

УДК 532.5

## ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ДИНАМИКУ СТРУКТУРНЫХ КОМПОНЕНТОВ ТЕЧЕНИЯ ПРИ ГРАВИТАЦИОННОМ ОТРЫВЕ КАПЛИ ВОДЫ

© 2024 г. Ю. Д. Чашечкин\*, В. Е. Прохоров\*\*

*Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия*

*\*e-mail: chakin@ipmnet.ru*

*\*\*e-mail: prohorov@ipmnet.ru*

Поступила в редакцию 13.02.2024 г.

После доработки 16.03.2024 г.

Принята к публикации 16.03.2024 г.

Методом высокоскоростной видеорегистрации исследуется влияния электростатического поля (с потенциалом  $\Phi = 0, 16$  и  $18$  кВ) на геометрию течения при гравитационном отрыве капли от капилляра. Проведен анализ видеogramм течения, определены размеры характерных элементов структур – собственно капель, перемычки и сателлитов. Прослежены осцилляции линейных размеров и объема остатка маточной жидкости после отрыва капли при  $\Phi = 0$  и  $18$  кВ. В спектрах наблюдаются как основные частоты, так и их гармоники. Обнаружено, что небольшие изменения (12%) в значении потенциала вызывают качественные изменения картины течения, в частности, приводят к прямому отрыву капли от маточной жидкости без образования перемычки. При постоянном расходе жидкости в капилляре размер отрывающихся капель уменьшается с ростом напряжения. Опыты показывают возможность тонкого управления капельными течениями с помощью электростатического поля.

*Ключевые слова:* капля, сателлит, гравитация, электростатика, фрагментация, осцилляции.

**DOI:** 10.31857/S1024708424030039, **EDN:** PGEZAP

Распад вытекающей из отверстия струи на веер тонких струек под действием электрического поля, создаваемого с помощью лейденских банок с электрофорной машиной или атмосферного электричества, который описали еще в середине XVIII в., аббат Нолле [1] и естествоиспытатель М. В. Ломоносов («Текущая из узкой скважины вода разделяется, расширяется, дождь конической фигуры падением представляет и мелкими каплями ясно объявляет, что возбужденная через искусство электрическая сила и малейшие тел частицы от взаимного союза гонит и силу из вязкости слабит» [2]), более полутора столетий оставался научным курьезом. В начале прошлого века Дж. Зелены в серии опытов по наблюдениям вытекающей из стеклянного капилляра струйки в электростатическом поле с потенциалом в несколько киловольт, также создаваемым с помощью лейденских банок, выделил несколько устойчиво воспроизводимых форм течений, включавших режим образования веера тонких струек [3] и последовательностей отдельных капелек [4, 5]. В первых опытах [3] наблюдалось течение разбавленного раствора соляной кислоты, в последующих дополнительно изучалось вытекание этанола и раствора глицерина [5]. Картины течений, описанные в [3–5], составили основу большого числа промышленных технологий, включающих процессы «электроформирования» тонких волокон различного состава [6] и создания микрокапель, которые используются для контроля состава веществ, в том числе в микро-хромато-масс-спектрометрах с ионными ловушками [7].

Одновременно в серии независимых исследований экспериментально изучалась картина гравитационного отрыва от среза капилляра капель различных жидкостей без приложения электрического поля. Применяя наиболее совершенную, на тот момент, технику освещения при киносъемке картины капельного течения со скоростью 800 кадров/с, Эдгертон установил, что при гравитационном отрыве в воздухе от капилляров диаметром  $1.9 < d_c < 15$  мм формируются капли воды диаметром  $4.0 < D < 7.2$  мм, которые сопровождаются одним или несколькими сателлитами [8]. Размеры капель и сателлитов растут с увеличением диаметра капилляра. Приведенные фотографии картин отрыва капель жидкостей различной

плотности  $\rho$ , но с близкими значениями коэффициента поверхностного натяжения  $\sigma$  (нитробензол –  $\rho = 1.199 \text{ г/см}^3$  и  $\sigma = 48 \text{ эрг/см}^2$ ; 85.6% раствор этанола в воде –  $\rho = 0.973 \text{ г/см}^3$ ,  $\sigma = 47.8 \text{ эрг/см}^2$ ; 0.00068% раствор олеата натрия в воде –  $\rho = 1.0 \text{ г/см}^3$ ,  $\sigma = 48.1 \text{ эрг/см}^2$ ; 90.8% раствор глицерина в этаноле –  $\rho = 1.219 \text{ г/см}^3$ ,  $\sigma = 48.1 \text{ эрг/см}^2$ ) показали заметное влияние на динамику и тонкую структуру течения других физических свойств растворов.

Повышение яркости источников света и качества оптики позволило получить еще более детальные изображения картины течения при отрыве капли воды от капилляра с внешним диаметром  $d_c = 5.2 \text{ мм}$ , проследить трансформацию формы перемычки, переходящую от тонкой гладкой конической в набор сливающихся мелких капелек [9]. Серия опытов по изучению формы капли и последующих сателлитов при истечении с постоянным расходом воды из капилляра в воздух проведена в [10]. Детальные расчеты процесса формирования на срезе капилляра висящей капли объемом  $V_d = 13 \text{ мкл}$ , основанные на идеях замены действия сил поверхностного натяжения массовыми силами [11,12], позволили проследить эволюцию растущей капли, выделить рэлеевские осцилляции ее формы в процессе наполнения [13]. Эволюция формы перемычки и сателлита, возникающего после ее отделения, иллюстрируют фотографии [14]. Более детально динамика движения оторвавшейся капли воды и сопутствующих сателлита и субсателлита, вариации формы и осцилляции всех компонентов прослежены в [15]. Сравнения данных наблюдений и расчетов рэлеевских колебаний оторвавшейся от перемычки капли воды представлены в [16].

Распад вертикальных струек воды, этанола, глицерина и их растворов различной концентрации на отдельные капли прослежен в [17]. Гравитационный отрыв капель пищевого растительного и силиконового масла происходит с образованием тонких протяженных первичных и еще более тонких вторичных перемычек [18].

Отмеченные общие свойства картины течения сохраняются и при отрыве капель криогенных жидкостей. В серии опытов установлено, что диаметр отрывающейся капли здесь также зависит от величины поверхностного натяжения и определяется капиллярной длиной как в вязкой, так и в сверхтекучей жидкости [19]. Детальная регистрация эволюции геометрии течения при отрыве капли суспензии выполнена в [20]. Расчеты формы отрывающейся от капилляра капли воды и водного раствора глицерина различной концентрации согласуются с данными измерений в независимо выполненных экспериментах [21]. В алгоритме построения математической модели, так же, как и в [13], поверхностные эффекты моделируются объемными силами [11–13]. Однако разработанные алгоритмы не позволяют рассчитывать картину переноса вещества, выделять капиллярные волны и осцилляции оторвавшейся капли, наблюдаемые во многих опытах [8–10]. Развернутые исторические обзоры работ по визуализации отрыва капель от капилляров и распада струй с образованием капель приведены в [22, 23].

Начало нового цикла исследований отрыва микрокапель в электрическом поле связывается с экспериментами Дж. Тейлора по регистрации формы области отрыва тонкой струйки от конического выступа, образующегося на плоской поверхности заряженной жидкости [24], которые были проведены через пятьдесят лет после пионерских работ [3–5]. Наблюдения и оригинальные идеи [24] инициировали постановку циклов экспериментальных [25] и теоретических [26] исследований динамики капель, срывающихся с вершин конических заострений, образующихся на поверхности различных жидкостей в сильном электрическом поле – и классических электролитов, и расплавов металлов. Отдельно изучались деформация, движение, распад капли воды и вытягивание из капли нитей в жидком диэлектрике в сильном электрическом поле [27, 28]. Изменение формы растущей капли жидкости, вытекающей под действием электрического поля из круглого отверстия в пластине в воздушную среду, прослежено в [29]. Зависимость эксцентриситета капли, сохраняющей эллипсоидальную форму, вытянутую в направлении градиента электростатического поля, определена в диапазоне разности потенциалов  $0 < \Delta\Phi < 4 \text{ кВ}$ .

