемые при гравитационном отрыве капли (см. рис. 3, а также [14, 15]), однако их форма существенно отличалась. Картину течения при отрыве капли в электрическом поле напряжением  $\Phi_e = 15$  кВ демонстрируют выборки из видеофильма (рис. 4).

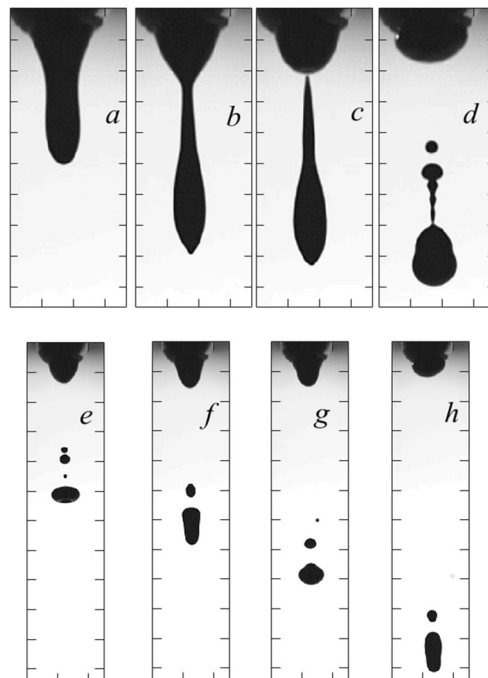


Рис. 4. Отрыв капли при  $\Phi_e = 15$  кВ.  $a-h$ :  $-16.6, -2.1, 0, 4.9, 9.8, 15.2, 22.9, 32.7$  мс. Время от момента отрыва верхнего конца перемычки. Деление, мм: 2 ( $a-d$ ) и 4 ( $e-h$ )

Растущая капля вытягивается под суммарным действием гравитационного и электрического полей (рис. 4,  $a, b$ ). Диаметр образовавшейся струйки начинает сокращаться в ее верх-



ней части, где формируется перетяжка, которая разделяет маточную жидкость и отрывающийся объем булавовидной формы (рис. 4, *c*). Постепенно картина течения усложняется, и в ней можно выделить растущую грушевидную каплю, соединенную с истончающимся нижним концом перемычки (рис. 4, *d*). При этом от перемычки отделился вторичный сферический сателлит диаметром  $d_s = 0.85$  мм. Форма перемычки непрерывно перестраивается, ее нижний конец истончается по мере удаления отрывающейся от нее капли, а верхний скругляется в сферический оголовок. На коническом участке перемычки выделяется несколько сферических утолщений. После окончательного отделения капли перемычка быстро распадается (рис. 4, *e*, здесь и далее для наглядности изменен масштаб), затем стягивается в единое тело с вертикальной симметрией (рис. 4, *f*) и продолжает дальнейшее падение совместно с мелким отделившимся фрагментом (рис. 4, *g*), попутно изменяясь по форме с сохранением симметрии (рис. 4, *h*). Безразмерные параметры основной капли при отрыве в электрическом поле приведены в таблицах 3 и 4

Таблица 3

Безразмерные параметры при отрыве капли под напряжением 15 кВ

$\Phi_e$ , кВ	Re	Fr	Bo	Bo <sub>e</sub>	Oh	We	We <sub>e</sub>	$R_{En}^{k,\sigma}$	$R_{En}^{k,e}$	$R_{En}^{\sigma,e}$
15	2092	16.7	16555	0.026	0.002	20.1	0.0013	1.67	382	228

Таблица 4

Капиллярные отношения характерных скоростей

$\Phi_e$ , кВ	Ca <sub>1</sub>	Ca <sub>2</sub>	Ca <sub>3</sub>	Ca <sub>4</sub>	Ca <sub>5</sub>
15	2092	4.3	$8.5 \times 10^5$	0.01	4.5

## 5.2. Отрыв капли в сильном электрическом поле

Отличительной особенностью процесса отрыва в сильном электрическом поле является образование тонких нитей (процесс электроспиннинга широко использующийся в электрохимических технологиях обработки пластмасс). В проведенных опытах образование нитей наблюдается при напряжении  $\Phi_e = 24$  кВ.

