

УДК 532.5

НАЧАЛЬНЫЙ ЭТАП СЛИЯНИЯ СОСТАВНОЙ КАПЛИ В ИМПАКТНОМ РЕЖИМЕ

© 2024 г. Ю. Д. Чашечкин*, А. Ю. Ильиных**, Ш. Х. Хайирбеков***

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

* E-mail: chakin@ipmnet.ru

** E-mail: ilynykh@ipmnet.ru

*** E-mail: msturistt09@gmail.com

Поступила в редакцию 27.10.2023 г.

После доработки 28.12.2023 г.

Принята к публикации 28.12.2023 г.

Эволюция регулярной тонкой структуры картины распределения окрашенного вещества при растекании свободно падающей многожидкостной капли в глубокой воде впервые прослежена методами технической фото- и видеорегистрации. Изучалась картина течения на начальном этапе формирования каверны и венца при слиянии составной капли, ядро которой – капля раствора ализариновых чернил, было покрыто масляной оболочкой. В картине распределения окрашенной жидкости на дне каверны и стенках венца наблюдались полосчатые структуры, формирование которых связывается с влиянием процессов конверсии доступной потенциальной поверхностной энергии (ДППЭ) при уничтожении контактных поверхностей сливающихся жидкостей. В проведенных опытах изменялась высота падения капли. Положение ядра в составной капле не контролировалось и определялось условиями отрыва. Распад чернильного ядра на волокна наблюдался во всех опытах. Площадь покрытия поверхности каверны и венца окрашенной жидкостью достигала максимума при центральном положении ядра.

Ключевые слова: составная капля, эксперимент, каверна, венец, волокнистая структура

DOI: 10.31857/S1024708424020045 **EDN:** RJGHI

Интенсивность изучения динамики и структуры течений, создаваемых свободно падающей каплей в покоящейся принимающей жидкости, в основе которых лежали зарисовки визуальных наблюдений [1] и первые фотографии [2], в последние десятилетия устойчиво растет. Число публикаций по запросу Drop impact в 2019 г. превышает тысячу только в сети Scopus [3].

Интерес обусловлен глубоким научным содержанием явления, в котором отчетливо проявляется влияние естественных термодинамических процессов на перенос вещества, импульса и энергии на макроскопических масштабах, а также совершенствованием вычислительной и экспериментальной техники. В опытах расширяется диапазон частот зондирующего излучения, включающий и радио-, и световые и рентгеновские волны [4], улучшается временное и пространственное разрешение регистрирующей аппаратуры [5], совершенствуются программы обработки информации [6]. Новые экспериментальные результаты способствуют развитию численных и аналитических методов исследований капельных течений, основанных как на системах фундаментальных уравнений механики жидкостей [7–9] и термодинамики [10, 11], аналогах дифференциальных форм законов сохранения вещества, энергии и импульса – следствий аксиом однородности пространства и времени [12], так и на конститутивных подходах, включающих моделирование действия поверхностных эффектов массовыми силами [13–15].

Традиционно, начиная с работ [1, 2], проводят сравнительное изучение слияния с водой падающих капель чистых смешивающихся жидкостей, как одинаковых (вода–вода [16]), так и однородных по составу капель водных растворов минеральных солей, пигментов, ацетона и других веществ, смешивающихся с водой в любых пропорциях [17, 18]. В минувшие годы активно изучали растекание в глубокой жидкости составных капель, включающих несмешивающиеся жидкости или плохо растворимые газы с дополнительными контактными поверхностями [3, 19].

В зависимости от пространственной структуры многожидкостные капли традиционно именуется составными (compound), в которых капля одной жидкости заключена в другой жидкости (капсулированные, инкапсулированные, оболочечные, ядерные, двух- и многослойные) и составленные (composed) – парные, дуальные, многоядерные, многочастичные или янус-капли в зарубежной литературе.

В составных каплях все контактные поверхности непрерывные и замкнутые. В составленных каплях на контактных поверхностях существуют замкнутые линии и отдельные точки контакта трех сред. Усложнение геометрии капли затрудняет проведение экспериментов и расчетов течений. Тем не менее число таких работ быстро увеличивается и становится сравнимым с числом опытов с однородными каплями [3].

Полученные в опытах с составными каплями научные результаты активно используются при разработке новых технологий в химической, нефтехимической, металлургической и пищевой промышленности [20]; при совершенствовании методик гидродинамических [21], химических, биологических [22] и биомедицинских исследований [23]; при разработке мер по сохранению окружающей среды [24].

Динамика формирования компонентов течения – брызг, капиллярных волн, каверны, венца, всплеска и распределения вещества капли зависит от параметров задачи – состава и плотности ρ сред, диаметра D , площади поверхности S_d , объема V_d и массы $M = \rho V_d$, контактной скорости U и энергии капли – кинетической $En_k = MU^2/2$ и доступной потенциальной поверхностной энергии $En_\sigma = S_d \sigma_d^a$ капли (σ_d^a – коэффициент поверхностного натяжения на границе капли с воздухом). Поверхностная энергия сосредоточена в тонком слое толщиной порядка размера молекулярного кластера $\delta_\sigma \sim 10^{-6}$ см [25, 26].

В интрузивном режиме слияния, когда кинетическая энергия капли меньше поверхностной потенциальной энергии $R_E = En_k / En_\sigma < 1$, капля плавно втекает в толщу жидкости, а каверна образуется с задержкой в несколько миллисекунд [27, 28].

В импактном режиме, при $R_E \gg 1$, капля растекается по поверхности каверны и венца тонкими струйками (триклами, ручейками, лигаментами), следы которых образуют линейчатые и сетчатые структуры, состоящие из треугольных и многоугольных ячеек [29, 30]. Струйки ускоряются в контактной области слияния капли на непрерывно деформирующейся подвижной поверхности жидкости [31]. Волокнистое распределение вещества наблюдается при слиянии капли и с толстым [29, 30], и с тонким слоем жидкости [32].