Влияние поля с потенциалом  $\Phi < 20 \text{ кВ}$ , приложенного между капилляром и кольцевым электродом на дне бассейна, на размеры, частоту формирования и траектории капли, образующейся при истечении с постоянным расходом воды из капилляра внешним диаметром  $d_c^o = 0.8 \text{ мм}$  и внутренним  $d_c^i = 0.6 \text{ мм}$  в силиконовое масло вязкостью  $100 \text{ сСт}$ , изучено в [30]. Размеры капель уменьшаются, а частота отрыва растет по мере увеличения напряжения. Влияние электрического поля на эволюцию формы свободной капли и изменение ее траектории также рассмотрено в [31]. Аналитическая теория гравитационного отрыва капли от капилляра в электрическом поле развивалась в [32, 33], расчеты течений жидкости в окрестности вершины конуса Тейлора проведены в [34, 35]. Данные исследований картины отрыва и оценки размеров заряженных капель воды в воздухе, циклогексане и трансформаторном масле

представлены в [36]. Расчеты электрокапельных течений выполняются в широком диапазоне температур, включающем и высокие [34], и криогенные значения на поверхности жидкого гелия [37], как в опытах [19].

В последние годы тематика исследований влияния электрического поля на процессы формирования, отрыва и свободного падения капель различных жидкостей заметно расширилась в связи с развитием техники высокоскоростной регистрации течений [38], совершенствованием методики электрогидродинамического эксперимента [39], новыми достижениями в быстро развивающихся микро- и нанотехнологиях [40], поисками методов оптимизации топливного цикла двигателей внутреннего сгорания [41], и в интересах многих областей химической, нефтехимической, фармацевтической и других отраслей промышленности.

Цель данной работы – изучение влияния постоянного электрического поля на динамику базовых структурных компонентов течения при гравитационном отрыве капель воды от капилляра. Регистрировалась форма и положение основной капли, сателлитов, предвестников и сохраняющегося на капилляре остатка маточной жидкости, объемные и линейные осцилляции которого, отмеченные еще в [3], ранее детально не анализировались.

## 1. РАЗМЕРНЫЕ И БЕЗРАЗМЕРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ТЕЧЕНИЙ

Математическую основу методики проводимых опытов составляет система фундаментальных уравнений механики жидкостей [42], дополненная уравнением состояния для потенциала Гиббса, учитывающего доступную потенциальную поверхностную энергию и энергию электростатического поля и его производных, в частности, гетерогенной плотности с физически обоснованным начальными и граничными условиями [43], которая здесь для краткости не приводится. Из анализа полной системы уравнений механики жидкостей применительно к задачам отрыва и падения капли следует, что в число основных размерных параметров входят потенциалы Гиббса капли  $G_d$  и воздушной среды  $G_a$  (индексы отмечают принадлежность параметра), плотности  $\rho_{d,a}$ , кинематические  $\nu_{d,a}$  и динамические  $\mu_{d,a}$  вязкости сред; 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 переключки; кинетическая энергия  $En_k = MU^2/2$ , доступная потенциальная поверхностная энергия (ДППЭ)  $En_\sigma = \sigma S_d$ , заключенная в приповерхностном шаровом слое толщиной порядка молекулярного кластера  $\delta_\sigma \sim 10^{-6}$  см, объем и масса которого  $V_\sigma = \delta_\sigma S_d$  и  $M_\sigma = \rho V_\sigma$ .

В число базовых размерных параметров процесса входит также энергия электрического поля  $En_e = \frac{\epsilon \epsilon_0 V_d}{2} \left( \frac{\Phi_e}{H_e} \right)^2$ , значение которой определяется объемом капли  $V_d$  и напряженностью приложенного поля  $E_e = \Phi_e / H_e$ , которое считается однородным [26]. Здесь  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость жидкости капли,  $\epsilon_0$  – 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 зарядом капли и анизотропией атомно-молекулярных взаимодействий в тонком приповерхностном слое жидкости и на границах отдельных ассоциатов физической или химической природы (кластеров, клатратов, кластатов, полос, войдов с изолированными атомами и других), которые спонтанно возникают в жидкости [44]. Неоднородности распределения плотности и других термодинамических величин в жидкости на масштабах порядка размера молекулярного кластера  $\delta_\sigma \sim 10^{-6}$  см зарегистрированы с помощью высокоразрешающих инструментов [45, 46]. 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 [43].

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 [42], диссипативно-капиллярный масштаб  $\delta_v^y = v^2 / \gamma$ . Группа линейных масштабов, зависящих от скорости капли, включает капиллярный  $\delta_U^y = \gamma / U^2$  и прандтлев  $\delta_U^v = \nu / U$  масштабы.

Соответственно, одна часть временных масштабов задачи включает только параметры среды –  $\tau_\gamma^v = v^3 / \gamma^2$ ,  $\tau_g^\gamma = \sqrt[4]{\gamma / g^3}$ , другая – размер капли –  $\tau_\gamma^D = \sqrt{D^3 / \gamma}$ ,  $\tau_\gamma^v = vD / \gamma$ , 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:  $U_\gamma^v = \delta_\gamma^v / \tau_\gamma^v = \gamma / v$ ,  $U_g^\gamma = \delta_g^\gamma / \tau_\gamma^\gamma = \sqrt[4]{\gamma g}$ ,  $U_\gamma^v = \delta_\gamma^v / \tau_\gamma^\gamma = \sqrt[4]{v^8 g^3 / \gamma^5}$ ,  $U_\gamma^g = \delta_g^\gamma / \tau_\gamma^v = \sqrt{\gamma^5 / g v^6}$ , а также капиллярную скорость  $U_D^\gamma = \sqrt{\gamma / D}$  [43]. Большое число масштабов однородной размерности отражает многообразие и сложность процессов, протекающих в широком диапазоне масштабов – от надмолекулярных порядка  $\delta_\sigma \sim 10^{-6}$  см в процессах освобождения и накопления ДППЭ, до полного размера области течения.

Отношения характерных масштабов одинаковой размерности задают набор традиционных безразмерных параметров процесса [43, 47]. Он включает следующие числа: Рейнольдса со скоростью  $U$  капли в момент отрыва  $Re = D / \delta_U^v = UD / v$ , Фруда  $Fr = E_k / E_p = U^2 / gD$ , Бонда – капиллярное  $Bo = gD^2 / \gamma$  и электрическое  $Bo_e = \frac{\epsilon \epsilon_0 D}{\sigma} \left( \frac{\Phi_e}{H_e} \right)^2$  [29, 30], Онезорге  $Oh = v / \sqrt{\gamma D}$ , Вебера – капиллярное  $We = DU^2 / \gamma$  и электрическое  $We_e = \frac{\epsilon \epsilon_0}{\rho U^2} \left( \frac{\Phi_e}{H_e} \right)^2$ .

Временные и пространственные масштабы процесса определяют требования к методике экспериментов в части выбора размеров области наблюдения, чувствительности, пространственного и временного разрешения инструментов. Безразмерные отношения используются при описании условий проводимых опытов.

## 2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Опыты выполнены на стенде ДЗК (Динамика заряженной капли), разработанном для изучения динамики и структуры капельных течений в электрическом поле, входящем в состав УИУ «ГФК ИПМех РАН» [48]. Стенд включает дозатор капель, резервуар с рабочей жидкостью, прозрачную приемную кювету, регулируемый источник высокого напряжения, осветители, фото- и видеорегистраторы, блок управления, компьютер.

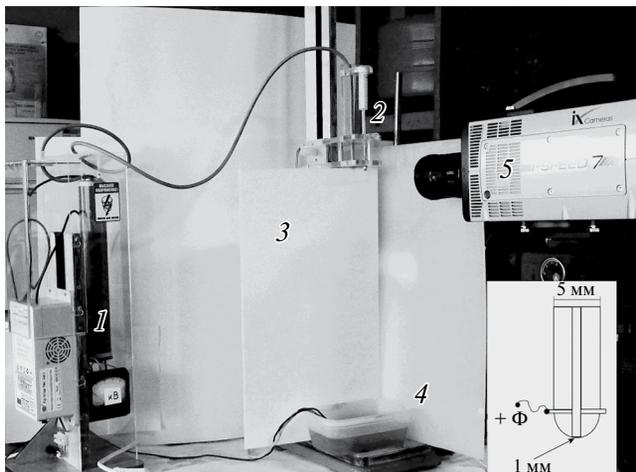
Фотография экспериментальной установки приведена на рис. 1. Здесь 1 – изготовленный в лаборатории источник высокого напряжения (0–30 кВ), 2 – дозатор, состоящий из капилляра и сферического оголовка (приведен на вставке), соединенного через кольцевой электрод с положительным полюсом источника, 3 – матовый экран, обеспечивающий равномерное освещение поля зрения, 4 – кювета с электродом – алюминиевой пластиной, соединенной с отрицательным полюсом источника тока, 5 – видеокамера i-speed 717. Подсветка рабочей зоны экрана, производилась прожекторами Multiled и Godox, расположенными за экраном 3 (на рисунке не показаны).