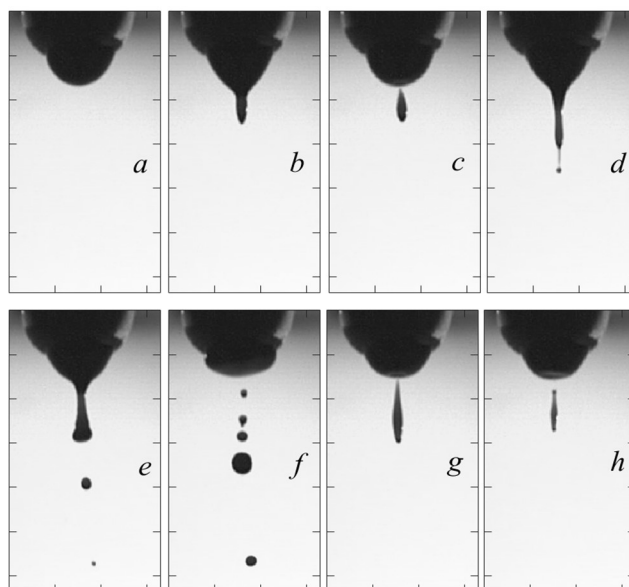


Рис. 5. Отрыв капли при  $\Phi_e = 24$  кВ. *a-h*:  $t = -27.1, -1.75, 0, 51.75, 77.15, 80.75, 122.9, 143.85$  мс. Деление 4 мм. Время отсчитывается от первого отрыва верхнего конца перемычки

Течение начинается с образования полусферического оголовка (рис. 5, *a*), за которым следует заострение (рис. 5, *b*), заканчивающееся отрывом вытянутой капельки (рис. 5, *c*). Следующее заострение – гораздо более вытянутое и оканчивается нитевидным отростком с микрокапелькой на конце (рис. 5, *d*). Затем из маточной жидкости вытягивается фрагмент с обратным заострением, направленным вверх (рис. 5, *e*); при отрыве он распадается на несколько капель, поперечник (1.35, 0.76, 0.50, 0.40 мм) и вертикальный размер (1.42, 0.59, 0.81, 0.63 мм) которых уменьшается в направлении сопла (рис. 5, *f*). В дальнейшем течение состоит из последовательно отрывающихся фрагментов веретенообразной формы (рис. 5, *g*), размер которых со временем уменьшается (рис. 5, *h*).

Отметим нестационарность – глобальную изменчивость картины течения, в которой можно наблюдать отрывающиеся вытянутые элементы (рис. 5, *d*), отдельные капли (рис. 5, *e*), группы капель (рис. 5, *f*), и наконец веретенообразные объемы (рис. 5, *g*, *h*). Часть оторвавшихся элементов распадается (рис. 5, *f*), другие длительное время сохраняют вытянутую форму (рис. 5, *g*, *h*), прежде чем стянуться в сферическую каплю.

## 6. Картина процессов отрыва в единой временной шкале

Для иллюстрации общей изменчивости картины течения на рис. 6 приведена сборка основных элементов картины течения отрыва капли в проведенных опытах для всех трех значений электрического поля. Время отсчитывается от момента отрыва, причем за нулевой отсчет принят момент первичного отрыва для каждого напряжения (рис. 6, *b*). Перед отрывом (рис. 6, *a*) капля и перемычка образуют единое тело. В дальнейшем процесс развивается в зависимости от величины напряжения.