В импактном режиме на начальном этапе слияния тонкие струйки, содержащие вещество капли, пронизывают дно каверны и поступают в толщу принимающей жидкости в виде отдельных волокон, образующих моховидный слой под дном каверны [33]. Со временем под каверной формируется расслоенная область жидкости промежуточной плотности с собственным значением показателя преломления, позволяющим измерять высоту слоя оптическими инструментами [34]. После схлопывания каверны в течении появляется восходящая центральная струйка – всплеск [2, 17, 35]. Процессы формирования и растекания всплеска перестраивают картину распределения волокон, содержащих вещество капли [36].

Заметное внимание также уделяется экспериментальному изучению капельных течений при контакте несмешивающихся жидкостей. Черно-белые видеogramмы растекания капель воды в силиконовом масле проанализированы в [37], цветные видеogramмы картины растекания капли разбавленных чернил в растительном масле приведены в [38]. Водная пленка, покрывающая тонким слоем каверну, в обоих опытах довольно быстро разбивалась на отдельные пятна, связанные тонкими волокнами. Пятна постепенно стягивались в окрашенные капли, а волокна – в последовательности (“четки”) мелких капелек, распределенных в толще и на поверхности жидкости. Размеры структурных компонентов для различных условий опытов с несмешивающимися жидкостями приведены в [39].

В последние годы особенно активно исследуются процессы слияния многокомпонентных капель, состоящих из соразмерных объемов несмешивающихся жидкостей или газов. Такие статьи составляют почти половину всех публикаций по капельной тематике [3]. В зависимости от состава сред, различают двухкомпонентные и многокомпонентные капли (одним из включений может быть и газ [19, 40]).

В двухкомпонентных составных каплях (компаунд, ядерных или оболочечных) с внешней средой контактирует только одно вещество [21], в составленных (дуальных, парных или янус-каплях) – оба [40]. На практике используются и двух-, и многослойные компаунд капли, составленные из нескольких веществ, а также покрытые тонкой жидкой или мягкой (полутвердой) оболочкой [3]. Список технологий, использующих составные капли в химической, фармацевтической, пищевой, металлургической и других массовых отраслях промышленности быстро расширяется.

Составные капли, образующиеся при попадании капель воды в расплавленный металл, нагретый выше температуры Лейденфроста, служат дополнительным источником возникновения пожаров при промышленных авариях [41]. Одним из перспективных направлений считается создание новых видов топлив,

в которых составные капли содержат воду, добавки, воздух или горючие газы [42]. Осцилляции составных капель активно изучаются аналитическими методами [43].

При моделировании процессов слияния капель численными методами используются большие вычислительные мощности [44–46]. В расчетах применяются системы конститутивных уравнений в приближении несжимаемой жидкости, не включающие уравнения переноса составляющих веществ [44, 45].

В экспериментах составные капли получают многими физико-химическими методами: согласованным выдавливанием жидкостей из соосных капилляров, инъекцией жидкости ядра из микропипетки в растущую каплю, соприкосновением независимо выдавливаемых капель из двух капилляров [3], испарением дополнительной несущей жидкости, термически индуцированным фазовым разделением [47], покрытием поверхности капель масла наночастицами [48] и др.

В основном в опытах регистрируется морфология картины течений – геометрия каверны, венца и пузырей в толще жидкости. Распределение вещества капли в принимающей жидкости ранее практически не изучалось. В данной работе впервые прослежена эволюция тонкой структуры картины распределения вещества составной оболочечной капли в принимающей жидкости на начальном этапе процесса слияния в процессе формирования первичной каверны и венца.

1. ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ

Несколько лет системы конститутивных уравнений, широко применяющиеся для теоретического описания слияния свободно падающей капли с принимающей жидкостью [13–15], дополняются анализом полных решений системы фундаментальных уравнений [7, 8] с уравнениями состояния для плотности и потенциала Гиббса (свободной энтальпии [9]) с физически обоснованными начальными и граничными условиями. Схема распределения потенциала Гиббса в принимающей жидкости и в бинарных составных каплях приведена на рис. 1.

В равновесном состоянии дифференциал потенциала Гиббса в толще жидкости I определяется величиной энтропии s и плотности ρ или удельного объема $V=1/\rho$:

$$dG_\sigma = -sdT + VdP.$$

В приповерхностном слое II толщиной порядка размера молекулярного кластера $\delta_\sigma \sim 10^{-6}$ см структура жидкости более сложная. Энергия также зависит от площади свободной поверхности S_σ [8, 21, 45]:

$$dG_\sigma = -sdT + VdP - S_\sigma d\sigma,$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения.

В тонком поверхностном слое жидкости III толщиной порядка нескольких молекулярных размеров $\delta_s \sim 10^{-8}$ см наиболее отчетливо выражены различные структурные компоненты физико-химической природы – комплексы, клатраты, кластеры, ассоциаты, войды [25, 49]. Также наблюдается самоионизация некоторых сред, в частности воды [50]. Дифференциал потенциала Гиббса в слое включает члены, зависящие от концентрации компонентов S_i и химического потенциала μ_i (эффекты электризации здесь и далее не учитываются):

$$dG_\sigma = -sdT + VdP - S_\sigma d\sigma + \mu_i S_i.$$

В силу малости толщины слоя II плотность поверхностной энергии $W_\sigma = En_\sigma/V_\sigma$ достигает большого значения и существенно превосходит плотность кинетической энергии $W_k = En_k/V_d$, отношение этих величин большое $W_\sigma/W_k \sim V_d/V_\sigma \sim D/\delta_\sigma \sim 10^6$. Падающая со скоростью $U \sim 1$ м/с капля диаметром порядка $D \sim 1$ см сливается за время порядка $\Delta\tau_d \sim 10^{-2}$ с, а преобразование доступной потенциальной поверхностной энергии проходит за время порядка $\Delta\tau_\sigma \sim 10^{-8}$ с. Освобожденная энергия формирует тонкие струйки – лигаменты (ручейки, триклы), которые наблюдаются при слиянии смешивающихся жидкостей [28–31, 33].