Источник высокого постоянного напряжения 1 позволяет регулировать выходные значения разности потенциалов в диапазоне  $\Phi = 0–30$  кВ с шагом  $\Delta\Phi = 1$  кВ. Видеокамера (фокусное расстояние объектива 100 мм, рабочая диафрагма 5.6) устанавливалась на расстоянии 15 см от капилляра.

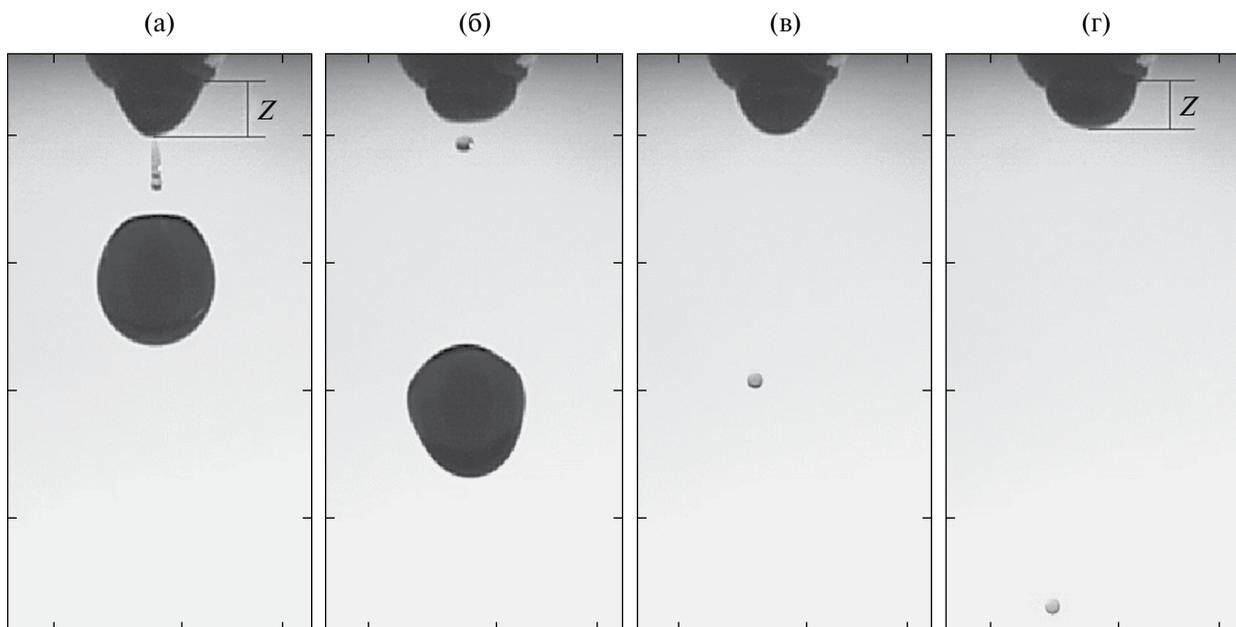
Система подачи жидкости обеспечивала постоянный расход  $Q_w = 0.04$  мл/с, при котором на срезе капилляра диаметром 1 мм формировалась капля размером  $D = 4$  мм при выключенном источнике напряжения. В настоящих опытах в резервуар дозатора добавлялся краситель (черные чернила), что обеспечивало контрастное изображение и отсутствие бликов, искажающих видимые контуры элементов течения и препятствующих дальнейшей математической обработке.

Видеосъемка проводилась на скорости 20000 к/с. Размеру кадра 319×1176 пикселей в физических координатах соответствовало пространственное разрешение 0.05 мм. Из полученных видеозаписей извлекались серии видеок кадров, которые затем подвергались обработке с помощью математических программ масштабного и спектрального анализа.

Отметим, что создаваемое в настоящих опытах электростатическое поле существенно неоднородно, причем при высоких напряжениях неоднородность заметно усиливается из-за вовлечения в зону действия поля участвующих в эксперименте металлических предметов – видеокамеры, осветителей. В таких условиях расчет пространственного распределения напряженности не представляется возможным. Однако результаты эксперимента представляют интерес для технологий, в которых требуется управление размером капли и возможна подобная конфигурация электродов и окружающих металлоконструкций. Поле также может использоваться для управления капельными течениями, исходящими из сопел и (форсунок) двигателей.



**Рис. 1.** Экспериментальный стенд: 1 – источник высокого напряжения; 2 – дозатор капель; 3 – экран; 4 – кювета с электродом; 5 – видеокамера. Вставка: схема капилляра с кольцевым электродом.



**Рис. 2.** Изменение положения маточной жидкости, капли и сателлита: (а–г) –  $t = 0, 18, 59, 77$  мс после отрыва перемычки (деление шкалы 5 мм.  $\Phi = 0$  кВ).

### 3. ГРАВИТАЦИОННЫЙ ОТРЫВ КАПЛИ

Выборка из видеозаписи картины течения отрыва капли в вертикальной плоскости в отсутствии электрического поля показана на рис. 2. В начальный момент капля грушевидной формы связана с маточной жидкостью тонкой гладкой конической перемычкой. В отсутствии электрического поля капля всегда отрывается от нижнего истончающего конца перемычки, как было замечено в ранее выполненных опытах [15]. Далее истончается верхний край перемычки, и она полностью отрывается от маточной жидкости, нижняя кромка которой при этом начинает резко двигаться вверх. В дальнейшем описании время отсчитывается от момента отрыва верхнего конца перемычки.

На гладкой поверхности освободившейся перемычки появляются кольцевые выступы и впадины, и за короткое время поверхность трансформируется в цепочку длиной 2.1 мм из 7 капель, размер которых

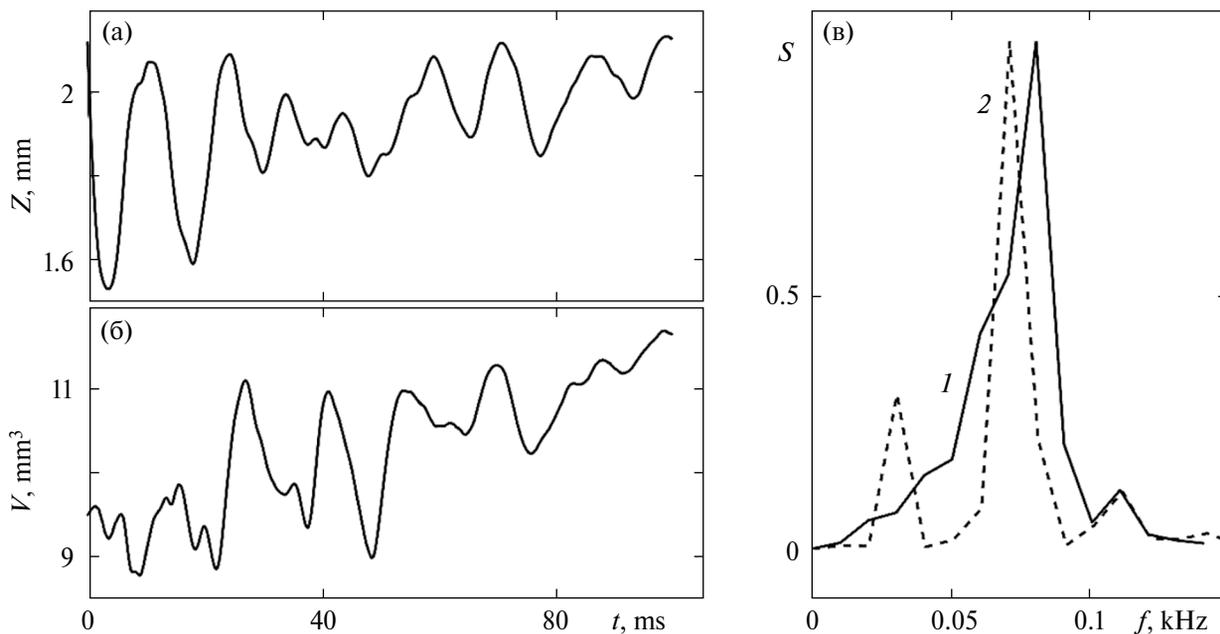


Рис. 3. Вариации высоты (а) и объема (б) маточной жидкости; спектры (в) вариаций высоты (1) и объема (2) с пиковыми частотами 30, 70, 80 и 112 Гц ( $\Phi = 0$  кВ).

уменьшается в направлении маточной жидкости (рис. 2а). Жидкость в перемычке быстро перетекает и наибольший размер приобретает нижняя капля.