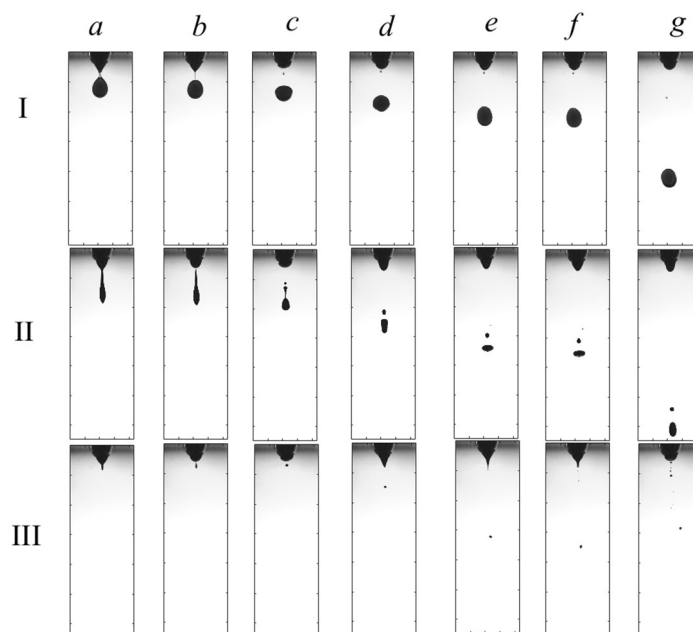


Рис. 6. Эволюция элементов отрыва капли. I, II и III – напряжение  $\Phi_e = 0$ , 15 и 24 кВ. *a–g*,  $t = -1.7, 0, 4.7, 10.5, 19.5, 20.5, 49.8$  мс от момента первого отрыва (*b*). Шкала, мм: 5 и 10 – по горизонтали и вертикали

В отсутствии напряжения капля полностью освобождается от перемычки, которая какое-то время сохраняет контакт с маточной жидкостью (рис. 6, I *b*), но затем полностью отделяется и начинает сворачиваться в сателлит (рис. 6, I *c*). При  $\Phi_e = 15$  и 24 кВ от маточной жидкости отрывается булавообразное составное тело – перемычка вместе с каплей (рис. 6, II *b* и III *b*). Однако размеры отделившихся тел существенно различаются – длина 12.2 для 15 кВ и 2.2 мм для 24 кВ, соответственно. Далее, "булава" при  $\Phi_e = 15$  кВ начинает разделяться на

каплю и остаток перемычки (рис. 6, II c), а при  $\Phi_e = 24$  кВ полностью сворачивается в мелкую капельку без разделения на отдельные компоненты (рис. 6, III c).

На следующей стадии (рис. 6, d) при  $\Phi_e = 0$  и 15 кВ наблюдается раздельное движение капли и сателлита (рис. 6, I d и II d), а при  $\Phi_e = 24$  кВ в процессе участвует только капля (рис. 6, III d). До момента 20.5 мс данный процесс продолжается для всех трех значений  $\Phi_e$  (e, f). Однако затем в течении, находящемся под наиболее высоким напряжением  $\Phi_e = 24$  кВ, начинается новый отрыв, который развивается по другому сценарию (см. рис. 5, f), и вместо "булавы" формируется деформированный усеченный конус (см. рис. 5, e), который быстро распадается на мелкие капельки (см. рис. 5, e, рис. 6, III g).

Отметим, что объем первично освободившейся капли резко уменьшается с ростом напряжения: 78.0, 14.1 и 0.26 мм<sup>3</sup> при, соответственно,  $\Phi_e = 0, 15$  и 24 кВ. Объемы измерены на стадии сферических капель, когда их диаметры  $D = 5.3, 3.0,$  и 0.8 мм, соответственно.

Некоторое сходство в сценариях отрыва, наблюдаемых при  $\Phi_e = 0$  и 15 кВ, позволяет провести сравнение геометрических и кинематических параметров освободившихся капель в обоих опытах. Рисунок 7 демонстрирует осцилляции вертикального и горизонтального размера капель, а также рост скорости по мере падения.