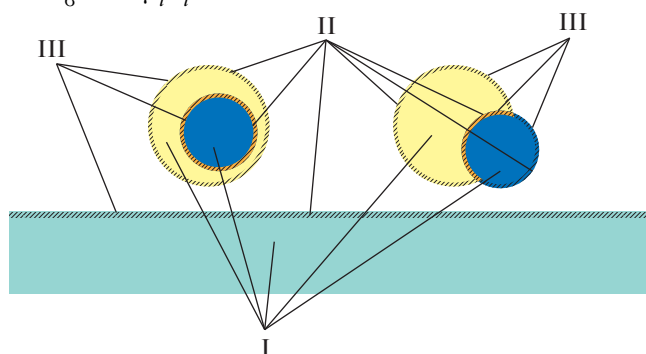


Рис. 1. Структура капельной жидкости (слева – оболочечная, справа – дуальная капля): I – III – толща, приповерхностный и поверхностный слой.

В данных опытах исследовалась картина растекания оболочечной капли, включающей окрашенное ядро – капельку разбавленных ализариновых чернил в масляной оболочке (см. рис. 1).

В отличие от классической постановки задачи слияния однородной капли, размерные параметры, участвующие в описании слияния составной капли, включают физические параметры уже не трех, а четырех контактирующих сред – принимающей жидкости, воздуха, внутреннего ядра и внешней оболочки капли. Принадлежность параметра обозначается индексами для принимающей жидкости t , воздуха a , ядра d^n и оболочки d^s капли соответственно.

Из анализа полной системы уравнений механики жидкостей, физически обоснованных уравнений состояния и граничных условий [7–9] применительно к задачам отрыва и слияния капли следует, что в число основных размерных параметров, характеризующих изучаемое течение, входят потенциалы Гиббса ядра и оболочки капли G_d^n и G_d^s , воздушной среды G_a и принимающей жидкости G_t , плотности $\rho_d^n, \rho_d^s, \rho_a, \rho_t$, четыре кинематические $\nu_d^n, \nu_d^s, \nu_a, \nu_t$ и динамические вязкости $\mu_d^n, \mu_d^s, \mu_a, \mu_t$; шесть полных $\sigma_{d,n}^{s,a}, \sigma_{d,n}^a, \sigma_{d,s}^a, \sigma_t^a, \sigma_t^{d,n}, \sigma_t^{d,s}$ и шесть нормированных на плотность $\gamma_{d,n}^s, \gamma_{d,n}^a, \gamma_{d,s}^a, \gamma_t^a, \gamma_t^{d,n}, \gamma_t^{d,s}$ коэффициентов поверхностного натяжения для поверхностей раздела сред; эквивалентные диаметры D_n и D_s , площади поверхности S_d^n и S_d^s , объемы V_d^n и V_d^s ; массы M_d^n и M_d^s ядра и оболочки; ДППЭ $En_{\sigma,d}^{n,s} = \sigma_{d,n}^{n,s} S_d^n$ и $En_{\sigma,d}^{s,a} = \sigma_{d,n}^{s,a} S_d^s$; коэффициенты диффузии вещества ядра и оболочки капли в принимающей жидкости $\kappa_t^{d,n}$ и $\kappa_t^{d,s}$, а также контактная скорость капли U , которая движется как целое; ее полная масса $M_d = M_d^n + M_d^s$, кинетическая энергия капли $En_{k,d} = M_d U^2 / 2$ и ее компонентов – ядра $En_k^n = M_d^n U^2 / 2$ и оболочки $En_k^s = M_d^s U^2 / 2$.

Большое число параметров позволяет сформировать развернутые группы собственных масштабов длины и времени, характеризующих слияние составной капли с принимающей жидкостью.

Базовая группа линейных масштабов, которые определяются физическими свойствами сред, включает группу капиллярно-гравитационных отношений $\delta_g^\gamma = \sqrt{\gamma/g}$ входящих в дисперсионное уравнение коротких поверхностных волн [4], и диссипативно-капиллярных масштабов $\delta_v^\gamma = \nu^2/\gamma$. Группы линейных масштабов, зависящих от скорости капли U , включают масштабы Прандтля $\delta_U^\nu = \nu/U$ и капиллярные масштабы $\delta_U^\gamma = \gamma/U^2$ для каждой из сред.

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

Отношения базовых масштабов длины и времени определяют набор характерных капиллярных и капиллярно-диссипативных скоростей задачи [51]. Собственные масштабы задачи определяют требования к методике эксперимента – выбору размера поля наблюдения, пространственного и временного разрешения инструментов.

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.

Базовые динамические параметры капли в целом – импульс $\mathbf{p}_d = M\mathbf{U}$, кинетическая $En_{k,d} = M U^2 / 2$ и полная доступная потенциальная поверхностная энергия (ДППЭ) $En_{\sigma,d} = \sigma_{d,n}^{n,s} S_d^n + \sigma_{d,n}^{s,a} S_d^s$.

Отношения характерных масштабов одинаковой размерности задают набор традиционных безразмерных параметров процесса, включающий числа Рейнольдса $Re = UD/\nu$, Фруда: $Fr = U^2/gD$, Бонда $Bo = gD^2/\gamma_{d,s}^a$, Онезорге $Oh = \nu/\sqrt{\gamma D}$ и Вебера $We = DU^2/\gamma_{d,s}^a$, которые применяются для сравнения условий проведенных опытов. Дополнительными безразмерными параметрами течения выбраны отношения компонентов энергии $R_E = En_k/En_\sigma$, $R_{E\sigma} = E_{\sigma,d}^{n,s}/E_{\sigma,d}^{s,a}$ и их плотностей $R_W = En_k\delta/En_\sigma D$. Для сокращения описания процессов слияния составной капли значения параметров приведены только для воды. Плотность, поверхностное натяжение и другие параметры раствора чернил близки к значениям соответствующих параметров для воды.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Опыты выполнены на доработанном стенде для изучения тонкой структуры быстропротекающих процессов (ТСТ), входящем в состав Уникальной исследовательской установки УИУ “ГФК ИПМех РАН” [52]. Фотографии и подробные описания стендов приведены в работах [28, 30]. Картины слияния составных

капель регистрировали высокоскоростной видеокамерой Optonics CR 300 × 2 или фотоаппаратом Canon EOS 350D.