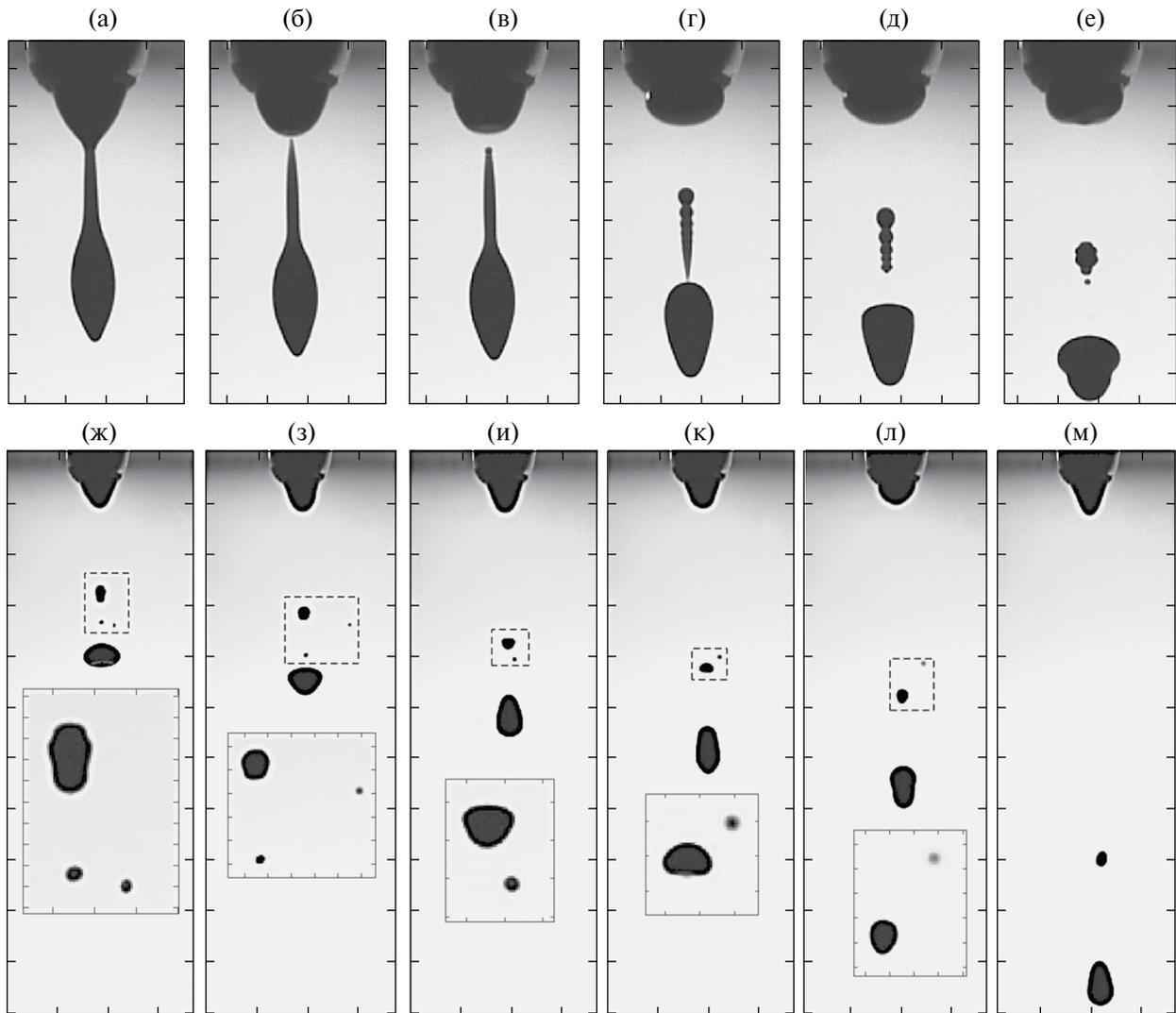
Основная капля в вертикальном сечении имеет форму неправильного ромба с симметрией относительно большей оси, которая наклонена к вертикали на  $\theta = 5^\circ$ . Максимальные размеры капли вдоль большой и малой осей – 5.3 и 4.7 мм. Через  $\Delta t = 18$  мс перемычка стягивается в капельку (сателлит) диаметром  $D = 0.7$  мм с центром, отстоящим от нижнего края маточной жидкости на  $\Delta h = 0.8$  мм. Плоская вершина падающей капли постепенно выпучивается, и капля принимает обратную грушевидную форму (рис. 2б). На следующем кадре (рис. 2в) капля выходит из поля зрения. Сателлит продолжает равноускоренное падение, при этом его траектория отклоняется от вертикали, средняя скорость на данном временном интервале  $\Delta t = 0.18$  мс достигает  $u_s = 0.5$  м/с (рис. 2г). Небольшую долю горизонтальной компоненты импульса сателлит приобретает при отрыве от капли, а основную часть – при отрыве от маточной жидкости, которая совершает сложные трехмерные осцилляции.

Для описания поведения маточной жидкости, оставшейся на сопле после полного отрыва перемычки, выбраны временные зависимости двух переменных – высоты  $Z$  (рис. 3а, г) и объема  $V$ , заключенного внутри интервала  $[0, Z]$ .

Обе переменные совершают неравномерные осцилляции (рис. 3а, б), в спектре которых (рис. 3в) доминируют основные частоты (70 и 80 Гц). По обе стороны от них выделяются менее значимые пики на частотах 30 и 112 Гц. Близость частот доминирующих осцилляций отражает фактическое преобладание вертикальных смещений над другими направлениями. Полученные данные в целом согласуются с результатами ранее проведенных опытов [9, 10, 15].

#### 4. ЭВОЛЮЦИЯ КАРТИНЫ ТЕЧЕНИЯ В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ С ПОТЕНЦИАЛОМ $\Phi = 16$ КВ

Подача напряжения приводит к изменению динамики отрыва и геометрии всех структурных элементов течения и, в первую очередь, растущей капли, приобретающей булавовидную форму (рис. 4а,  $\Phi = 16$  кВ). На первом этапе отделяющийся объем движется как целое, при этом его форма непрерывно видоизменяется, а размеры увеличиваются по мере поступления и перераспределения жидкости. Нижняя часть объема наполняется, а верхняя утончается и вытягивается. Наиболее быстро



**Рис. 4.** Эволюция оторвавшейся заряженной капли при  $\Phi = 16$  кВ, время отсчитывается от момента полного отрыва перемишки, (а–м) –  $t = -1.65, 0, 0.45, 2.80, 4.0, 6.15, 10.35, 13.35, 17.55, 21.05, 24.35, 40.65$  мс, деление шкалы: (а–е) – 2 мм; (ж–м) – основное поле 5 мм, вставка 1 мм.

истончается область контакта отделяющейся части с маточной жидкостью, где и происходит разрыв течения (рис. 4б).

На верхнем конце отделившегося объема быстро формируется сферическая капелька (рис. 4в). Расширяющаяся в нижней части перемишка быстро перестраивается в сужающийся конус (рис. 4г), наиболее узкая часть которого примыкает к скругляющейся вершине падающей капли. В момент, предшествующий разрыву (рис. 4г) отделившегося объема жидкости, в его верхней части выделяются 5 сферических утолщений, размер которых увеличивается в направлении маточной жидкости. При разделении отделившегося объема образуется собственно капля с утолщенной верхней частью и остаток перемишки со сферическими утолщениями диаметрами от 0.6 до 0.9 мм (рис. 4д).

Падающая капля продолжает скругляться, в ней выделяется верхняя часть поперечником  $D = 3.1$  мм и высотой  $h_D = 2.0$  мм. Остаток перемишки, образующий сателлит, стягивается, в нем сохраняется два кольца с равными диаметрами  $d_s = 1.2$  мм (рис. 4е). На данной стадии в процессе осцилляций от нижней кромки сателлита отделяется капелька диаметром  $d_2 = 0.4$  мм, которая движется по направлению к основной капле. Сателлит продолжает стягиваться, и когда на нем остается только одно выступающее кольцо, от нижней кромки отделяется вторая капелька меньшего размера  $d_3 = 0.3$  мм, которая движется вниз и вправо (рис. 4ж).

Основная капля совершает интенсивные колебания, ее форма непрерывно изменяется. Для иллюстрации формы основных компонентов на серии рисунков 4 (ж-м) изменен масштаб – деление шкалы принято равным 5 мм, а деление шкалы вставки – увеличенного изображения, ограниченного штриховыми линиями прямоугольника – составляет 1 мм (вставка выделена серым фоном). На вставке рис. 4ж отчетливо видно, что на сателлите сохранилось только одно утолщение, при этом его верхняя часть более выпуклая, чем нижняя.