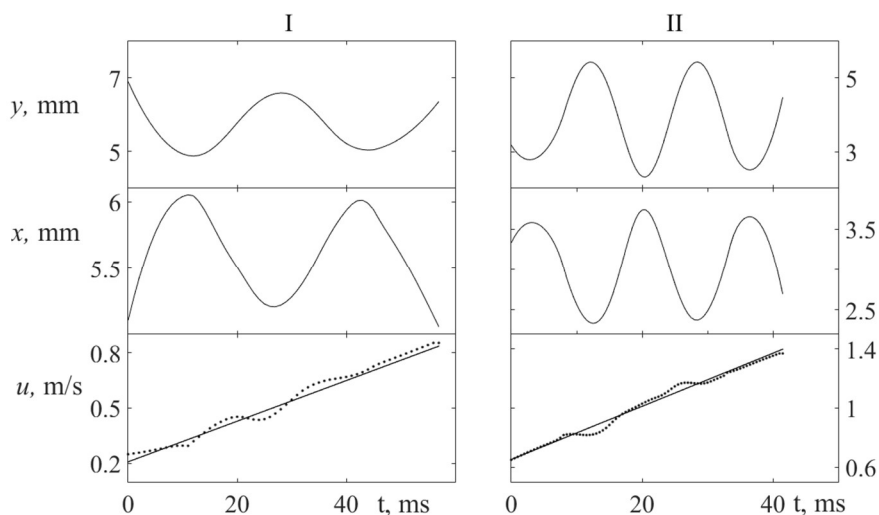


Рис. 7. Эволюция оторвавшейся капли: вертикальный  $y$ , горизонтальный  $x$  размер и скорость падения  $u$  при напряжении  $\Phi_e = 0$  (I) и 15 (II) кВ. Время – от момента полного отрыва капли

Оба размера капли – вертикальный  $y$  и горизонтальный  $x$  – участвуют в почти гармонических осцилляциях с периодом 36 и 16.5 мс у незаряженной (I), и заряженной капли (II).

Рост скорости со временем аппроксимируется линейной функцией  $u = kt + c$ , где для нейтральной капли (I)  $k = 0.011$ ,  $c = 0.018$ , а для заряженной (II)  $k = 0.21$ ,  $c = 0.65$ , соответственно.

## 7. Заключение

Разработан изготовлен и испытан стенд для выполнения высокоразрешающей визуализации быстро эволюционирующей картины течения в процессе формирования, отрыва и трансформации капель в совместно действующих коллинеарных гравитационном и внешнем электростатическом поле с напряжением до  $\Phi_e = 24$  кВ.

Детально прослежено влияние электростатического поля на элементы картины течения и закономерности отрыва собственно капель и сателлитов.

Даны оценки соотношений различных видов энергии капли при гравитационном и электростатическом отрыве.

## Благодарности и ссылки на гранты

Авторы выражают благодарность д.ф.-м.н. Н.Г. Соловьеву за помощь в разработке методики эксперимента и ценные консультации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 19-19-00598 – П «Гидродинамика и энергетика капли и капельных струй: формирование, движение, распад, взаимодействие с контактной поверхностью», <https://rscf.ru/project/19-19-00598/>).