Оболочечные составные капли формировались методом инъекции ядра из соосного тонкого капилляра в подготовленную масляную каплю, висящую на срезе капилляра. Схема дозатора приведена на рис. 2. Первоначально на срезе внешнего капилляра формировалась масляная капля с помощью питателя 2.

Когда капля масла достигала нужного размера, с помощью тонкой соосной иглы 1 производилась медленная инъекция раствора ализариновых чернил, пока составная капля не отрывалась от среза капилляра под действием собственного веса. Скорость капли в момент контакта с принимающей жидкостью определялась по кадрам видеоряда.

Как и в случае растекания однородной капли, картины течения существенно различаются при слиянии медленно и быстро движущейся капли в момент контакта. Критерий перехода от медленного интрузивного втекания капли в толщу принимающей жидкости к быстрому импактному режиму растекания по ее поверхности определяется отношением кинетической энергии капли к доступной потенциальной поверхностной энергии [29].

В интрузивном режиме, когда кинетическая энергия капли En_k меньше доступной потенциальной поверхностной энергии En_{σ} , определенной по внешнему диаметру, $R_E < 1$, вещество ядра вначале равномерно растекается по поверхности каверны, затем собирается не ее дне и проваливается в толщу принимающей жидкости, образуя вытянутую по вертикали интрузию сложной формы.

При больших скоростях падения капли, при $R_E > 1$ слой равномерно распределенной по поверхности каверны жидкости ядра постепенно трансформируется в регулярную систему волокон. Именно этот режим структурированного течения, ранее не отмеченный, по мнению авторов, в литературе, был выбран для дальнейшего изучения.

Всего были проведены четыре серии опытов с оболочечными каплями с наружным диаметром в диапазоне $3.3 < D_s < 5$ мм, свободно падающими с высоты $H = 30, 44$ и 50 см. Ядро капли составляла капля ализариновых чернил, разбавленных в пропорции 1:20. Оболочка – рафинированное пищевое подсолнечное масло плотностью $\rho_d^s = 0.91$ г/см³. Коэффициент поверхностного натяжения на границе масла с воздухом $\sigma_0^a = 33$ г/с², а на границе с водой $\sigma_w^o = 23.5$ г/с². Значение коэффициента поверхностного натяжения определялось методом подвешенной капли (suspended drop) [53]. Значения коэффициента динамической вязкости для чернильного ядра $\mu_d^n = 0.01$ г × см⁻¹ × с⁻¹, для масляной оболочки $\mu_d^s = 0.55$ г × см⁻¹ × с⁻¹; значение коэффициента кинематической вязкости – $\nu_d^n = 0.01$ см² × с⁻¹ и $\nu_d^s = 0.6$ см² × с⁻¹ соответственно.

Полученные составные капли имели толщину масляного слоя в диапазоне $0.2 < \Delta l_s < 1.1$ мм. Предварительные опыты показали, что смещение центра ядра относительно центра оболочки лежало в диапазоне масштабов $0.1 < \Delta r_s < 0.3$ мм. В данных опытах форма капли и смещение ядра не регистрировалось по техническим причинам. Контактная скорость капель лежала в интервале $2.4 < U < 3.1$ м/с. Принимающая жидкость – частично дегазированная водопроводная вода, находилась в кювете $10 \cdot 10 \cdot 8$ см³. Характерные энергетические оценки компонентов течений указаны в табл. 1.

Таблица 1. Энергетические оценки компонентов течений водно-масляной капли (при средней толщине масляного слоя $\Delta l_s = 0.65$ мм, наружном диаметре $D_s = 5$ мм и скорости падения $U = 3$ м/с)

$En_{\sigma,d}^{n,s}$, мкДж	$En_{\sigma,d}^{s,a}$, мкДж	En_k^n , мкДж	En_k^s , мкДж	$En_{\sigma,d}$, мкДж	$En_{k,d}$, мкДж	R_E	$R_{E\sigma}$
1.01	2.59	119.34	159.39	3.60	278.73	77.43	0.39

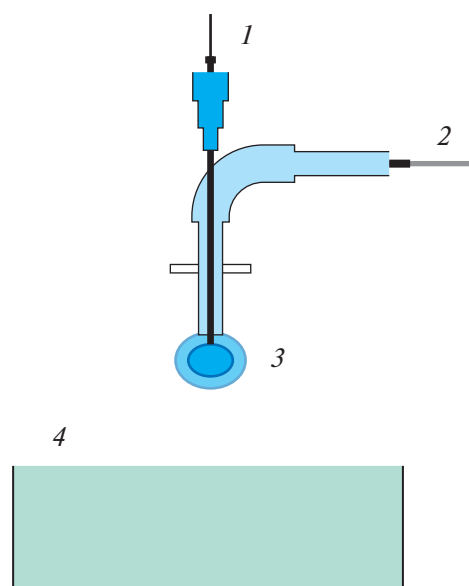


Рис. 2. Схема дозатора составных капель: 1, 2 – капилляры подачи жидкостей ядра и оболочки; 3 – растущая составная капля; 4 – кювета с принимающей жидкостью.