За время между кадрами рис. 4ж и 4з основная капля вытягивается к низу, сателлит становится более выпуклым. Первый субсателлит максимально приближается к основной капле (рис. 4з). Вторым сателлит продолжает отклоняться вправо и меняет направление движения по вертикали – начинает подниматься. При этом его изображение теряет четкость, что указывает на его перемещение в направлении, перпендикулярном плоскости экрана. Далее основная капля вытягивается вверх, у осциллирующего сателлита нижняя часть становится выпуклой, а верхняя – плоской. Более крупный первый субсателлит практически перестает смещаться по вертикали, и отклоняется вправо в плоскости экрана (рис. 4и).

Мелкий второй субсателлит ускоренно движется вправо и быстро уходит из плоскости наблюдения. Размытие его изображения указывает на перемещение вдоль оси зрения. Изменчивость картины течения за время кадров на рис. 4и-л показывает, что капля и сателлиты продолжают интенсивно осциллировать. При этом первый субсателлит практически прекращает вертикальное движение, начинает перемещаться по горизонтали и постепенно выходит из поля зрения.

Из сравнения всей совокупности кадров рис. 4в-м следует, что остаток маточной жидкости на срезе капилляра участвует в интенсивном движении по вертикали и горизонтали.

## 5. ОТРЫВ КАПЛИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ С ПОТЕНЦИАЛОМ 18 КВ

Сравнительно небольшое увеличение приложенного электрического напряжения с 16 до 18 кВ приводит к существенному изменению картины течения, эволюцию которого иллюстрируют выборки из видеозаписи, приведенные на рис. 5.

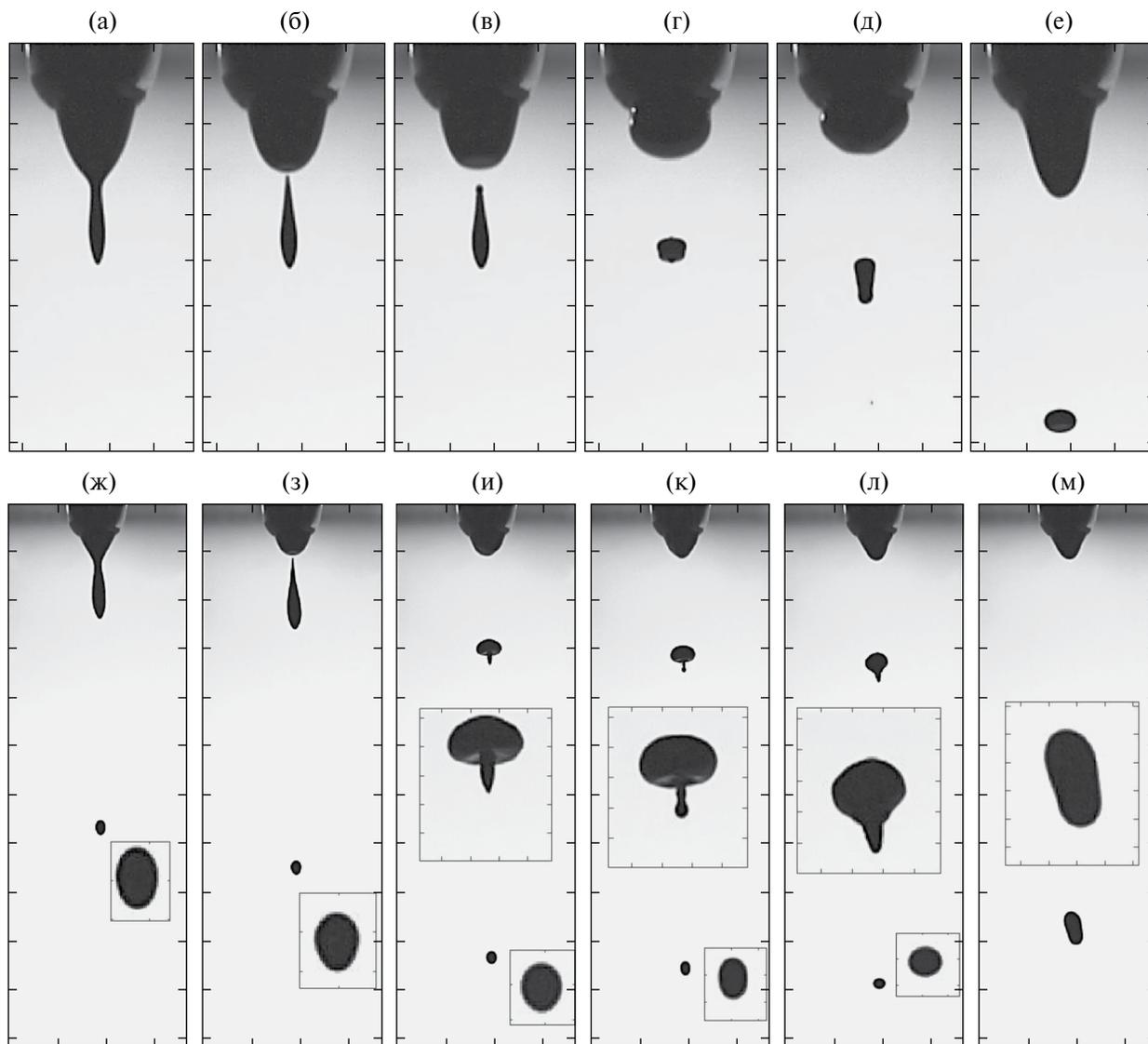
Основное качественное отличие картин течений на рис. 4 и 5 – заметное уменьшение размеров отрывающейся капли и отсутствие перемычки – протяженной тонкой струйки, связывающей маточную жидкость с каплей. Перемычка отделяется с двух концов и со временем трансформируется в сателлит.

Типичный сценарий формирования капли включает образование булавовидной утолщенной внизу струйки переменного сечения с верхней перетяжкой в области примыкания к маточной жидкости (рис. 5а). Перетяжка постепенно истончается, верх струйки заостряется и разрывается (рис. 5б). После разрыва перемычки хвостовик булавовидной капли стягивается в шарик диаметром 0.4 мм, при этом ее длина резко сокращается. Уплощается и стягивается к срезу капилляра и маточная жидкость (рис. 5в). За время между кадрами  $\Delta t = 2.35$  мс оторвавшийся объем превращается в короткую цилиндрическую каплю с двумя утолщениями на краях (рис. 5г).

В окрестности вершины и основания капли прослеживаются мелкие капельки диаметром 0.2 мм, что является признаком большого числа мод (в том числе высоких) ее энергичных осцилляций. Световые каустики и перетяжки на поверхности маточной жидкости также указывают на существование коротких кольцевых капиллярных волн. В течение  $\Delta t = 3.35$  мс капля вытягивается по вертикали и принимает коническую форму со скругленными основаниями и зауженной к вершине (рис. 5д). Вертикальный размер маточной жидкости здесь существенно уменьшился, ее контур заметно утратил симметрию. На следующем кадре (рис. 5е,  $t = 17.55$  мс) капля принимает сжатую по вертикали эллиптическую форму, а маточная жидкость вытягивается в длинный язык.

Для более детальной визуализации быстро изменяющейся картины течения масштаб изображения на следующих кадрах выбран равным 5 мм/дел. При  $t = 36.35$  мс (рис. 5ж) в нижней части рисунка располагается вытянутая по вертикали капля эллиптической формы. Постепенно округлый язык маточной жидкости (рис. 5ж) существенно вытягивается по вертикали с образованием перетяжки, разделяющей коническую верхнюю часть и булавовидную нижнюю.