## Литература

1. Guthrie F. On drops.–Part II. // Proc. R. Soc. Lond. 1863, Vol. 13, pp. 457–483. <https://doi.org/10.1098/rsp1.1863.0091>.
2. Thomson J.J.; Newall H.F. On the formation of vortex rings by drops falling into liquids, and some allied phenomena // Proc. R. Soc. Lond. 1885. Vol. 29, pp. 417–436. <https://doi.org/10.1098/rsp1.1885.0034>
3. Worthington A.M. A study of splashes. 1908. London, New York, Bombay, Calcutta: Longmans, Green, and Co. 129 p.
4. Zeleny J. The electrical discharge from liquid points, and a hydrostatic method of measuring the electric intensity at their surfaces // Physical Review. 1914. Vol. 3(2), pp. 69–91. doi:10.1103/physrev.3.69
5. Zeleny J. On the conditions of instability of electrified drops, with application to the electrical discharge from liquid points // Proc. Cambridge Philos. Soc. 1914. Vol. 18. Part 1. P. 71. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.3.69>
6. Zeleny J. Instability of Electrified Liquid Surfaces // Physical Review. 1917. Vol. 10(1). Pp. 1–6. doi:10.1103/physrev.10.1
7. Thompson D. W. On Growth and Form. 2nd ed. Dover: Mineola, New York, USA. 1992. 1116 p.
8. Cloupeau M., Prunet-Foch B. Electrohydrodynamic spraying functioning modes: a critical review // Journal of Aerosol Science. 1994. Vol. 25 (6). Pp. 1021–1036. [https://doi.org/10.1016/0021-8502\(94\)90199-6](https://doi.org/10.1016/0021-8502(94)90199-6)
9. Илларионова Е.К., Сыроватский И.П. Основы метода масс-спектрометрии. Практическое применение метода // Иркутск: ИГМУ. 2021. 49 с.
10. Law S. E. Electrostatic Pesticide Spraying: Concepts and Practice // IEEE Transactions on Industry Applications. 1983. V. IA-19(2). pp. 160–168. doi:10.1109/tia.1983.4504176
11. Глушко Г.С., Иванов И.Э., Крюков И.А. Численное моделирование отрывных течений в соплах // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2010. Т. 9. <http://chemphys.edu.ru/issues/2010-9/articles/143/>
12. Панкратьева И. Л., Полянский В. А. Электризация слабопроводящих многокомпонентных жидкостей при ламинарном течении в плоском канале // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2006. Т. 4. <http://chemphys.edu.ru/issues/2006-4/articles/92/>
13. Peregrine D., Shoker, G., Symon A. The bifurcation of liquid bridges // Journal of Fluid Mechanics. 1990. Vol. 212(1), pp. 25–39. doi:10.1017/S0022112090001835
14. Чашечкин Ю.Д., Прохоров В.Е. Трансформации перемычки в процессе отрыва капли // Прикладная механика и техническая физика. 2016. № 3. С. 16–31. DOI: 10.15372/PMTF20160303
15. Chashechkin Yu. D. Oscillations and Short Waves on a Free Falling Drop Surface (Experiment and Theory) // Proceedings Topical Problems of Fluid Mechanics 2019, Prague, February 20–22, 2019. Pp. 45–52. DOI: <https://doi.org/10.14311/TPFM.2019.007>
16. Eggers J. Nonlinear dynamics and breakup of free-surface flows // Reviews of Modern Physics. 1997. Vol. 69(3). Pp. 865–930. doi:10.1103/revmodphys.69.865
17. Wilkes E., Phillips S. D., Basaran O. A. Computational and experimental analysis of dynamics of drop formation // Physics of Fluids. 1999. Vol. 11(12). Pp. 3577–3598. doi:10.1063/1.870224

