

03

## Высокоразрешающая визуализация гравитационного отрыва капли воды в электростатическом поле

© Ю.Д. Чашечкин, В.Е. Прохоров

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН,  
119526 Москва, Россия  
e-mail: yulidch@gmail.com

Поступило в Редакцию 19 июня 2023 г.

В окончательной редакции 19 сентября 2023 г.

Принято к публикации 21 сентября 2023 г.

Проведена высокоразрешающая видеорегистрация картины гравитационного отрыва свободно падающей капли при дополнительном действии внешнего электростатического поля. Прослежена эволюция формы и динамики движения структурных компонентов — собственно капли и сателлита, а также вторичного сателлита в отсутствие электрического поля. Приведены оценки компонентов полной энергии, основных масштабов и безразмерных параметров изучаемого течения.

**Ключевые слова:** капля, гравитация, электростатическое поле, эволюция формы, высоковольтный источник, скоростная видеосъемка.

DOI: 10.61011/JTF.2023.11.56485.151-23

### Введение

Темп экспериментальных исследований геометрии и динамики капли, отрывающейся под действием собственного веса, которые начали проводиться в конце XIX века [1,2] и вскоре были дополнены изучением влияния статического электрического поля [3–5], значительно ускорился в последнее десятилетие. Интерес к изучению электрогидродинамических течений обусловлен действием нескольких взаимно дополняющих факторов: научной содержательностью темы, совершенствованием осветительной и регистрирующей техники эксперимента, растущим числом практических приложений научных результатов в технологиях химической, фармацевтической, пищевой промышленности, нанесения лакокрасочных покрытий, объемной печати и в сельском хозяйстве (электрораспыления удобрений и средств защиты растений [6]).

В опытах регистрировались картина отрыва нейтральной капли от капилляра [7–9], объемные осцилляции и распространение коротких капиллярных волн по ее поверхности во время свободного падения [10,11]. Определение форм растущей капли и расчеты быстрой фазы процесса отрыва от среза капилляра приведены в [12,13]. Эволюция сателлита — быстро осциллирующей капельки, в которую трансформируется оторвавшаяся перемычка, соединяющая растущую каплю с жидкостью на срезе капилляра, — прослежена в [14]. Картина слияния свободно падающей капли с покоящейся принимающей жидкостью в отсутствие внешних электрических и магнитных полей визуализирована в [15,16].

Следует отметить, что в последние годы активно развивается общая термодинамика неоднородных капельных жидкостей со свободной поверхностью [17,18]. Одновременно совершенствуются методы анализа пол-

ной системы фундаментальных уравнений [19], учитывающие трансформацию внутренней энергии при уничтожении свободной поверхности [20]. Применение методов теории сингулярных возмущений при реализации условия совместности позволяет одновременно рассчитывать разномасштабные структурные компоненты формирующихся течений [20].

При анализе влияния внешнего электрического поля на картину течения в процессе отрыва капли под действием собственного веса были выделены несколько характерных режимов течений [3–5]. Действие слабого электрического поля приводит к изменению формы и уменьшению объема капли, отрывающейся от капилляра [4]. В сильном поле течение распадается на нитевидные струи и мелкие капли. Аналитическая теория гравитационного отрыва заряженных капель развивалась в [21,22], детальные расчеты процесса наполнения и гравитационного отрыва капли от капилляра в слабом электрическом поле представлены в [23,24]. Данные исследований картины отрыва и оценки размеров заряженных капель воды в воздухе, циклогексане и трансформаторном масле приведены в [25].

В сильном электрическом поле на капилляре формируются единичные или множественные тонкие нити, распадающиеся на мелкие капельки [4,26]. Большая разность потенциалов также вызывает изменение формы плоской поверхности заряженной жидкости, на которой образуются „конусы Тейлора“ — заостренные шипы, с вершин которых вылетают мелкие капельки [27].

Учитывая научную содержательность темы, а также распространенность электрокапельных технологий, интерес представляет детальное изучение картины отрыва капли в электрическом поле и прослеживание ее эволюции с применением современной техники регистрации

картин течений. В настоящей работе приводятся 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.

## 1. Параметризация

Ранее проведенные исследования показали, что на срезе капилляра или кончике сплошной иглы (шпица) натекающая жидкость вначале собирается в растущий объем грушевидной формы, затем на его поверхности появляется перетяжка, отделяющая формирующуюся каплю от маточной жидкости, которая превращается в перемычку — тонкую струйку (мостик, шейку), соединяющую растущую каплю с маточной жидкостью — остатком жидкости на источнике [7,28–30]. В процессе формирования и отрыва перемещаются и нижняя кромка капли, и контактирующая с перемычкой верхняя, и центр масс.

В гравитационном поле капля грушевидной формы отделяется от нижней кромки перемычки, которая остается соединенной с маточной жидкостью. После разрыва перемычки выпуклая верхняя кромка капли быстро втягивается внутрь, а освободившаяся капля начинает свободное падение со скоростью  $U$ . Далее форма оторвавшейся капли быстро меняется и с некоторым запаздыванием приближается к сферической, параметры которой обычно используются при параметризации течения.

Из анализа полной системы уравнений механики жидкостей, физически обоснованных уравнений состояния и граничных условий [17–20] применительно к задачам отрыва и падения капли следует, что в число основных размерных параметров, характеризующих изучаемое течение, входят 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 входит также 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 считается однородным [29,30]. Здесь  $\varepsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость жидкости капли,

$\varepsilon_0$  — универсальная диэлектрическая постоянная,  $H_e$  — расстояние между электродами, к которым приложено напряжение  $\Phi_e$ .

Важную роль в процессах перестройки структуры течений играют процессы трансформации ДППЭ  $En_\sigma$ , обусловленной анизотропией атомно-молекулярных взаимодействий в тонком приповерхностном слое жидкости на границе жидкости и отдельных ассоциатов физической или химической природы (кластеров, клатратов, кластратов, полос, войдов с изолированными атомами и других), которые спонтанно возникают в жидкости [31]. Неоднородности распределения плотности и других термодинамических величин в жидкости на масштабах порядка размера молекулярного кластера  $\delta_\sigma \sim 10^{-6}$  см зарегистрированы в толще и на поверхности жидкости с помощью высокоразрешающих инструментов [32,33]. При уничтожении контактирующих свободных поверхностей при слиянии капли ДППЭ за времена порядка  $\tau_\sigma \sim \delta_\sigma/U$ , где  $U$  — скорость течения, преобразуется в возмущения температуры, давления, энергию механического движения [20]. Потенциальная поверхностная энергия сферической капли  $En_\sigma$  заключена в шаровом слое толщиной  $\delta_\sigma \sim 10^{-6}$  см, объем и масса которого равны  $V_\sigma = \delta_\sigma S_d$  и  $M_\sigma = \rho V_\sigma$  соответственно.

Базовая группа линейных масштабов, которые определяются физическими свойствами сред, включает капиллярно-гравитационное отношение  $\delta_g^y = \sqrt{\gamma/g}$ , входящее в дисперсионное уравнение коротких поверхностных волн [19], и диссипативно-капиллярный масштаб  $\delta_v^y = \nu^2/\gamma$ . Группа линейных масштабов, зависящих от скорости капли, включает масштабы Прандтля  $\delta_U^y = \nu/U$  и капиллярный  $\delta_U^y = \gamma/U^2$  масштабы.