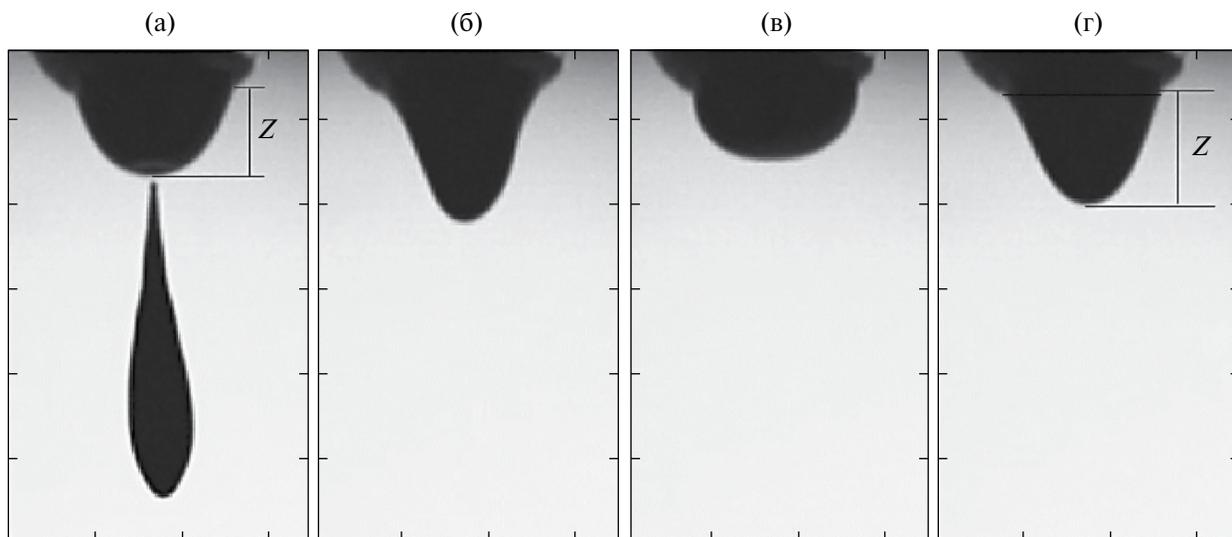
На следующей стадии развития хвостовик булавовидной части (рис. 5з) резко истончается. Далее капля отделяется от остатка маточной жидкости, который стягивается. За время  $\Delta t = 0.95$  мс оторвавшаяся жидкость – вторичная капля – стягивается и приобретает грибовидную форму с вытянутой заостренной ножкой (рис. 5и), при этом падающая первичная капля заметно скругляется. В дальнейшей эволюции



**Рис. 5.** Эволюция течения при отрыве заряженной капли в электрическом поле  $\Phi = 18$  кВ, время отсчитывается от момента полного отрыва перемычки: (а–м) –  $t = -1.65, 0, 0.45, 2.80, 6.15, 17.55, 36.35, 40.20, 48.15, 49.05, 50.30, 77.35$  мс. Деление шкалы: (а–е) – 2 мм; (ж–м) – основное поле – 5 мм, вставка – 1 мм.

течения вершина вторичной капли частично уплощается, а на ножке “гриба” появляются две дополнительные перетяжки (рис. 5к). Первичная капля, напротив, вытягивается по вертикали. Далее контуры вторичной капли продолжают сглаживаться вследствие перетекания жидкости в ее нижнюю часть, а первичная капля приобретает слегка сплюснутую по вертикали форму, близкую к сферической (рис. 5л). При  $t = 77.35$  мс вторичная капля принимает овальную вытянутую по вертикали форму с наклонной продольной осью; первичная капля покидает поле зрения (рис. 5м).

Анализ видеозаписей при существенно меньшей скорости съемки (5000 к/с) показывает, что при  $\Phi = 18$  кВ наблюдаются последовательные отрывы капли без образования перемычки. Период следования капель зависит от расхода  $Q_0$ , установленного при отключенном электрическом поле ( $\Phi = 0$ ). Так, при  $Q_0 = 0.04$  мл/с период следования капель составлял  $T_d = 0.6$  с, а при  $Q_0 = 0.01$  мл/с –  $T_d = 3$  с. При этом объем отрывающейся жидкости уменьшался с подачей напряжения. Форма оторвавшейся капли перестраивается настолько резко, что в некоторых случаях с поверхности (обычно дна или вершины оторвавшейся капли) вылетает небольшая капелька размером много меньше основной капли (около 0.2 мм).



**Рис. 6.** Положение маточной жидкости при  $\Phi = 18$  кВ после отрыва второй капли (а) объемом  $V = 5.2$  мм<sup>3</sup>: (а–г) –  $t = 0, 18, 56, 94$  мс; деление шкалы 2 мм.

В большинстве случаев капелька вылетает в направлении падения капли и движется гораздо быстрее основной капли. В редких случаях вылетевшая капелька движется в сторону маточной жидкости.

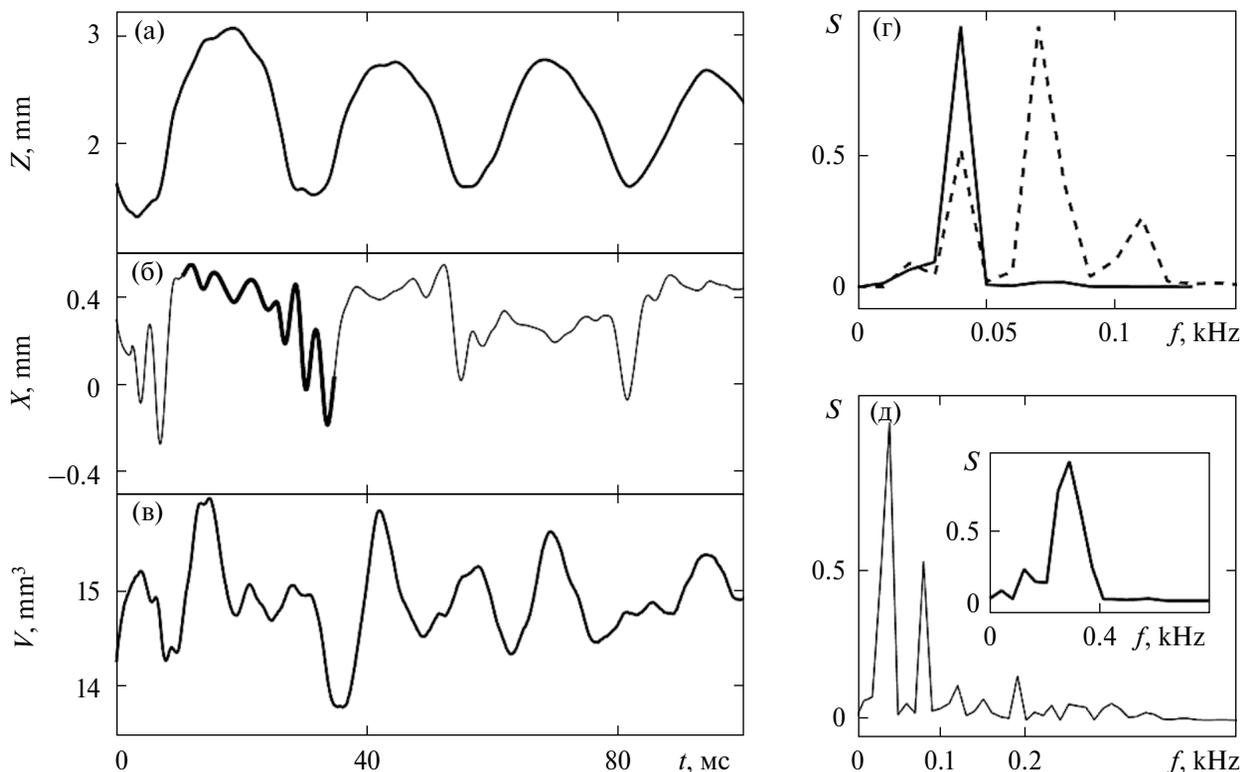
Эволюцию формы маточной жидкости иллюстрирует выборка из видеogramм, приведенная на рис. 6. После отрыва капли (рис. 6 а) высота жидкости на срезе капилляра несколько сокращается, затем начинает быстро увеличиваться и при  $t = 18$  мс ее размер и достигает максимума  $Z = 3$  мм (рис. 6б). Далее ее высота сокращается, донная часть скругляется (рис. 6в). Через  $\Delta t = 38$  мс вертикальный размер вновь увеличивается до  $Z = 2.6$  мм (рис. 6г).

Наглядное представление о поведении остатка маточной жидкости дают временные зависимости вертикального размера  $Z$ , горизонтальной координаты вершины  $X$  (отсчитывается от вертикальной оси кадра) и объема  $V$  (вычисляется в приближении остатка телом вращения), которые показаны на рис. 7 а–в. Вертикальное движение  $Z(t)$  имеет вид почти гармонических колебаний (рис. 7а) с периодом  $T_v = 25$  мс. Горизонтальное смещение  $X(t)$  (рис. 7б) и флуктуации объема  $V(t)$  (рис. 7в) выглядят намного сложнее, однако в них визуально заметен тот же период  $T_v$ . В частотных спектрах всех переменных (рис. 7г, д) наряду с общим пиком на частоте  $1/T_v = 40$  Гц присутствует гармоника 80 Гц, а также пики на комбинационных частотах 110 Гц у объемных пульсаций (рис. 7г, кривая 2) и 190 Гц у горизонтального смещения (рис. 7д). На кривой  $X(t)$  (рис. 7б) на интервале  $11 < t < 35$  мс выделен участок с аномально интенсивными высокочастотными пульсациями, которые отсутствуют в поведении остальных переменных. Энергетический спектр данного участка занимает полосу 200–350 Гц с пиковой частотой 300 Гц (рис. 7д, вставка).