18. Bierbrauer, F., Kapur, N., & Wilson, M. C. T. Drop Pinch-Off for Discrete Flows from a Capillary. ESAIM: Proceedings. 2013. Vol. 40. Pp. 16–33. doi:10.1051/proc/201340002
19. 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, Iss.4, 374. <https://doi.org/10.3390/axioms12040374>
20. Notz P.K., Chen A.U., Basaran O.A. Satellite drops: Unexpected dynamics and change of scaling during pinch-off // Physics of Fluids. 2001. Vol. 13(3). Pp. 549–552. doi:10.1063/1.1343906
21. Feistel, R. Thermodynamic properties of seawater, ice and humid air: TEOS-10, before and beyond // Ocean. Sci. 2018. Vol. 14. Pp. 471–502. <https://doi.org/10.5194/os-14-471-2018>
22. Harvey A. H, Hrubý J., Meier K. Improved and Always Improving: Reference Formulations for Thermophysical Properties of Water // Journal of Physical and Chemical Reference Data. 2023. 52, 011501; doi: 10.1063/5.0125524
23. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Том VI. Гидродинамика. М.: Наука. 1986.
24. Chashechkin Y.D. Foundations of engineering mathematics applied for fluid flows // Axioms. 2021. Vol. 10. Iss.4. 286. <https://doi.org/10.3390/axioms10040286>
25. Chashechkin Yu.D, Ochirov A.A. Periodic waves and ligaments on the surface of a viscous exponentially stratified fluid in a uniform gravity field // Axioms.2022. Vol. 11. Iss. 8. 402. doi: 10.3390/axioms11080402
26. Takamatsu T., Yamaguchi M., Katayama T. Formation of single charged drops in a non-uniform electric field // J. of Chemical Engineering of Japan. 1983. Vol. 16(4), pp. 267–272. doi:10.1252/jcej.16.267
27. Rosell-Llompart J.; Grifoll J.; Loscertales I.G. Electrosprays in the cone-jet mode: from Taylor cone formation to spray development // J. of Aerosol Science. 2018. Vol. 18. Pp. 2–31. doi:10.1016/j.jaerosci.2018.04.008
28. Международная ассоциация по изучению свойств воды и пара (The International Association for the Properties of Water and Steam). <http://www.iapws.org/>
29. Гиббс Дж.В. О равновесии гетерогенных веществ. Термодинамические работы. М.–Л-д: ГИТТЛ, 1950.
30. Эйзенберг Д., Кауцман В. Структура и свойства воды. Л-д: ГИМИЗ, 1975.
31. Teschke O., de Souza E.F. Water molecule clusters measured at water/air interfaces using atomic force microscopy // Phys. Chem. Chem. Phys. 2005. Vol. 7(22). Pp. 3856–3865.
32. Бункин Н.Ф., Индукаев К.В., Игнатъев П.С. Спонтанная самоорганизация газовых микропузырей в жидкости // ЖЭТФ. 2007. Т. 131(3), с. 539–555.
33. Lenard, P. Zur Wasserfalltheorie der Gewitter. Anal. Phys. 1921, 370, 629.
34. Karakashev S.I., Grozev N.A. The Law of Parsimony and the Negative Charge of the Bubbles // Coatings. 2020. Vol. 10. 1003; doi:10.3390/coatings10101003
35. Маленков Г.Г. Структура и динамика жидкой воды // Журнал структурной химии. 2006. Т. 47. Приложение, с. S5–S35.
36. Маленков Г.Г. Структура и динамика поверхности тонких плёнок и микрокапель воды // Коллоидный журнал. 2010. Т. 72. № 5. С. 649– 659.
37. Чашечкин Ю.Д. Пакеты капиллярных и акустических волн импакта капли // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2021. № 1(94). С. 73–92. <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2021-1-73-92>
38. Collins R.T., Jones J.J., Harris M.T., and Basaran O.A. Electrohydrodynamic tip streaming and emission of charged drops from liquid cones // Nature Physics. 2008. V. 4(2), pp. 149–154. doi:10.1038/nphys807
39. Гидрофизический комплекс для моделирования гидродинамических процессов в окружающей среде и их воздействия на подводные технические объекты, а также распространения примесей в океане и атмосфере (ГФК ИПМех РАН). 2022. <https://ipmnet.ru/uniquequip/gfk/>