Соответственно, одна часть временных масштабов задачи включает только параметры среды —  $\tau_v^y = \nu^3/\gamma^2$ ,  $\tau_g^y = \sqrt[4]{\gamma/g^3}$ , другая — размер капли —  $\tau_v^D = \sqrt{D^3/\gamma}$ ,  $\tau_v^y = \nu D/\gamma$ , третья — ее скорость —  $\tau_U^D = D/U$ ,  $\tau_U^y = U/g$ . Отношения базовых масштабов длины и времени определяют набор характерных капиллярно-диссипативных скоростей задачи:  $U_v^y = \delta_v^y/\tau_v^y = \gamma/\nu$ ,  $U_g^y = \delta_g^y/\tau_g^y = \sqrt[4]{\gamma g}$ ,  $U_g^v = \delta_v^y/\tau_g^y = \sqrt[4]{\nu^8 g^3/\gamma^5}$ ,  $U_v^g = \delta_g^y/\tau_v^y = \sqrt{\gamma^5/g\nu^6}$ , а также капиллярную скорость  $U_D^y = \sqrt{\gamma/D}$  [30]. 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 ДППЭ до полного размера области течения.

Отношения характерных масштабов одинаковой размерности задают набор традиционных безразмерных параметров процесса [15,30]. Он включает числа Рейнольдса  $Re = D/\delta_U^y = UD/\nu$ , Фруда:  $Fr = E_k/E_p = U^2/gD$ , капиллярное  $Bo = gD^2/\gamma$  и электрическое

$$Bo_e = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 D}{\sigma} \left( \frac{\Phi_e}{H} \right)^2$$

число Бонда [29,30], число Онезорге  $Oh = \nu / \sqrt{\gamma D}$ , а также капиллярное  $We = DU^2/\gamma$  и электрическое

$$We_e = \frac{\epsilon \epsilon_0}{\rho U^2} \left( \frac{\Phi_e}{H} \right)^2$$

числа Вебера.

Отношения скоростей движения оторвавшейся капли и собственных скоростей задачи образуют набор капиллярных отношений  $Ca_1 = U/U_\gamma^v$ ,  $Ca_2 = U/U_\gamma^g$ ,  $Ca_3 = U/U_g^v$ ,  $Ca_4 = U/U_v^g$ ,  $Ca_5 = U/U_D^g$ .

Отношения компонентов энергии образуют дополнительные безразмерные комбинации  $R_{En}^{k,\sigma} = En_k/En_\sigma$ ,  $R_{En}^{k,e} = En_k/En_e$ ,  $R_{En}^{\sigma,e} = En_\sigma/En_e$ . Два первых отношения — независимые, 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 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.

## 2. Методика эксперимента

Опыты выполнены на новом стенде „Моделирование динамики и структуры капельных течений в электрическом поле“ („ДЗК“ — Динамика заряженной капли), входящим в состав УИУ „ГФК ИПМех РАН“ [32]. В опытах капли дистиллированной воды падали в приемную кювету, изготовленную из оргстекла, размером  $17 \times 10 \times 7$  см, которая заполнялась водопроводной водой.

Схема рабочей части установки представлена на рис. 1. Жидкость из мерного резервуара 1 радиусом 7 мм, изготовленного из органического стекла, поступает в металлический капилляр 2 диаметром  $d_c = 1.0$  мм, размещенный внутри конического электрода 3. На срезе капилляра образуется отрывающаяся капля 4. После отрыва свободно падающая капля пролетает высоту  $H_e = 50$  см и падает в кювету 5, на дне которой находится второй электрод — заземленная алюминиевая пластина 6, соединенная с отрицательным полюсом источника 7 высокого напряжения  $\Phi_e$ .

Положительный полюс источника 7 соединен с электродом 3, контактирующим с металлическим капилляром 2. Сформированная капля отрывается под действием собственного веса или совместного влияния гравитационного и электрического полей. Источник высокого напряжения собственного изготовления позволяет изменять приложенное напряжение в диапазоне  $0 < \Phi_e < 30$  кВ с шагом 2 кВ. Данные опыты выполнены

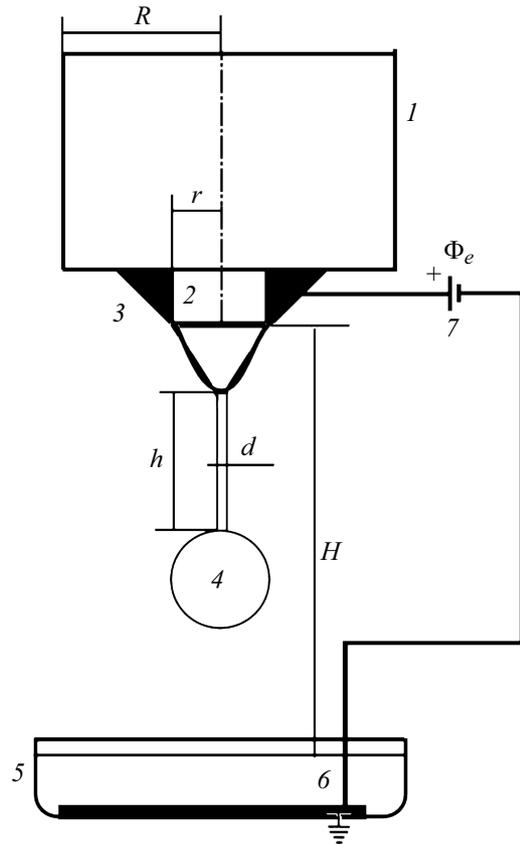
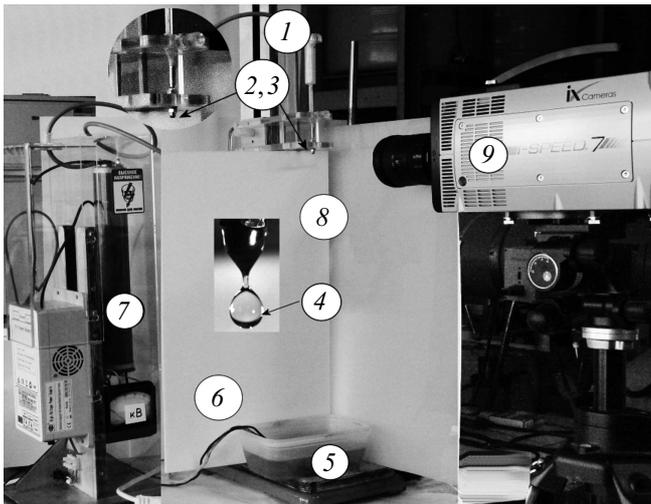


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 — накопитель, 2 — капилляр, 3 — конический электрод, 4 — капля, 5 — кювета с заземленным электродом, 6 — подводящий провод к заземленному электроду, 7 — источник высокого напряжения.

при  $\Phi_e = 15$  кВ или с выключенным источником. Погрешность установки напряжения составляет 1 кВ.

Фотография установки приведена на рис. 2. Здесь 1 — накопительный резервуар, поддерживающий постоянный расход жидкости в капилляре 2. Увеличенный фрагмент конструкции, содержащей капилляр, вмонтированный в конический электрод 3, показан на врезке. Капля 4, оторвавшаяся от среза капилляра, падает в приемную кювету 5. Электрод на дне кюветы 6 соединен с отрицательным полюсом высоковольтного источника постоянного напряжения 7. Для освещения картины течения использовались матричные светодиодные светильники Optronis MultiLED со световым потоком 7700 lm, установленные за матовыми экранами 8 (метод „диффузно распределенного встречного и бокового света,,).

Регистрация картины течения проводилась видеокамерой 9 (*i-speed 717*), установленной на штативной головке с четырьмя степенями свободы. Скорость съемки в данных опытах составляла 20 000 кадров в секунду. Режим видеосъемки обеспечивал линейное разрешение не хуже 0.01 мм. Погрешность измерения линейных размеров на видеокдрах равнялась 0.05 мм, что составляло примерно половину толщины контура изме-



**Рис. 2.** Экспериментальный стенд: 1 — резервуар, 2,3 — капилляр в коническом электроде, 4 — капля, 5 — кювета с водой, 6 — подводящие провода к заземленному электроду, 7 — высоковольтный источник, 8 — составной экран, 9 — видеокамера.