В данном диапазоне напряжений не наблюдалось формирование тонких заряженных нитей [3, 24]. Все компоненты течения сохраняли округлые формы на протяжении всех стадий эволюции, за исключением коротких интервалов при разрывах течения.

В процессах отрыва капле жидкости ключевое значение имеет стадия роста и формирования капли из маточной жидкости на выходном отверстии дозатора. При чисто гравитационном отрыве теоретическое описание базируется на уравнении Навье–Стокса с учетом осевой симметрии. Однако большое число влияющих факторов не позволяет построить аналитическое описание и проводится численное моделирование [49]. В экспериментах по исследованию влияния электростатического поля в качестве источника капле используется либо тонкостенный капилляр [27], либо отверстие в горизонтальной толстостенной крышке [50]. В последнем случае нижняя поверхность крышки выполняется из несмачиваемого материала, что позволяет задать граничные условия на окружности сечения капилляра и упростить теоретический анализ, сделав его результаты сопоставимыми с экспериментальными данными.

В то же время в интересах технологий требуются исследования более сложных дозаторов, в том числе из композитных материалов, обладающих контрастными степенями смачиваемости. Так, получение



**Рис. 7.** Вариации параметров маточной жидкости при  $\Phi = 18$  кВ: высоты (а), горизонтального смещения вершины (б) и объема (в) после отрыва второй капли; (г) – спектры вариаций высоты (1) и объема (2) – пиковые частоты 40, 80, и 110 Гц; (д) – спектры вариаций горизонтального смещения, пиковые частоты 40, 80 и 190 Гц; вставка – спектр выделенного участка (б), пиковая частота 300 Гц.

капель больших размеров на выходе тонкостенных капилляров ограничено из-за малых значений сил поверхностного натяжения вдоль внутренней окружности капилляра. Участие в формировании капли смачиваемой поверхности увеличивает площадь поверхности контакта, что приводит к увеличению размеров капель. Проведенные эксперименты по отрыву капли в оболочке со смачиваемой поверхностью (см. вставку на рис. 1) могут служить моделью формирования капли расплава, срывающегося с электрода при дуговой электросварке [51].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданная экспериментальная установка ДЗК позволяет изучать влияние внешнего электрического поля с потенциалом в диапазоне  $0 < \Phi < 30$  кВ на динамику и структуру всех компонентов течений при гравитационном отрыве, свободном падении и столкновении капли с покоящейся принимающей жидкостью.

Проведены исследования течений при гравитационном отрыве капли ( $\Phi = 0$ ) и приложенном постоянном напряжении  $\Phi = 16$  и  $18$  кВ. Во всех случаях сохраняется общая картина течения, включающая округлые элементы – натекающую маточную жидкость, основную каплю, перемычку, сателлиты.

При разрыве течения (отрыв капли, выброс сателлита) разделенные объекты начинают совершать осцилляции, которые могут достигать такой интенсивности, что происходит выброс мелких капель, направление движения которых может не совпадать с направлением действия силы тяжести.

Небольшое увеличение потенциала (12%, с 16 до 18 кВ) вызывает качественные изменения картины течения, в частности, приводит к прямому отрыву капли от маточной жидкости без образования перемычки. При постоянном расходе жидкости в капилляре размер отрывающихся капель уменьшается с ростом напряжения.

Проведенные опыты показывают, что управление электрическим полем и расходом жидкости открывает дополнительные возможности совершенствования технологий капельных течений в части выбора размеров и формы сопутствующих структурных элементов в дополнение к развиваемым методам филаментизации (электроотрыва или спиннинга) течения.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в Лаборатории механики жидкостей ИПМех РАН при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Госзадания, номер госрегистрации: 124012500442-3.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *abbé Nollet J.A.* Recherches sur les causes particulieres des phénomènes électriques, et sur les effets nuisibles ou avantageux qu'on peut en attendre. Paris: Chez les Freres Guerin, 1974. 444 p.
2. *Ломоносов М.В.* Слово о явлениях воздушных, от электрической силы происходящих. Избранные произведения. Т. 1. Естественные науки и философия. М.: Наука. 1986. С. 163–191.
3. *Zeleny J.* The electrical discharge from liquid points, and a hydrostatic method of measuring the electric intensity at their surfaces // *Phys. Rev.* 1914. V. 3(2), P. 69–91.  
doi:10.1103/PhysRev.3.69
4. *Zeleny J.* On the conditions of instability of electrified drops, with applications to the electrical discharge from liquid points // *Proc. Camb. Phil. Soc.* 1915. V. 18(1), P. 71–83.
5. *Zeleny J.* Instability of electrified liquid surfaces // *Phys. Rev.* 1917. V. 10(1). P. 1–6.  
doi:10.1103/PhysRev.10.1
6. *Tucker N., Stanger J.J., Staiger M.P., Razzaq H., Hofman K.* The history of the science and technology of electrospinning from 1600 to 1995 // *J. of Eng. Fibers and Fabrics, Special iss.* 2012. V. 7(2). P. 63–71.  
doi:10.1177/155892501200702S10
7. *Wesdemiotis C., Williams-Pavlantos K.N., Keating A.R., McGee A.S., Bochenek C.* Mass spectrometry of polymers: A tutorial review // *Mass. Spec. Rev.* 2023. P. 1–50.  
<https://doi.org/10.1002/mas.21844>
8. *Edgerton H.E., Hauser E.A., Tucker W.B.* Studies in drop formation as revealed by the high-speed motion camera // *J. Phys. Chem.* 1937. V. 41(7). P. 1017–1028.  
<https://doi.org/10.1021/j150385a012>
9. *Peregrine D.H., Shoker G., Symon A.* The bifurcation of liquid bridges // *J. of Fluid Mech.* 1990. V. 212(1). P. 25–39.  
doi:10.1017/S0022112090001835
10. *Zhang X., Basaran O.A.* An experimental study of dynamics of drop formation // *Phys. of Fluids.* 1995. V.7(6). P. 1184–1203.  
doi:10.1063/1.868577
11. *van der Waals J.D.* The thermodynamic theory of capillarity flow under the hypothesis of a continuous variation of density (*transl. by Rowlinson J.S.*) // *J. Statist. Phys.* 1979. V. 20. P. 197–244.
12. *Brackbill J.U., Kothe D.B., Zemach C.* A new method for modeling surface tension effects on fluid // *J. Comp. Phys.* 1992. V. 100. P. 335–354.  
doi:10.1016/0021-9991(92)90240-Y
13. *Bierbrauer F., Kapur N., Wilson M.C.T.* Drop pinch-off for discrete flows from a capillary // *ESAIM: Proc.* 2013. V. 40. P. 16–33.  
<http://dx.doi.org/10.1051/proc/201340002>
14. *Notz P.K., Chen A.U., Basaran O.A.* Satellite drops: Unexpected dynamics and change of scaling during pinch-off // *Phys. Fluids.* 2001. V. 13(3), P. 549–552.  
doi:10.1063/1.1343906
15. *Прохоров В.Е., Чашечкин Ю.Д.* Динамика отрыва одиночных капель в воздушной среде // *Изв. РАН. МЖГ.* 2014. № 4. С. 109–118. = *Prokhorov V.E., Chashechkin Yu.D.* Dynamics of separation of a single drop in air // *Fluid Dyn.* 2014, V. 60(8), P. 355–359.  
doi:10.1134/S1028335815080054
16. *Коршунов А.И.* Колебания оторвавшейся от перемычки капли воды // *Изв. РАН. МЖГ.* 2015. № 4. С. 139–143. = *Korshunov A.I.* Oscillations of a water droplet separated from the connection // *Fluid Dyn.* 2015. V. 50. P. 585–589.  
<https://doi.org/10.1134/S0015462815040134>