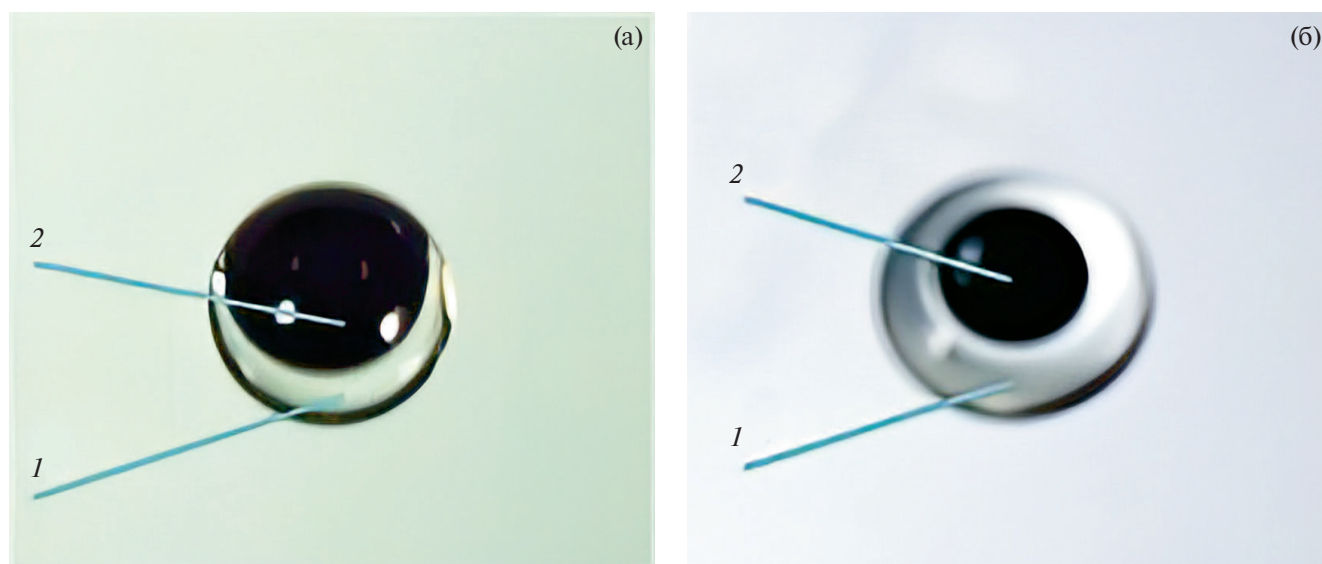


Рис. 3. Фотографии составных капель: а, б – с сильно и слабо смещенным ядром; 1 – масляная оболочка; 2 – ядро.

Применялись два варианта регистрации. При наблюдениях картины течения в толще жидкости в вертикальной плоскости угол наклона линии визирования составлял $\vartheta = 0^\circ$ к горизонту. При наблюдениях свободной поверхности $\vartheta = 0^\circ$. Длительность экспозиции составляла 200 мкс, скорость съемки – 4000 к/с.

3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

При слиянии быстро падающих капель, кинетическая энергия которых значительно превышает ДППЭ $R_E \gg 1$, каверна начинает формироваться с момента первичного контакта жидкостей. В случае контакта смешивающихся жидкостей вещество капли распределяется по поверхности жидкости в виде отдельных волокон, образующих линейчатые и сетчатые картины на поверхности каверны и венца [27, 29].

Степень выраженности отдельных структурных компонентов течений зависит от многих размерных (или приведенных безразмерных) параметров задачи, в частности, контактной скорости капли при постоянных значениях остальных физических величин. При слиянии несмешивающихся жидкостей капля быстро растекается по поверхности каверны и венца, далее в масляной пленке появляются пустоты, оконтуренные тонкими границами [38]. Постепенно границы разрываются, и вещество капли стягивается в системы капелек различного размера в толще и на поверхности жидкости.

Приведенные ниже выборки из видеофильмов показывают, что тонкая структура наблюдаемых картин распределения вещества составных капель в принимающей жидкости значительно отличаются от распределения веществ однокомпонентной капли.

3.1. Начальный этап слияния составной капли

Фотография составной капли с чернильным ядром, покрытым масляной оболочкой непосредственно перед началом слияния, приведена на (рис. 4а), отсчет времени ведется от момента первичного контакта оболочки капли с поверхностью принимающей жидкости. При начале слияния, за время меньше $\Delta t = 0.25$ мс, которое определяется скоростью съемки, по поверхности принимающей жидкости успевают растечься масляная пленка, и сформироваться четыре кольца вокруг центральной капли (рис. 4б).

Ближайшее к капле светлое кольцо визуализирует плоское дно каверны [27], следующее, более темное – наклонную стенку, следующее светлое – формирующийся венец, и внешнее темное – масляную пленку. Окрашенная жидкость ядра капли начинает растекаться в виде ориентированного на 11 часов пигментированного языка, снизу и сверху покрытого масляной пленкой. Распределение пигмента в пленке неравномерное, прослеживается полосчатая периодическая структура.

Капля в момент первичного контакта все еще сохраняет округлую форму, ее диаметр $D = 5$ мм; при этом диаметр первичной каверны составляет $d_c = 6.81$ мм. Ширина языка (хорда) составляет $d_\perp = 3.86$ мм. Длина языка в начале процесса слияния при $t < 2$ мс остается примерно постоянной и составляет $l_\perp = 1.72$ мм.