ряемого объекта (капли, перемычки). Запуск камеры производился в момент максимальной скорости движения маточной жидкости перед отрывом капли (после появления выраженной перемычки, означающей начало активной фазы процесса отделения капли). Полученные видеофильмы сохранялись в памяти компьютера для дальнейшей обработки. Обработка данных проводилась в лабораторной системе координат  $x, z$ , в которой ось  $z$  направлена вниз, а ее начало совпадает с верхним краем видеокадра.

В данной серии опытов дистиллированная вода непрерывно поступала в капилляр с постоянным расходом  $Q = 0.0054 \text{ ml/s}$ , при этом расходная скорость истечения через выходное отверстие капилляра (диаметр  $d_c = 1 \text{ mm}$ ) составляла  $u = 6.8 \text{ mm/s}$ . Высота свободного падения капель в данных опытах равнялась  $H = 50 \text{ cm}$ .

В проведенных опытах без электрического поля в процессе формирования капли натекающая жидкость некоторое время удерживается у среза капилляра. Затем на ее поверхности возникает перетяжка, разделяющая маточную жидкость. Под перемычкой формируется медленно опускающийся каплевидный объем и перетяжка — постепенно удлиняющаяся и неравномерно истончающаяся струйка. Нижняя часть перемычки, примыкающая к капле, истончается существенно быстрее и разрывается. В момент отделения от перемычки скорость капли составляет  $U = 0.33 \text{ m/s}$ .

Остаток перемычки начинает стягиваться с образованием серии сферических утолщений. Поверхность маточной жидкости быстро поднимается, что приводит к утончению и разрыву верхней части перемычки.

Далее капля и остаток перемычки эволюционируют независимо. Объем оторвавшейся жидкости грушевид-

**Таблица 1.** Безразмерные параметры задачи

$\Phi_e, \text{ kV}$	Re	Fr	Bo	$Bo_e$	Oh	We	$We_e$	$R_{En}^{k,\sigma}$	$R_{En}^{k,e}$	$R_{En}^{\sigma,e}$
0	1972	1.8	66 220	0	0.0015	9.0	0	0.75	$\infty$	$\infty$
15	2170	13.5	20 030	0.03	0.002	19.7	0.0015	1.64	340	207

**Таблица 2.** Капиллярные отношения характерных скоростей

$\Phi, \text{ kV}$	$Ca_1$	$Ca_2$	$Ca_3$	$Ca_4$	$Ca_5$
0	1972	2.0	$4 \cdot 10^5$	0.01	3.0
15	2170	4.0	$8.0 \cdot 10^5$	0.01	4.4

ной формы быстро стягивается и осциллирует. В процессе перестройки капля на короткое время приобретает форму сферы диаметром  $D = 6.0 \text{ mm}$ .

Картина отрыва капли в электростатическом поле ( $\Phi_e = 15 \text{ kV}$ ) радикально отличается. Здесь от маточной жидкости вначале отделяется сборка „капля–перемычка“ булавовидной формы. Далее нижняя часть перемычки истончается и отрывается от капли. При отделении от нижнего конца перемычки скорость капли составляет  $U = 0.66 \text{ m/s}$ . Форма капли быстро видоизменяется, и ее диаметр в сферической фазе равен  $D = 3.9 \text{ mm}$ .

Значения основных безразмерных параметров, характеризующих условия проведенных опытов, приведены в табл. 1.

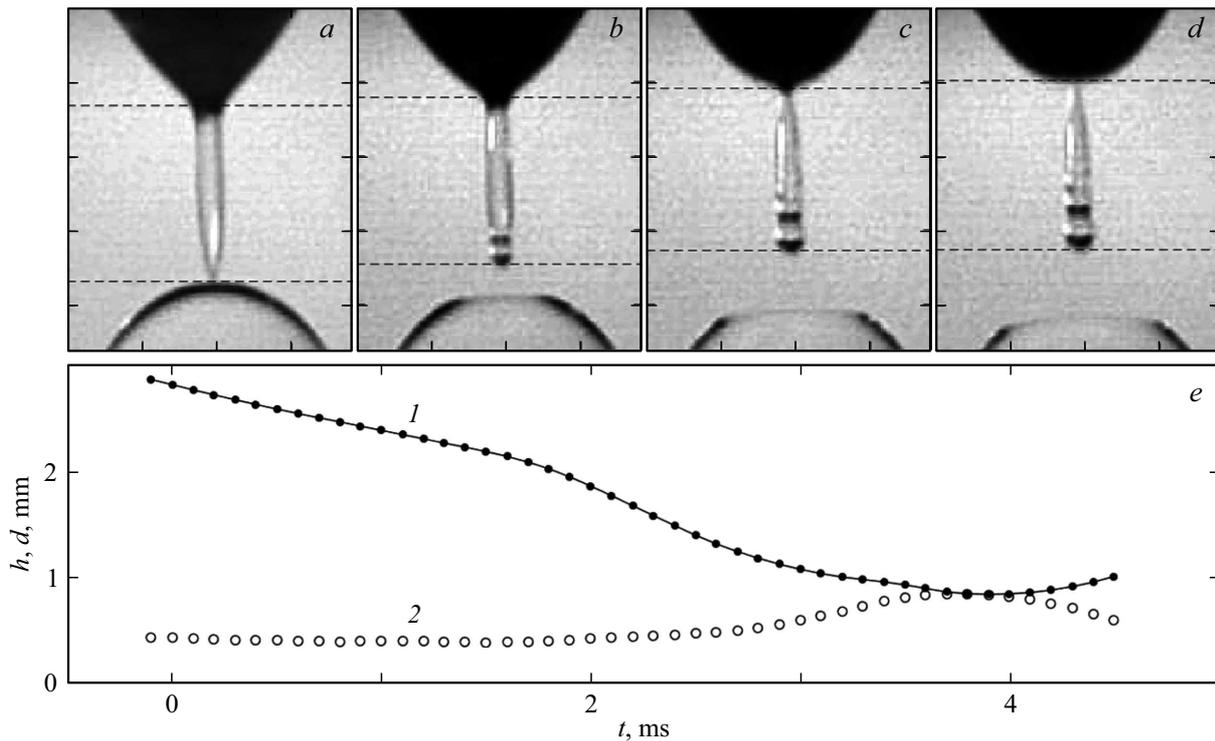
Значения капиллярных чисел — отношений скорости капли к значениям характерных скоростей задачи — приведены в табл. 2.

Среди особенностей, которые вносит электрическое поле — сильное различие в значениях традиционных безразмерных параметров, характеризующих динамическое состояние и геометрию течения, которое отражает уменьшение размера капли и увеличение ее скорости в момент отделения от перемычки. Динамика процесса отрыва прослеживается в дальнейшем описании проведенных опытов.

### 3. Гравитационный отрыв капли

Процессы формирования гравитационного (в отсутствие электрического поля) отрыва капли иллюстрируют выборки из видеogramмы на рис. 3. Непосредственно перед отрывом маточная жидкость принимает коническую форму, к вершине которой примыкает сигарообразная перемычка с истонченным нижним концом, контактирующим с выпуклой поверхностью капли.

Медленно растущая капля (скорость движения нижней кромки  $U = 15 \text{ cm/s}$ ) отделяется от тонкого нижнего конца конической перемычки, соединяющей ее с маточной жидкостью, после чего резко ускоряется ( $U = 0.33 \text{ m/s}$ , рис. 3, а). Через  $0.5 \text{ ms}$  после отрыва



**Рис. 3.** Картина отрыва незаряженной капли: *a-d* —  $t = 0, 0.5, 1.0$  и  $1.2$  ms от момента отрыва нижнего конца перемычки; *e* — высота  $h$  (кривая 1) и поперечный диаметр  $d$  (кривая 2) в среднем сечении перемычки на временном интервале  $4.5$  ms. Шаг дискретизации —  $100 \mu s$ .