17. *Kowalewski T.A.* On the separation of droplets from a liquid jet // *Fluid Dyn. Res.* 1996. V. 17(3), P. 121–145. doi:10.1016/0169-5983(95)00028-3
18. *Henderson D.M., Pritchard W.G., Smolka L.B.* On the pinch-off of a pendant drop of viscous fluid // *Phys. Fluids.* 1997. V. 9(11). P. 3188–3200. <https://doi.org/10.1063/1.869435>
19. *Burton J.C., Rutledge J.E., Taborek P.* Fluid pinch-off in superfluid and normal // *Phys. Rev. E.* 2007. V. 75(3). P. 036311. doi:10.1103/physreve.75.036311
20. *Thirevenaz V., Saureta A.* The onset of heterogeneity in the pinch-off of suspension drops // *PNAS.* 2022. V. 119(13). P. 2120893119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2120893119>
21. *Dinic J., Sharma V.* Computational analysis of self-similar capillary-driven thinning and pinch-off dynamics during dripping using the volume-of-fluid method // *Phys. Fluids.* 2019. V. 31. P. 021211. doi:10.1063/1.5061715
22. *Eggers J.* Nonlinear dynamics and breakup of free-surface flows // *Rev. of Modern Phys.* 1997. V. 69(3). P. 865–929. doi:10.1103/RevModPhys.69.865
23. *Eggers J., Villermaux E.* Physics of liquid jets // *Rep. Prog. Phys.* 2008. V. 71. P. 036601. doi:10.1088/0034-4885/71/3/036601
24. *Taylor G.I.* Disintegration of water drops in an electric field // *Proc. Roy. Soc. London A.* 1964. V. 280(1382). P. 383–397. doi:10.1098/rspa.1964.0151
25. *Cloupeau M., Prunet-Foch B.* Electrostatic spraying of liquids: Main functioning modes // *J. of Electrostatics.* 1990. V. 25(2). P. 165–184. doi:10.1016/0304-3886(90)90025-q
26. *Notz P.K., Basaran O.A.* Dynamics of drop formation in an electric field // *J. of Colloid and Interface Sci.* 1999. V. 213(1). P. 218–237. doi:10.1006/jcis.1999.6136
27. *Eow J.S., Ghadiri M., Sharif A.* Experimental studies of deformation and break-up of aqueous drops in high electric fields // *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects.* 2003. V. 225. P. 193–210.
28. *Vlahovska P.M.* Electrohydrodynamics of drops and vesicles // *Ann. Rev. of Fluid Mech.* 2019. V. 51. P. 305–330. doi:10.1146/annurev-fluid-122316050120
29. *Byers C.H., Perona J.J.* Drop formation from an orifice in an electric field // *AIChE J.* 1988. V. 34(9). P. 1577–1580. doi:10.1002/aic.690340922
30. *Hokmabad B.V., Sadri B., Charan M.R., Esmaeilzadeh E.* An experimental investigation on hydrodynamics of charged water droplets in dielectric liquid medium in the presence of electric field // *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects.* 2012. V. 401. P. 17–28. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2012.02.043>
31. *Hokmabad B.V., Faraji S., Dizajyekan T.G., Sadri B., Esmaeilzadeh E.* Electric field-assisted manipulation of liquid jet and emanated droplets // *Int. J. of Multiphase Flow.* 2014. V. 65. P. 127–137.
32. *Zemskov A.A., Shiryayeva S.O., Grigor'ev A.I.* The theory of monodispersion of liquids by gravitational and electric fields // *J. Colloid Interface Sci.* 1993. V. 158(1). P. 54–63. doi:10.1006/jcis.1993.1228
33. *Grigor'ev A.I., Shiryayeva S.O.* The theoretical consideration of physical regularities of electrostatic dispersion of liquids as aerosols // *J. Aerosol Sci.* 1994. V. 25(6). P. 1079–1091. doi: 10.1016/0021-8502(94)90203-8
34. *Зубарев Н.М.* Формирование конических острий на поверхности жидкого металла в электрическом поле // *Письма в ЖЭТФ.* 2001. № 73(10). С. 613–617. = *Zubarev N.M.* Formation of conic cusps at the surface of liquid metal in electric field // *JETP Letters.* 2001. V. 73(10). P. 544–548. doi: 10.1134/1.1387524
35. *Karabut E.A., Zhuravleva E.N., Zubarev N.M., Zubarev O.V.* Evolution of nonlinear perturbations for a fluid flow with a free boundary. Exact results // *J. Fluid Mech.* 2022. V. 953. A1. doi:10.1017/jfm.2022.918

36. *Takamatsu T., Yamaguchi M., Katayama T.* Formation of single charged drops in a non-uniform electric field // JCEJ. 1983. V.16(4). P. 267–272.  
<https://doi.org/10.1252/jcej.16.267>
37. *Зубарев Н.М.* Развитие неустойчивости заряженной поверхности жидкого гелия: точные решения // Письма в ЖЭТФ. 2000. № . 71(9). С. 534–538.
38. *Thoroddsen S.T., Etoh T.G., Takehara K.* High-speed imaging of drops and bubbles // Ann. Rev. of Fluid Mech. 2008. V. 40(1). P. 257–285.  
[doi:10.1146/annurev.fluid.40.111406.102215](https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.40.111406.102215)
39. *Чашечкин Ю.Д., Прохоров В.Е. Андросенко В.Н.* Моделирование влияния электрического поля на капельные течения // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2023. № 24(4). С. 1–15.  
[doi: 10.33257/PhChGD.24.4.1057](https://doi.org/10.33257/PhChGD.24.4.1057)
40. *Rai P., Gautam N., Chandra H.* An experimental approach of generation of micro/nano scale liquid droplets by electrohydrodynamic atomization (EHDA) process // Mater. Today: Proc. 2017. V.4(2). P. 611–620.  
[doi:10.1016/j.matpr.2017.01.064](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.01.064)
41. *Jones A.R., Thong K.C.* The production of charged monodisperse fuel droplets by electrical dispersion // J. Phys. D: Appl. Phys. 1971. V.4. P. 1159–1168.  
[doi: 10.1088/0022-3727/4/8/316](https://doi.org/10.1088/0022-3727/4/8/316)
42. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Гидродинамика. М.: Наука, 1986. 736 с.
43. *Chashechkin Y.D.* Foundations of engineering mathematics applied for fluid flows // Axioms. 2021. V. 10(4). P. 286.  
<https://doi.org/10.3390/axioms10040286>
44. *Эйзенберг Д., Кауцман В.* Структура и свойства воды. Л-д: ГИМИЗ, 1975.
45. *Teschke O., de Souza E.F.* Water molecule clusters measured at water/air interfaces using atomic force microscopy // Phys. Chem. Chem. Phys. 2005. V. 7(22). P. 3856–3865.
46. *Бункин Н.Ф., Индукаев К.В., Игнатьев П.С.* Спонтанная самоорганизация газовых микропузырей в жидкости // ЖЭТФ. 2007. № 131(3). С. 539–555.
47. *Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю.* Тонкая структура картины распределения вещества свободно падающей капли на поверхности и в толще принимающей жидкости в импактном режиме слияния // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2023. № 24(2). С. 1043.  
[doi: 10.33257/PhChGD.24.2.1043](https://doi.org/10.33257/PhChGD.24.2.1043)
48. 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](http://www.ipmnet.ru/uniquequip/gfk/#equip).
49. *Borthakur M.P., Biswas G., Bandyopadhyay D.* Formation of liquid drops at an orifice and dynamics of pinch-off in liquid jets // Phys. Rev. 2017. E96. P. 013115.  
[doi: 10.1103/PhysRevE.96.013115](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.96.013115)
50. *Byers C.H., Perona J.J.* Drop formation from an orifice in an electric field // AIChE J. 1988. V.34. P. 1577–1580.  
<https://doi.org/10.1002/aic.690340922>
51. *Cram L.E.* A numerical model of droplet formation. Proceedings of the 1983 International conference on computational techniques and applications held in University of Sydney, Australia. Elsevier, 1984. P. 182–187.

## Electric Field Effect on the Dynamics of the Structural Flow Components in the Case of Gravity-Induced Separation of a Water Drop

Yu. D. Chashechkin\* and V. E. Prokhorov\*\*

*Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119526 Russia*

*\*e-mail: chakin@ipmnet.ru*

*\*\*e-mail: prohorov@ipmnet.ru*

The high-speed videorecording method is used to investigate the effect of an electrostatic field (with the potential 0, 16, and 18 kV) on the flow geometry in the case of gravity-induced separation of a drop from a capillary tube. The flow videograms are analyzed and the dimensions of the characteristic structural elements, that is, the drops themselves, a connection, and satellites, are determined. The oscillations of the linear dimensions and the mother liquid volume after drop separation are traced at 0 and 18 kV. Both fundamental frequencies and their harmonics are observable in the spectra. It is found that small (12%) variations in the potential value lead to qualitative variations in the flow pattern and, in particular, to direct separation of the drop from the mother liquid without the formation of a connection. At a constant liquid flow in the capillary the dimensions of the separated drops decrease with increase of the voltage. The experiments show the possibility of the fine controlling of drop flows using electrostatic fields.

**Keywords:** drops, satellites, gravity, electrostatics, fragmentation, oscillations.