## References

1. Guthrie F., On drops.–Part II, *Proceedings of the Royal Society of London*, 1863, vol. 13, pp. 457–483. <https://doi.org/10.1098/rspl.1863.0091>
2. Thomson J. J.; Newall H. F., On the formation of vortex rings by drops falling into liquids, and some allied phenomena, *Proceedings of the Royal Society of London*, 1885, vol. 29, pp. 417–436. <https://doi.org/10.1098/rspl.1885.0034>
3. Worthington A. M., *A study of splashes*, London, New York, Bombay, Calcutta: Longmans, Green, and Co., 1908, 129 p.
4. Zeleny J., The electrical discharge from liquid points, and a hydrostatic method of measuring the electric intensity at their surfaces, *Physical Review*, 1914, vol. 3(2), pp. 69–91. doi:10.1103/physrev.3.69
5. Zeleny J., On the conditions of instability of electrified drops, with application to the electrical discharge from liquid points, *Proceedings Cambridge Philos. Society*, 1914, vol. 18, part 1, p. 71. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.3.69>
6. Zeleny J., Instability of Electrified Liquid Surfaces, *Physical Review*, 1917, vol. 10, no. 1, pp. 1–6. doi:10.1103/physrev.10.1
7. Thompson D. W., *On Growth and Form*, 2nd ed.; Dover: Mineola, New York, USA, 1992, 1116 p.
8. Cloupeau M., Prunet-Foch B., Electrohydrodynamic spraying functioning modes: a critical review, *Journal of Aerosol Science*, 1994, vol. 25, no. 6, pp. 1021–1036. [https://doi.org/10.1016/0021-8502\(94\)90199-6](https://doi.org/10.1016/0021-8502(94)90199-6)
9. Illarionova E. K., Syrovatskiy I. P., *Fundamentals of the mass spectrometry method. Practical application of the method*, Irkutsk: IGMU, 2021, 49 p. [in Russian].
10. Law S. E., Electrostatic Pesticide Spraying: Concepts and Practice, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-19, no. 2, pp. 160–168. doi:10.1109/tia.1983.4504176
11. Glushko G., Ivanov I., Kryukov I., Numerical simulation of separated flow in nozzles, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2010, vol. 9. <http://chemphys.edu.ru/issues/2010-9/articles/143/>
12. Pankratieva I., Polyanskiy V., Electrization of weakly conducting multicomponent liquids at laminar flow in a flat channel, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2006, vol. 4. <http://chemphys.edu.ru/issues/2006-4/articles/92/>
13. Peregrine D., Shoker G., Symon A., The bifurcation of liquid bridges, *Journal of Fluid Mechanics*, 1990, vol. 212, no. 1, pp. 25–39. doi:10.1017/S0022112090001835
14. Chashechkin Yu. D., Prokhorov V. E. Transformation of the bridge during separation of a droplet, *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2016, vol. 57, no. 3, pp. 402–415. doi: 10.15372/PMTF20160303
15. Chashechkin Yu. D., Oscillations and Short Waves on a Free-Falling Drop Surface (Experiment and Theory), *Proceedings Topical Problems of Fluid Mechanics*, 2019, Prague, 2019, pp. 45–52. DOI: <https://doi.org/10.14311/TPFM.2019.007>
16. Eggers J., Nonlinear dynamics and breakup of free-surface flows, *Reviews of Modern Physics*, 1997, vol. 69, no. 3, pp. 865–930. doi:10.1103/revmodphys.69.865
17. Wilkes E., Phillips S. D., Basaran O. A., Computational and experimental analysis of dynamics of drop formation, *Physics of Fluids*, 1999, vol. 11, no. 12, pp. 3577–3598. doi:10.1063/1.870224
18. Bierbrauer F., Kapur N., and Wilson M. C. T., Drop Pinch-Off for Discrete Flows from a Capillary, *ESAIM: Proceedings*, 2013, vol. 40, pp. 16–33. doi:10.1051/proc/201340002
19. 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, iss. 4, 374. <https://doi.org/10.3390/axioms12040374>
20. Notz P. K., Chen A. U., Basaran O. A., Satellite drops: Unexpected dynamics and change of scaling during pinch-off, *Physics of Fluids*, 2001, vol. 13, no. 3, pp. 549–552. doi:10.1063/1.1343906
21. Feistel R., Thermodynamic properties of seawater, ice and humid air: TEOS-10, before and beyond, *Ocean. Sci.*, 2018, vol. 14, pp. 471–502. <https://doi.org/10.5194/os-14-471-2018>