верхняя кромка капли уплощается (рис. 3, *b*), перемычка укорачивается, ее острый нижний конец сворачивается в сферическую капельку (поперечник  $d_1^s = 0.7$  mm), отделенную перетяжкой от начинающей формироваться второй капельки (поперечник  $d_2^s = 0.6$  mm). При этом маточная жидкость смещается вверх на  $\Delta h_m = 0.2$  mm. Еще через  $0.5$  ms (рис. 3, *c*) перемычка укорачивается, а ее верхняя часть истончается.

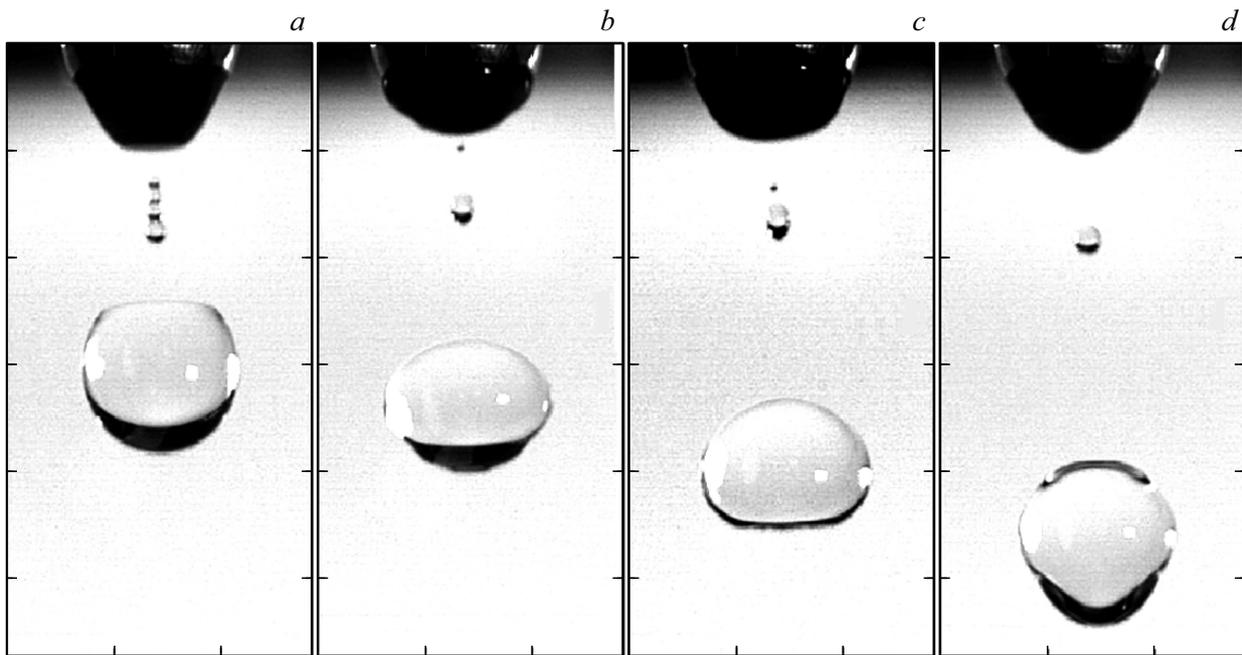
Маточная жидкость, продолжая движение вверх, проходит расстояние  $\Delta h_m = 0.6$  mm. При этом конический контур маточной жидкости трансформируется в параболический (рис. 3, *c*). Через  $1.2$  ms после отрыва капли от нижнего конца перемычки, стягивающаяся вверх маточная жидкость отрывается от истонченного верхнего конца перемычки. При этом подвижная верхняя кромка падающей капли приобретает выпуклую форму.

Временную изменчивость высоты и толщины перемычки в ее среднем сечении демонстрируют кривые на рис. 3, *e*. После отрыва капли до момента  $t = 1.8$  ms высота  $h$  перемычки монотонно сокращается, а толщина  $d$  слабо растет, оставаясь вблизи значения  $0.4$  mm. Затем скорости уменьшения высоты и роста толщины заметно возрастают, их размеры сближаются, и к моменту  $t = 4$  ms они совпадают, после чего стартует следующий цикл, начинающийся с роста высоты и сокращения толщины.

Выборки из видеogramмы, иллюстрирующей дальнейшую эволюцию оторвавшейся перемычки и свободной

капли, приведены на рис. 4. Полностью оторвавшаяся перемычка трансформируется в цепочку слившихся мелких капелек (рис. 4, *a*). После отрыва капля высотой  $h_d = 5.8$  mm и диаметром  $D = 6.1$  mm сохраняет вытянутую по вертикали осесимметричную форму с плоской вершиной и выпуклым основанием. Стягивающаяся перемычка высотой  $h_s = 2.7$  mm и диаметром  $d_s = 0.8$  mm образует сателлит, составленный из четырех капелек диаметрами  $d_{1-4}^s = 0.4, 0.6, 0.7, 0.8$  mm (рис. 4, *a*,  $t = 2$  ms).

За время между соседними кадрами  $\Delta t = 5.3$  ms происходит резкое изменение формы оторвавшихся элементов: капля стягивается по вертикали (высота  $h_d = 4.9$  mm, поперечник  $d = 5.3$  mm), а сателлит включает центральную сферическую часть ( $d_s = 0.8$  mm) и два тонких цилиндра, примыкающих к ее нижнему и верхнему полюсам высотой  $h_s^c = 1.1$  mm (рис. 4, *b*). В центре нижнего цилиндра располагается выступившая капелька, которая быстро втягивается внутрь. Далее из верхнего цилиндра вверх выбрасывается более мелкий вторичный сателлит, который быстро приближается к поверхности маточной жидкости, отскакивает от нее и возвращается к сателлиту, который приобретает все более сложную форму из-за частичного слияния цилиндрических участков с центральной сферической частью (рис. 4, *c*). При этом форма маточной жидкости также непрерывно изменяется.



**Рис. 4.** Картина движения незаряженной капли и сателлита:  $a-d$  —  $t = 2.0, 7.3, 12.8, 19.5$  ms, время отсчитывается от момента отделения капли от нижнего конца перемычки, деление шкалы 4 мм.

Форма основной капли также заметно меняется, ее верхняя часть становится выпуклой, а нижняя — плоской (рис. 4,  $c$ ,  $t = 12.8$  ms,  $h_d = 4.9$  mm,  $d = 6.5$  mm). Основной сателлит высотой  $h_s = 1.5$  mm и диаметром  $d_s = 0.9$  mm после небольшого подъема начинает регулярное движение вниз. При  $t = 19.5$  ms основной и вторичный сателлиты сливаются и образуют единую выпуклую капельку высотой  $h_s = 1.1$  mm и диаметром  $d_s = 0.9$  mm. Основная капля вытягивается по вертикали, при этом теряется симметрия относительно горизонтальной плоскости.

В процессе падения (в течение первых  $t = 17.5$  ms) положение сателлита относительно верхнего края картины составляет  $h_s'' = 7.1, 6.6, 7.2, 7.8$  mm при  $t = 2.0, 7.3, 12.8, 19.5$  ms соответственно. Положение нижней кромки капли равно  $h_d^l = 15.3, 16.1, 17.4$  и 21.4 mm. Соответственно средние скорости капли и сателлита на временном интервале  $\Delta t = 17.5$  ms равны  $\bar{U} = 35$  и  $\bar{u}_s = 5$  cm/s. Качественно картина течения согласуется с наблюдаемой в [3,9].