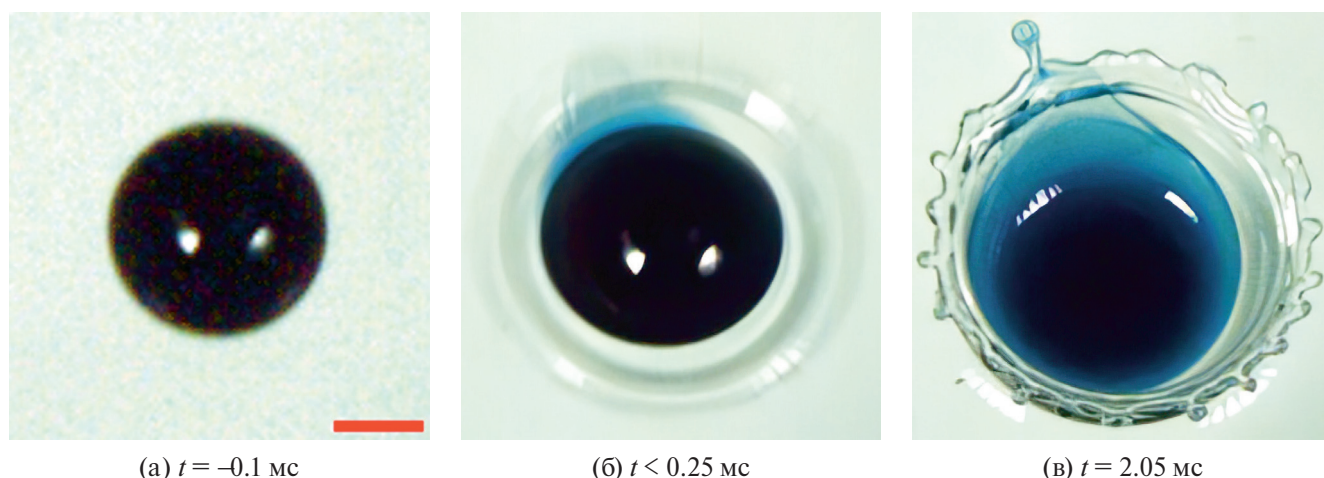


Рис. 4. Эволюция распределения вещества составной чернильно-масляной капли на начальном этапе импакта. Длина маркера – 2 мм ($H = 44$ см, $U = 290$ см/с, $D_n = 2.8$ мм, $D_s = 5$ мм, $M_n = 11.49 \times 10^{-6}$ кг, $M_s = 49.1 \times 10^{-6}$ кг, $M = M_n + M_s = 60.59 \times 10^{-6}$ кг, $Re = 242$, $Fr = 172$, $We = 1168$, $Bo = 6.8$, $Oh = 0.14$, $En_{k,d} = 254.79$ мкДж, $En_{\sigma,d}^{n,s} = 0.58$ мкДж, $En_{\sigma,d}^{s,a} = 2.59$ мкДж, $R_E = 80.38$, $R_{E\sigma} = 0.22$).

В картине слияния составной капли при $\Delta t > 2$ мс идентифицируются все компоненты импактного течения однородной капли [29] – каверна, на стенках которой можно выделить капиллярные волны, венец, на кромке которого формируются короткие шипы (рис. 4в). На вершинах шипов собираются капельки. Наиболее полно сформированная капелька, в которой тонкие волокна, окрашенные пигментом ядра, погружены в масло оболочки составной капли, образуется на вершине шипа, расположенного в центре языка.

В отличие от растекания смешивающихся жидкостей в импактном режиме [30] здесь в первые $\Delta t = 2$ мс после контакта не наблюдается интенсивного образования лигаментов. По поверхности жидкости растекается масляный слой, освобождающаяся при уничтожении контактных поверхностей ДППЭ быстро рассеивается и не успевает перейти в кинетическую энергию течения, внутренняя энергия конвертируется в осцилляции давления и температуры.

3.2. Фаза формирования тонкой структуры картины слияния составной капли

В ходе дальнейшей эволюции картина течения заметно меняется. Капелька масла с волокнами окрашенной жидкости ядра средним диаметром $d_s = 0.8$ мм отделяется от шипа на кромке венца при $t = 3.6$ мс (рис. 5а) и удаляется со скоростью $u_s = 128$ см/с. На выборке видеок кадров видно, что в процессе полета капля совершает свободные колебания, наложенные на вращательное движение, при этом меняет свою форму и размеры.

После отрыва капельки происходит капиллярное сжатие остатка шипа, и начинается стягивание масляной пленки, покрывающей поверхность тонкого слоя окрашенной жидкости ядра на дне каверны. При этом слой окрашенной жидкости преобразуется в последовательность тонких поперечных волокон (рис. 5а, б).

Граница области трансформации структуры языка продвигается равнозамедленно. Ее максимальная скорость достигается в интервале $3 < t < 4$ мс и составляет $U_f = 1.33$ мм/мс. Минимальная скорость $U_f = 1.12$ мм/мс наблюдается при окончании процесса стягивания при $t \sim 10$ мс. Средняя скорость продвижения границы стягивающейся пленки $U_f = 1.3$ мм/мс. При $t = 4.8$ мс она проходит по середине каверны.

Под действием сил поверхностного натяжения происходит заметное сглаживание кромки венца: граница последнего приобретает все более плавную форму (рис. 5в). Образующиеся поперечные волокна “разрезаны” на части длиной $\delta_l = 0.26\text{--}0.33$ мм, длина которых постепенно увеличивается по мере роста размеров каверны (рис. 5г, д) и при $t = 10$ мс (рис. 5е) система волокон покрывает практически всю поверхность каверны.

По мере изменения геометрии каверны происходит быстрая трансформация картины распределения жидкости капли. Вначале становятся все более выраженными продольные полосы, в их окрестности появляются кольцевые структуры (рис. 5ж). Наиболее быстро трансформация идет на периферии течения около вертикальных стенок каверны, где появляются двойные петли.