22. Harvey A. H, Hrubý J., Meier K., Improved and Always Improving: Reference Formulations for Thermophysical Properties of Water, *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 2023, vol. 52, 011501. DOI:10.1063/5.0125524
23. Landau L. D., Lifshitz E. M., Theoretical Physics. Volume VI. Hydrodynamics, M: Nauka, 1986. [in Russian].
24. Chashechkin Y. D., Foundations of engineering mathematics applied for fluid flows, *Axioms*, 2021, vol. 10, iss. 4. 286. <https://doi.org/10.3390/axioms10040286>
25. Chashechkin Yu. D., Ochirov A. A., Periodic waves and ligaments on the surface of a viscous exponentially stratified fluid in a uniform gravity field, *Axioms*, 2022, vol. 11, iss. 8. 402. doi: 10.3390/axioms11080402
26. Takamatsu T., Yamaguchi M., Katayama T., Formation of single charged drops in a non-uniform electric field, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 1983, vol. 16, no. 4, pp. 267–272. doi:10.1252/jcej.16.267
27. Rosell-Llompарт J., Grifoll J., Loscertales I.G., Electrosprays in the cone-jet mode: from Taylor cone formation to spray development, *Journal of Aerosol Science*, 2018, vol. 18, pp. 2–31. doi:10.1016/j.jaerosci.2018.04.008
28. The International Association for the Properties of Water and Steam. <http://www.iapws.org/>
29. Gibbs J. W., *The scientific papers in two volumes. Vol. 1. Thermodynamics*, New York: Longmans, Green, and Co., 1906.
30. Eisenberg D., Kautzman W., *Structure and Properties of Water*, Oxford, Clarendon Press, 1969.
31. Teschke O., de Souza E. F., Water molecule clusters measured at water/air interfaces using atomic force microscopy, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2005, vol. 7, no. 22, pp. 3856–3865. <https://doi.org/10.1039/B511257E>
32. Bunkin N. F., Indukayev K. V., Ignat'yev P. S., Spontaneous self-organization of gas microbubbles in a liquid, *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 2007, vol. 131, no. 3, pp. 539-555 [in Russian].
33. Lenard P., Zur Wasserfalltheorie der Gewitter, *Anal. Phys.*, 1921, vol. 370, pp. 629–639.
34. Karakashev S. I., Grozev N. A., The Law of Parsimony and the Negative Charge of the Bubbles, *Coatings*, 2020, vol. 10, no. 10. 1003. doi:10.3390/coatings10101003
35. Malenkov G. G., Structure and dynamics of liquid water, *J. Struct. Chem.*, 2006, vol. 47 (Suppl 1), pp. S1–S31. <https://doi.org/10.1007/s10947-006-0375-8>
36. Malenkov G. G., Structure and dynamics of surfaces of thin films and water microdroplets, *Colloid J.*, 2010, vol. 72, pp. 653–662. <https://doi.org/10.1134/S1061933X1005011X>
37. Chashechkin Yu. D., Packets of capillary and acoustic waves of drop impact, *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2021, vol. 1, no. 94, pp. 73–92 [in Russian]. DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2021-1-73-91>
38. Collins R. T., Jones J. J., Harris M. T., and Basaran O. A., Electrohydrodynamic tip streaming and emission of charged drops from liquid cones, *Nature Physics*, 2008, vol. 4, no. 2, pp. 149–154. doi:10.1038/nphys807
39. Unique Research Facility "Hydrophysical complex for modeling hydrodynamic processes in the environment and their impact on underwater technical objects, as well as the transport of impurities in the ocean and atmosphere (URF "HPC IPMech RAS)", <http://www.ipmnet.ru/uniquequip/gfk>. 2022

Статья поступила в редакцию 3 июля 2023 г.