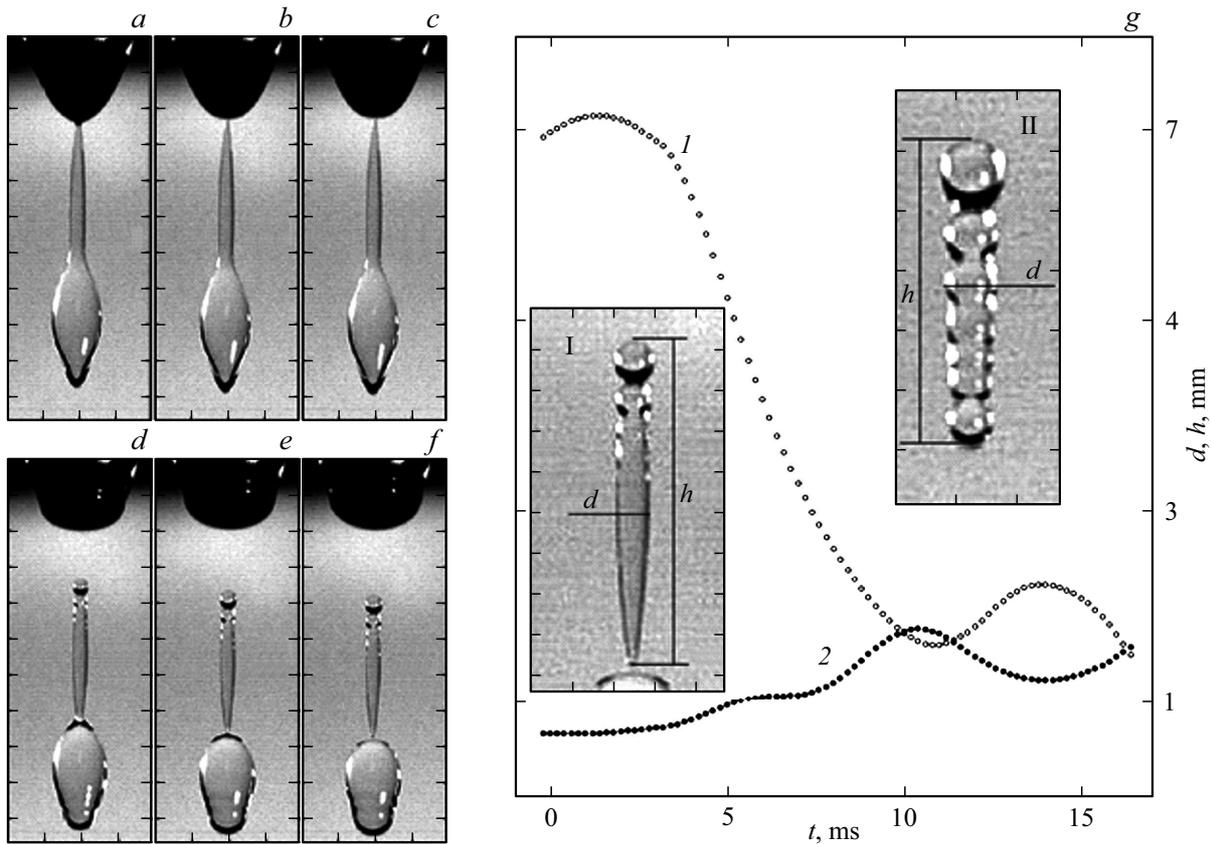
Причина наблюдаемого различия скоростей капли и сателлита может быть обусловлена электростатическим взаимодействием сателлита со спонтанно заряженной каплей и жидкостью в капилляре (принято считать, что свободная поверхность воды заряжена отрицательно [33,34]). Однако знак заряда может изменяться в течениях или под влиянием внутренних течений, образующихся при переходе ДППЭ в другие виды при изменении формы сателлита [20], что требует более детального изучения.

#### 4. Отрыв заряженной капли

Картина течения при отрыве капли в электрическом поле, которую иллюстрируют выборки из видеofilмов, представленные на рис. 5, существенно отличается. Форма накапливающейся на срезе капилляра жидкости вместо грушевидной в отсутствие поля, становится булавообразной с заостренными концами (рис. 5,  $a, b$ ). Элементы течения оказываются более удлиненными, чем при гравитационном отрыве (рис. 3).

В электрическом поле меняется последовательность разрывов перемычки: здесь вначале от маточной жидкости отделяется вся перемычка вместе с заостренным утолщением, из которого формируется отделяющаяся капля (рис. 5,  $c$ ). Перед отрывом истончается участок контакта перемычки с маточной жидкостью. Части отделившегося объема жидкости ведут себя по-разному. Верхний узкий конец перемычки скругляется, а нижний — истончается (рис. 5,  $d$ ). Нижний объем скругляется и образует каплю грушевидной формы, а верхний стягивается с образованием последовательности растущих сферических утолщений (рис. 5,  $d, e$ ).

При этом нижний и верхний концы растущей капли продолжают скругляться. По поверхности капли бегут короткие капиллярные волны, которые выражены в области контакта с перемычкой и в нижней половине капли (рис. 5,  $d-f$ ). Отрыв капли от перемычки происходит при  $t = 3.3$  ms. После отрыва перемычка немного удлиняется до момента  $t = 1.4$  ms, далее следует монотонное сокращение до  $t = 10.8$  ms, затем плавный подъем и спад с максимумом при  $t = 14$  ms (рис. 5,  $g$ , кривая 1).



**Рис. 5.** Картина отрыва заряженной капли в электростатическом поле ( $\Phi = 15 \text{ kV}$ ): *a-f* —  $t = -0.7, -0.2, 0, 2.3, 3.0, 3.3 \text{ ms}$  (от момента отделения верхней кромки сателлита), деление 2 mm. *g* — высота  $h$  (кривая 1) и поперечный диаметр  $d$  (кривая 2) перемычки в среднем вертикальном сечении. Шаг дискретизации данных — 200  $\mu\text{s}$ . Вставки: укрупненный вид перемычки после полного отделения при  $t = 3.3$  (I) и 5.2 (II) ms. Деление 1 mm.