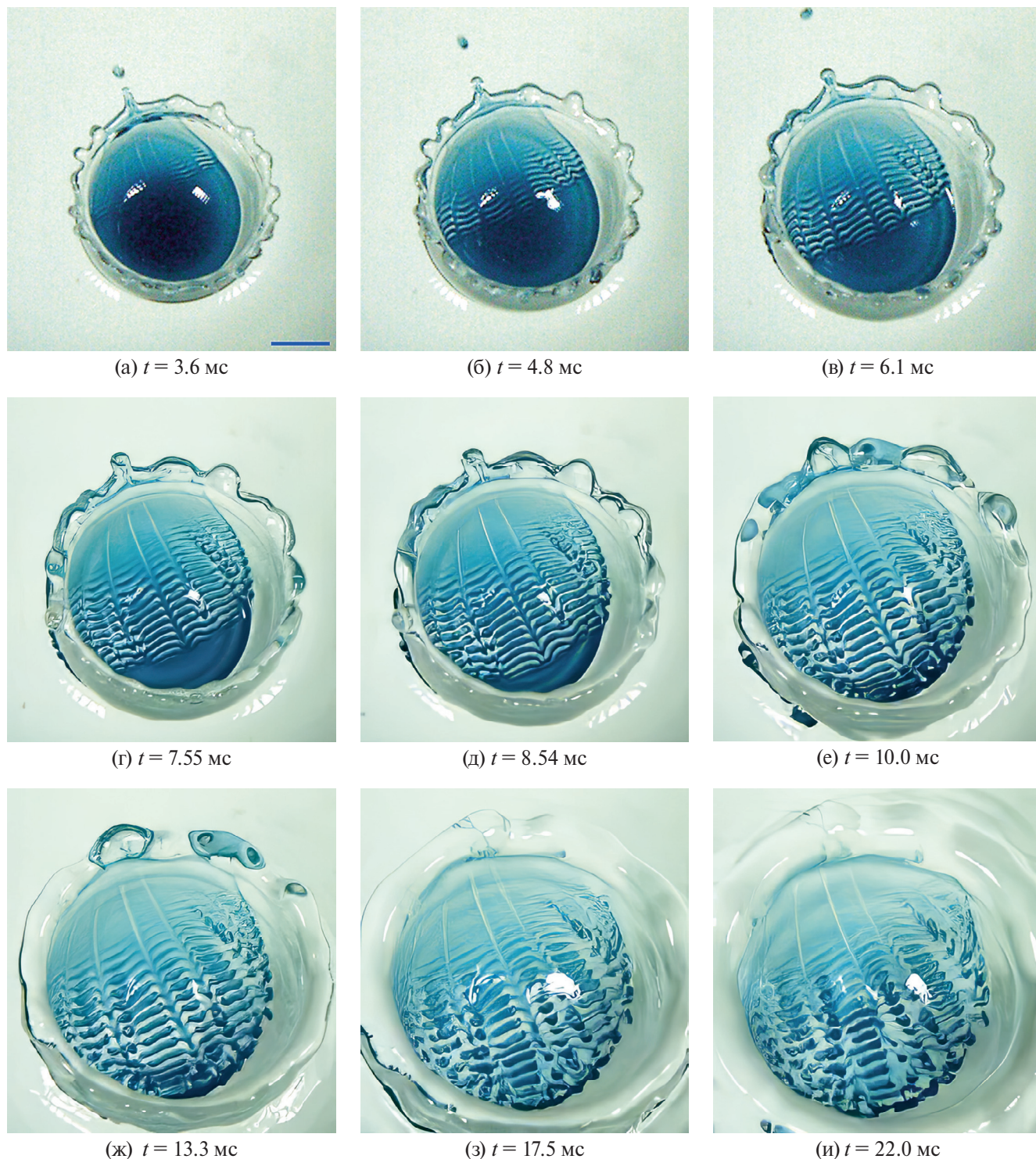


Рис. 5. Эволюция распределения вещества составной чернильно-масляной капли на этапе образования лигаментов. Длина маркера – 4 мм ($H = 44$ см, $U = 290$ см/с, $D_n = 2.8$ мм, $D_s = 5$ мм, $M_n = 11.49 \times 10^{-6}$ кг, $M_s = 49.1 \times 10^{-6}$ кг, $M = M_n + M_s = 60.59 \times 10^{-6}$ кг, $Re = 242$, $Fr = 172$, $We = 1168$, $Bo = 6.8$, $Oh = 0.14$, $En_{k,d} = 254.79$ мкДж, $En_{\sigma,d}^{n,s} = 0.58$ мкДж, $En_{\sigma,d}^{s,a} = 2.59$ мкДж, $R_E = 80.38$, $R_{E\sigma} = 0.22$).

Далее начинают распадаться две центральные полосы, причем правая эволюционирует быстрее, чем левая. Системы колечек появляются и на продольных линиях (рис. 5з). Картина течения теряет однородность – в верхней части полосчатые структуры просветляются с сохранением своей формы, в нижней – распадаются на кольцевые элементы, связанные тонкими волокнами. Со временем увеличивается контраст

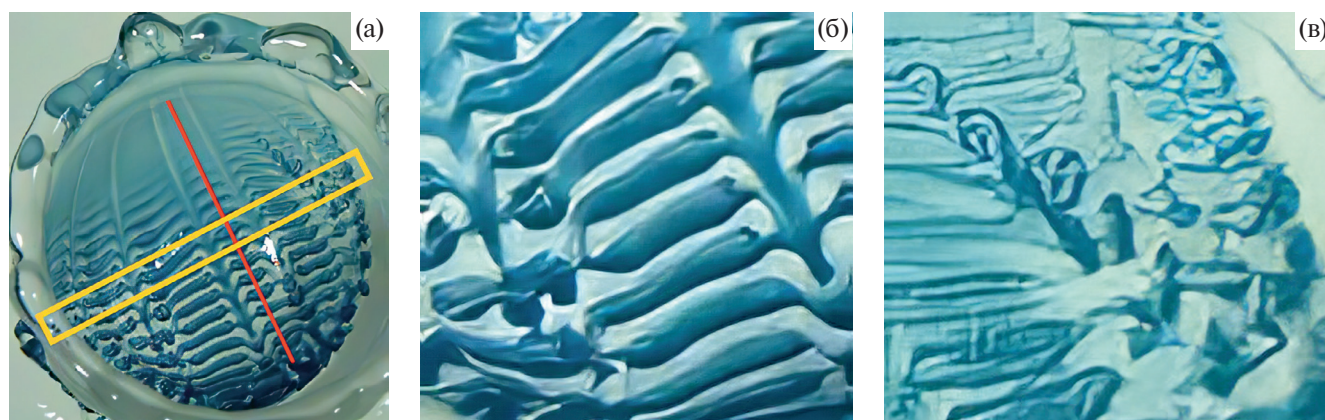


Рис. 6. Увеличенный вид решетки (а) с чернильными валиками (б) и диффузными петельками (в).