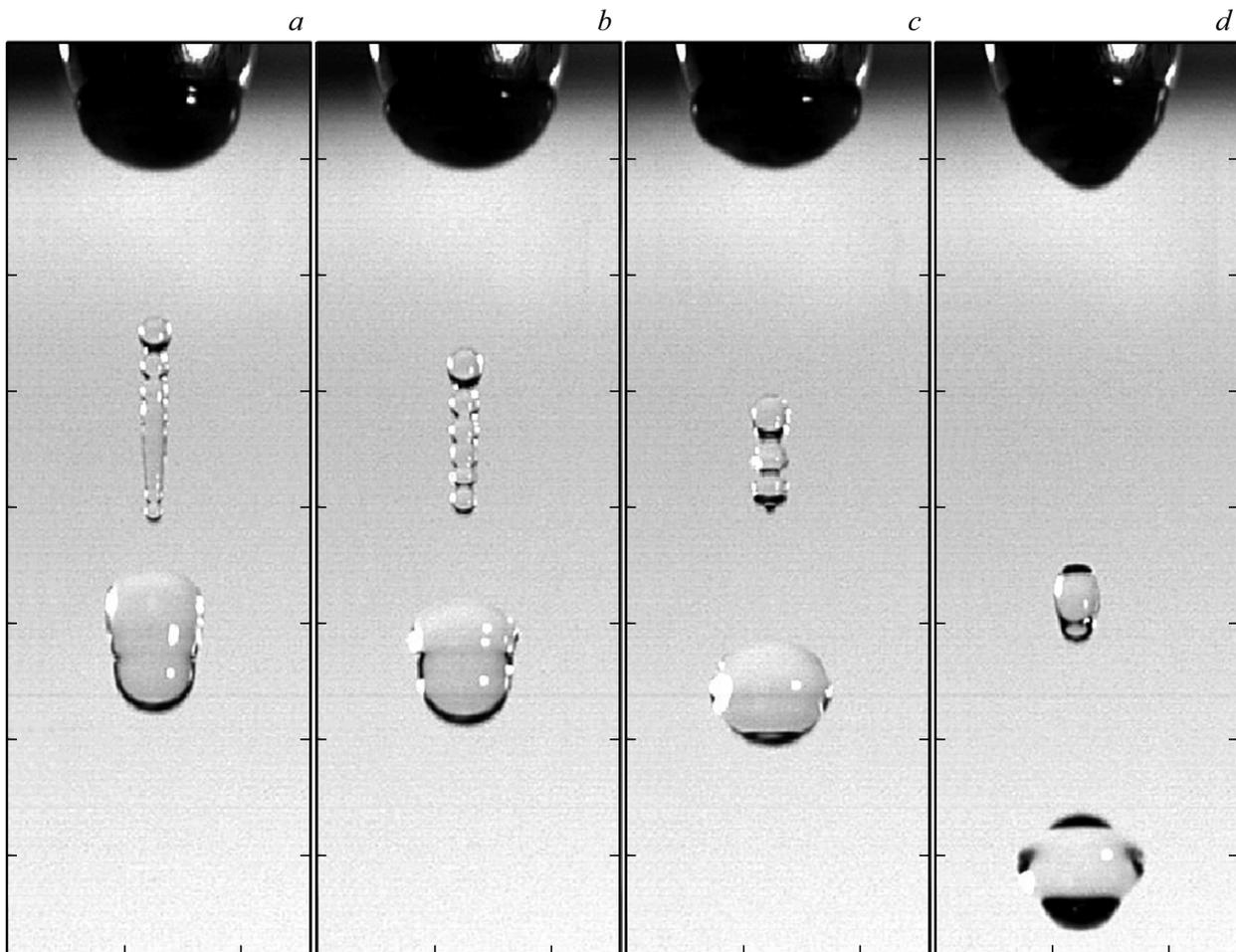
В среднем сечении перемычка немонотонно растет, начиная с отрыва (кривая 2, рис. 5, *g*) до момента вблизи  $t = 10.8 \text{ ms}$ , где вертикальный размер  $h$  минимален. Затем следует спад до минимума в момент  $t = 14 \text{ ms}$ , совпадающий с моментом максимума вертикального размера  $h$ . При  $t = 10, 11.4, 16.4 \text{ ms}$  горизонтальный размер совпадает с вертикальным — перемычка приобретает сферическую форму. На всем времени наблюдения эволюция перемычки идет по пути сворачивания в компактный объем, принимая последовательно формы, в том числе многозвенные (рис. 5, *g*, вставка II, рис. 6), вытянутых и сжатых тел.

Капля в ходе своей эволюции также постепенно сворачивается, становясь компактной: на рис. 6 показан временной интервал, в ходе которого вертикальный размер капли уменьшается с 4.8 (рис. 6, *a*) до 3.8 mm (рис. 6, *d*); при этом по ее поверхности бегут капиллярные волны (рис. 6, *a-c*). Обводящий контур перемычки, сохраняющий коническую форму, наполнен сферическими утолщениями (рис. 6, *a*, диаметр верхнего утолщения  $d_u^s = 1.2$ , нижнего —  $d_l^s = 0.7 \text{ mm}$ ) и перетяжками с шагом, уменьшающимся сверху вниз.

В контуре остатка перемычки длиной  $h_s = 5.9$  и максимальным поперечником  $d_s = 1.6 \text{ mm}$  ( $t = 5.6 \text{ ms}$ ,

рис. 6, *b*) выражены шесть утолщений. Высота основной капли сокращается до  $h_d = 4.4 \text{ mm}$ , а поперечный размер возрастает до  $d = 3.8 \text{ mm}$ . Всего три сферических утолщения диаметрами  $d_{1,2,3}^s = 1.4, 1.3, 1.4 \text{ mm}$  сохраняются в остатке перемычки общей высотой  $h_s = 4.1 \text{ mm}$ . На нижнем конце остатка перемычки появляется маленький шарик диаметром  $d_l^s = 0.3 \text{ mm}$  (рис. 6, *c*). Форма капли приближается к сферической, ее высота и ширина соответственно равны  $h_s = 3.8$  и  $4.2 \text{ mm}$ . В контуре капли выделяются выпуклости вблизи экватора.

В конце интервала наблюдения остаток перемычки стягивается в тело вращения (высота и толщина соответственно  $h_s = 2.7$  и  $d_s = 1.6 \text{ mm}$ ) с перетяжками, отделяющими верхний участок (высота  $h_s^u = 0.3 \text{ mm}$ ) и нижний (высота  $h_s^l = 0.8 \text{ mm}$ ) от выпуклого центрального тела ( $t = 14.8 \text{ ms}$ , рис. 6, *e*). При этом основная капля (высота 4.0 mm, поперечник 4.2 mm, рис. 6, *d*) теряет симметрию относительно горизонтальной плоскости на уровне максимального поперечника (высота верхней части  $h_d^u = 1.7 \text{ mm}$ , нижней —  $h_d^l = 2.3 \text{ mm}$ ). Утолщения на уровне максимального диаметра в правой и левой частях капли (рис. 6, *d*) имеют разные размеры.



**Рис. 6.** Движение заряженной капли и сателлита в электростатическом поле ( $\Phi_e = 15 \text{ kV}$ ):  $a-d$  —  $t = 4.5, 5.6, 7.2, 14.8 \text{ ms}$ , время отсчитывается от момента отделения верхнего конца перемычки от маточной жидкости.

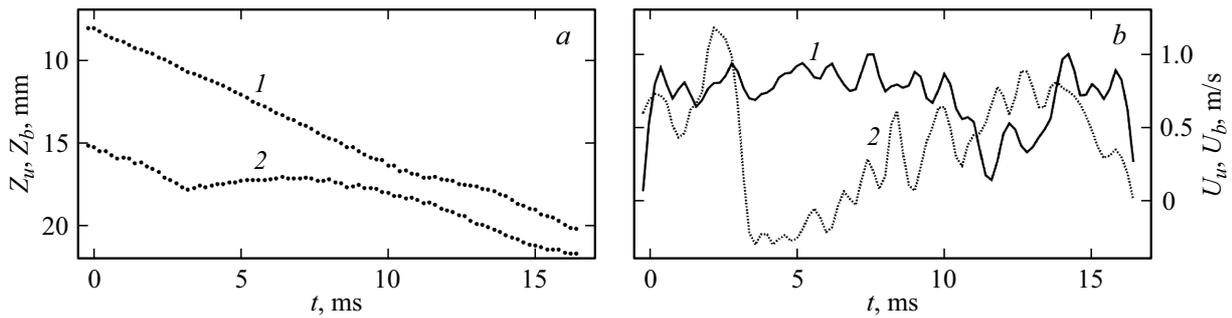
Скорости падения основной капли и остатка перемычки заметно различаются — расстояние между их центрами масс на рис. 6 равно соответственно  $\Delta z_m = 7.2, 7.4, 8.1, 9.4 \text{ mm}$ , что соответствует скоростям расхождения  $u_z^m = 0.2, 0.4$  и  $0.2 \text{ m/s}$ . Расстояния между нижними концами перемычки и вершиной основной капли  $\Delta z_d = 1.7, 2.9, 4.5, 5.9 \text{ mm}$ ; соответственно скорость расхождения имеет значения  $u_d^m = 1.1, 1.0$  и  $0.2 \text{ m/s}$ . Сравнение значений показывает, что на начальном этапе заметное влияние на геометрию течения оказывает изменение формы и размеров разделившихся элементов.

Из рассмотрения геометрии движения компонентов течения после их разделения (рис. 6) следует, что верхний конец перемычки перемещается относительно равномерно, его координата во времени аппроксимируется полиномом  $Z_u = 0.7t + 8.5$  (рис. 7,  $a$ , кривая 1). На участке  $0-10 \text{ ms}$  мгновенное значение скорости флукутирует вблизи среднего значения  $0.7 \text{ m/s}$  (рис. 7, кривая 1).

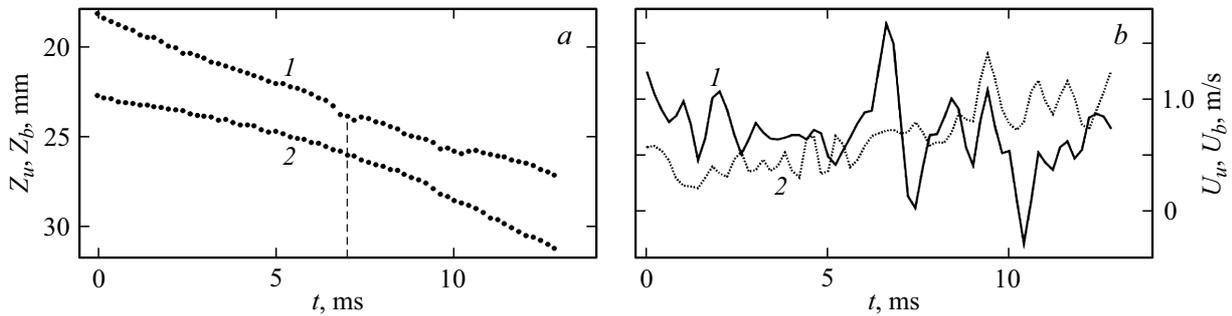
В то же время нижний конец перемычки неравномерно движется под влиянием поверхностного натяжения и гравитации. Расстояние нижнего конца стягивающейся

перемычки от верхнего края кадра аппроксимируется двумя временными зависимостями — (рис. 7,  $a$ , кривая 2) линейной  $Z_b = 0.75t + 15.3$  ( $t \leq 3.2 \text{ ms}$ ) и квадратичной  $Z_b = 0.04t^2 + 0.52t + 18.6$  ( $t > 3.2 \text{ ms}$ ). График мгновенной скорости движения (рис. 7,  $b$ , кривая 2) свидетельствует о чередовании быстрых и медленных флукутаций положения нижнего конца, отражающих сложную динамику тонких процессов в остатке перемычки. В диапазоне  $4.5-10.5 \text{ ms}$  заметны осцилляции скоростей обоих концов, пики и впадины которых совпадают по времени (рис. 7,  $b$ , кривые 1 и 2). В спектрах флукутаций скоростей данного участка присутствует основная частота  $750 \text{ Hz}$ .

Динамику движения заряженной капли иллюстрируют графики положения кромок капли (рис. 8) после ее отделения от перемычки: перемещение верхней и нижней кромок аппроксимируется слабонелинейными полиномами, соответственно  $-0.013t^2 + 0.86t + 18.26$  (рис. 8,  $a$ , кривая 1) и  $0.04t^2 + 0.18t + 23.0$  (рис. 8,  $a$ , кривая 2). Вследствие различия в знаках ускорений (квадратичные члены) кромки сначала сближаются до момента



**Рис. 7.** Положение (a) и скорость (b) верхнего (1) и нижнего (2) концов перемычки при отрыве заряженной капли. Время — от момента отрыва нижнего конца перемычки.



**Рис. 8.** Изменение положения (a) и скорости (b) верхней (1) и нижней (2) кромок заряженной капли. Время — от момента отделения нижнего конца перемычки.

$t_c = 7.0 \text{ ms}$  (вертикальная штриховая на рис. 8, a), а затем расходятся.

Скорости опускания нижней и верхней кромок капли на этом временном отрезке сильно различаются по величине и по характеру осцилляций (рис. 8, b). В основном обе кромки движутся вниз, хотя и крайне неравномерно, но при этом верхняя на отдельных временных интервалах (вблизи 7.0 и 10.0 ms) меняет направление на противоположное. В обеих кривых на интервале 8–13 ms выделяются почти синхронные флуктуации скорости на основной частоте 600 Hz (по данным спектрального анализа).

### 5. Обсуждение результатов

Анализ результатов показывает, что в условиях данных опытов, когда капля формировалась на срезе капилляра диаметром  $d = 1.0 \text{ mm}$  при постоянном притоке жидкости с расходом  $Q = 0.0054 \text{ ml/s}$  и массовой скоростью  $u = 6.8 \text{ mm/s}$ , время образования заряженной и незаряженной капли было одинаковым и составляло  $t_f = 90 \text{ ms}$ .

При гравитационном отрыве диаметр свободной капли (в сферической фазе) равнялся  $D = 6.0 \text{ mm}$ , площадь и объем —  $S_d = 1.1 \text{ cm}^2$  и  $V_d = 114.2 \text{ mm}^3$ , масса  $M = 0.11 \text{ g}$ , скорость после отделения от перемычки —  $U = 0.33 \text{ m/s}$ , кинетическая и поверхностная энергии равны соответственно  $En_k^d = 6.1 \cdot 10^{-6}$

и  $En_\sigma^d = 8.2 \cdot 10^{-6} \text{ J}$ . Диаметр и объем сателлита, в который сворачивалась свободная перемычка, составляли  $d_s = 1.2 \text{ mm}$ ,  $V_s = 0.9 \text{ mm}^3$ . Ключевые элементы картины отрыва капли — перемычку (ligament — по терминологии автора), сателлиты, возникающие при отрыве капли водного раствора перманганата калия или бихромтата калия, которые впервые сфотографировал Рэлей в 1890 г. [35], в дальнейшем неоднократно регистрировались все более детально по мере совершенствования аппаратуры. Картины трансформации конической перемычки в систему „сферических четок“ при отрыве капль воды приведены в [7], эволюция формы сателлита и динамика вторичного сателлита — в [36]. Сравнения картин течений при отрывах капль воды и спирта проведены [37], капль воды и различных масел — в [9]. Общие свойства наблюдаемой картины течения — образование перемычки, отрыв капль от ее нижней кромки, отрыв перемычки от остатка жидкости на капилляре, трансформация гладкой конической перемычки в рифленую и далее в единую капль — согласуются с данными [7,9,35–37], однако число элементов, динамика их трансформации и движения могут заметно отличаться. Природы изменчивости значений параметров течений в зависимости от установки и условий опыта нуждается в более тщательном изучении.

Диаметр капль, оторвавшейся в электрическом поле ( $\Phi_e = 15 \text{ kV}$ ) составлял  $D = 3.75 \text{ mm}$ , площадь поверхности  $S_d = 0.34 \text{ cm}^2$  и объем  $V_d = 27.6 \text{ mm}^3$ , масса

$M = 0.02$  г. Скорость заряженной капли после отрыва равнялась  $U = 0.66$  м/с.

Кинетическая, поверхностная и электрическая энергии капли имели значения  $En_k^d = 4.1 \cdot 10^{-6}$ ,  $En_\sigma^d = 2.3 \cdot 10^{-6}$  и  $En_e^d = 1.2 \cdot 10^{-8}$  Дж соответственно. Отсоединившаяся перемычка трансформируется в сателлит — шарик диаметром  $d_s = 1.8$  мм с площадью поверхности и объемом  $V_s = 3.0$  мм<sup>3</sup>, падающий со скоростью  $U_s = 0.86$  м/с. Кинетическая, поверхностная и электрическая энергии сателлита составляют  $En_k^s = 1.1 \cdot 10^{-6}$ ,  $En_\sigma^s = 7.4 \cdot 10^{-7}$  и  $En_e^s = 2.0 \cdot 10^{-9}$  Дж соответственно.

Проведенные опыты показывают, что внешнее электрическое поле оказывает заметное влияние на характер отрыва, формы отрывающихся и формирующихся со временем компонентов течения (капли и сателлитов), соотношение составляющих энергии капли. В гравитационном поле капля отрывается от нижнего конца перемычки. Во внешнем электростатическом поле с напряжением  $\Phi_e = 15$  кВ вначале отрывается верхний конец перемычки от маточной жидкости, а затем с задержкой в несколько миллисекунд система перемычка—капля распадается на независимо движущиеся компоненты. При этом образующийся мелкий выступ на нижней кромке оторвавшейся перемычки не трансформируется во вторичный сателлит. Здесь изменчивость параметров течения выражена еще более отчетливо, чем в случае чисто гравитационного отрыва.

Полученные данные могут послужить основой для дальнейшего изучения динамики капли и сателлитов в полете, управления режимами формирования, размерами и скоростью образующихся капель, определения влияния электрического поля на процессы слияния капли с принимающей жидкостью, детализации описания действия механизмов переноса импульса, энергии и вещества.

## Заключение

Подготовлена установка, позволяющая проводить высокоразрешающую визуализацию быстро эволюционирующей картины течения в процессе отрыва от капилляра, формирования и распада капель в гравитационном и внешнем электростатическом поле с приложенным напряжением в диапазоне  $0 < \Phi_e < 30$  кВ.

Впервые прослежено влияние электрического поля напряжением  $\Phi_e = 15$  кВ на структуру течения, форму компонентов и динамику движения отрывающихся миллиметровых капель и сопутствующих сателлитов.

Даны оценки значений различных компонентов энергии капли и сателлитов, образующихся при отрыве в гравитационном поле и при одновременном действии электростатического поля.

## Финансирование работы

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/>).

## Благодарности

Эксперименты проведены на стенде „ДЗК“, входящего в состав УИУ „ГФК ИПМех РАН“.

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

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] F. Guthrie. Proc. R. Soc. Lond., **13**, 457 (1864). DOI: 10.1098/rspl.1863.0091
- [2] J.J. Thomson, H.F. Newall. Proc. R. Soc. Lond., **29**, 417 (1885). DOI: 10.1098/rspl.1885.0034
- [3] J. Zeleny. Phys. Rev., **3**(2), 69 (1914). DOI: 10.1103/physrev.3.69
- [4] J. Zeleny. Proc. Cambridge Philos. Soc., **18**(1), 71 (1915).
- [5] J. Zeleny. Phys. Rev., **10**(1), 1 (1917). DOI: 10.1103/physrev.10.1
- [6] S.E. Law. IEEE Transactions on Industry Applications, **IA-19**(2), 160 (1983). DOI: 10.1109/tia.1983.4504176
- [7] D. Peregrine, G. Shoker, A. Symon. J. Fluid Mech., **212**(1), 25 (1990). DOI: 10.1017/S0022112090001835
- [8] X. Zhang, O.A. Basaran. Phys. Fluids, **7**(6), 1184 (1995). DOI: 10.1063/1.868577
- [9] Ю.Д. Чашечкин, В.Е. Прохоров. ПМТФ, **57**(3), 16 (2016). DOI: 10.15372/PMTF20160303. [Yu.D. Chashechkin, V.E. Prokhorov. J. Appl. Mech. Tech. Phys., **57**(3), 402 (2016). DOI: 10.1134/S0021894416030032]
- [10] А.И. Коршунов. Изв. РАН. МЖГ, **50**(4), 139 (2015). [A.I. Korshunov. Fluid Dyn., **50**(4), 585 (2015). DOI: 10.1134/S0015462815040134]
- [11] А.В. Кистович, Ю.Д. Чашечкин. Изв. РАН. Физ. атм. и океана, **54**(2), 206 (2018). [A.V. Kistovich, Yu.D. Chashechkin. Atm. Oceanica Phys., **54**(2), 182 (2018). DOI: 10.7868/S0003351518020095]
- [12] J. Eggers. Rev. Modern Phys., **69**(3), 865 (1997). DOI: 10.1103/revmodphys.69.865
- [13] E. Wilkes, S.D. Phillips, O.A. Basaran. Phys. Fluids, **11**(12), 3577 (1999). DOI: 10.1063/1.870224
- [14] F. Bierbrauer, N. Kapur, M.C.T. Wilson. ESAIM: Proceed., **40**, 16 (2013). DOI: 10.1051/proc/201340002
- [15] Yu.D. Chashechkin, A.Y. Ilinykh. Axioms, **12**(4), 374 (2023). DOI: 10.3390/axioms12040374
- [16] P.K. Notz, A.U. Chen, O.A. Basaran. Phys. Fluids, **13**(3), 549 (2001). DOI: 10.1063/1.1343906
- [17] R. Feistel. Ocean Sci., **14**, 471 (2018). DOI: 10.5194/os-14-471-2018

- [18] A.H. Harvey, J. Hrubý, K. Meier. *J. Phys. Chem. Refer. Data*, **52**, 011501 (2023).
- [19] Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. *Теоретическая физика. Том VI. Гидродинамика* (Наука, М., 1986)
- [20] Y.D. Chashechkin. *Axioms*, **10** (4), 286 (2021). DOI: 10.3390/axioms10040286
- [21] A.A. Zemskov, S.O. Shiryayeva, A.I. Grigor'ev. *J. Colloid Interface Sci.*, **158** (1), 54 (1993). DOI: 10.1006/jcis.1993.1228
- [22] A.I. Grigor'ev, S.O. Shiryayeva. *J. Aerosol Sci.*, **25** (6), 1079 (1994). DOI: 10.1016/0021-8502(94)90203-8
- [23] P.K. Notz, O.A. Basaran. *J. Colloid Interface Sci.*, **213** (1), 218 (1999). DOI: 10.1006/jcis.1999.6136
- [24] R.N. Savage, G.M. Hieftje. *Rev. Sci. Instrum.*, **49** (10), 1418 (1978). DOI: 10.1063/1.1135281
- [25] T. Takamatsu, M. Yamaguchi, T. Katayama. *J. Chem. Engin. Jpn.*, **16** (4), 267 (1983). DOI: 10.1252/jcej.16.267
- [26] M. Cloupeau, B. Prunet-Foch. *J. Aerosol Sci.*, **25** (6), 1021 (1994). DOI: 10.1016/0021-8502(94)90199-6
- [27] J. Rosell-Llompart, J. Grifoll, I.G. Loscertales. *J. Aerosol Sci.*, **125**, 2 (2018). DOI: 10.1016/j.jaerosci.2018.04.008
- [28] X. Zhang, O. Basaran. *J. Fluid Mech.*, **326**, 239 (1996). DOI: 10.1017/S0022112096008300
- [29] R.T. Collins, J.J. Jones, M.T. Harris, O.A. Basaran. *Nature Phys.*, **4** (2), 149 (2008). DOI: 10.1038/nphys807
- [30] P.K. Notz, A.U. Chen, O.A. Basaran. *Phys. Fluids*, **13** (3), 549 (2001). DOI: 10.1063/1.1343906
- [31] C.R. Anthony, H. Wee, V. Garg, S.S. Thete, P.M. Kamat, B.W. Wagoner, E.D. Wilkes, P.K. Notz, A.U. Chen, R. Suryo, K. Sambath, J.C. Panditaratne, Y.-C. Liao, O.A. Basaran. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **55**, 707 (2023). DOI: 10.1146/annurev-fluid-120720-014714
- [32] 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 <http://www.ipmnet.ru/uniquequip/gfk/#equip>.
- [33] P. Lenard. *Anal. Phys.*, **370**, 629 (1921). DOI: 10.1002/andp.19153521203
- [34] S.I. Karakashev, N.A. Grozev. *Coatings*, **10**, 1003 (2020). DOI: 10.3390/coatings10101003
- [35] Lord Rayleigh. *Nature*, **44** (1133), 249 (1891). DOI: 10.1038/044249e0
- [36] Ю.Д. Чашечкин, В.Е. Прохоров. *Доклады РАН*, **454** (1), 31 (2014). DOI: 10.1134/S1028335814010017
- [37] В.Е. Прохоров, Ю.Д. Чашечкин. *Известия РАН. МЖГ*, **4**, 109 (2014).