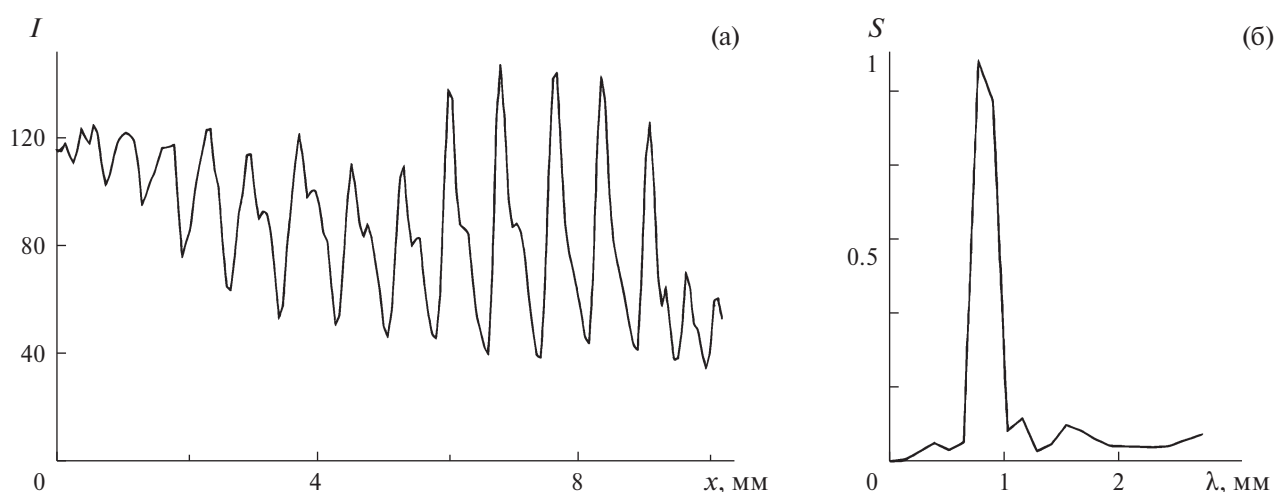


Рис. 7. Структура полосчатого течения по данным рис. 5: (а), (б) – распределение относительной освещенности I , нормированной на максимальное значение, вдоль продольной центральной линии и его пространственный спектр S .

в окраске волокон и степень анизотропии структуры, усложняется картина вихревых волокон в нижней части течения. Вокруг расплывающегося венца шириной $\Delta l_r = 3.6$ мм появляются две кольцевые капиллярные волны длиной $\lambda_c = 1.2$ мм.

Отдельные элементы картины течения на рис. 5е приведены на рис. 6б в увеличенном формате. Продольный размер последовательности валиков на главном диаметре (оранжевая выделенная область длиной 13.50 мм на рис. 6а) составляет 0.58 мм; 2.03 мм; 2.81 мм; 1.66 мм; 1.59 мм; 0.61 мм; 0.42 мм (отсчет от левой кромки).

Относительный размер чернильных валиков (по отношению к главному диаметру) составляет 0.043; 0.150; 0.208; 0.132; 0.123; 0.045; 0.031. Абсолютный размер продольных (диффузных) структур слева направо: 6.34 мм; 9.21 мм; 10.7 мм; 8.45 мм; 6.69 мм; 5.42 мм. Относительный размер продольных структур (по отношению к главному диаметру): 0.47; 0.68; 0.79; 0.62; 0.49; 0.40.

Измерение максимальной толщины чернильных валиков в центре течения было произведено двумя способами: прямым и спектральным, по оценке распределения освещенности вдоль продольной оси картины (рис. 7а). Видно, что график на рис. 7а имеет некоторый спадающий тренд, что можно объяснить тем, что светодиодные осветители находились преимущественно с одной стороны кюветы.

Толщина валиков вдоль продольной оси при измерении сверху вниз (первый находится на пересечении оранжевого прямоугольника и красной линии) составляет 0.508 мм, 0.515 мм, 0.473 мм, 0.495 мм, 0.529 мм, 0.481 мм, 0.474 мм. Среднее значение – 0.496 мм. Указанные размеры по отношению к главному диаметру составляют 0.0376, 0.0381, 0.035, 0.0367, 0.0392, 0.0356, 0.0351.

Наличие вторичных пиков говорит о присутствии волокон и связанных с ними неравномерно окрашенных областей внутри валика, что согласуется с прямыми наблюдениями на увеличенном изображении рис. 6б.

Ширина впадин на рис. 7а составляет 0.49 мм, 0.52 мм, 0.45 мм, 0.48 мм, 0.55 мм, 0.48 мм, 0.46 мм (среднее значение – 0.49 мм). Указанные величины хорошо согласуются с ширинами валиков, полученных прямым измерением вдоль красной линии на рис. 6а.

Близкое к равномерному расположение пиков и впадин на рис. 7а, а также присутствие одного ярко выраженного пика на рис. 7б говорит о почти периодическом распределении пигмента.

Далее, при $t > 25$ мс, венец окончательно спадает, каверна схлопывается и, как в случае падения однородной капли [35], начинает формироваться всплеск. Изменение глобальной динамики и геометрии течения сопровождается трансформацией изучаемой линейчатой структуры в другие формы, как и случае растекания однокомпонентной капли [36]. Сложный процесс дальнейшей эволюции течения при слиянии составной капли требует дополнительного изучения.

3.3. Наблюдение картины течения в толще жидкости

Выборки из видеогаммы, иллюстрирующей эволюцию картины течения, возникающего в толще жидкости при слиянии свободно падающей капли с окрашенным ядром диаметром $D_n = 2.7$ мм и внешним диаметром $D_s = 3.3$ мм в вертикальной плоскости приведены на рис. 8а–е.

В течение первых миллисекунд формируются традиционные элементы структуры течения – каверна с выпуклым дном, восходящий стягивающийся венец с расширенной кромкой, вершина которой покрыта растущими шипами. Верхняя левая часть венца окрашена пигментом ядра, правая, заполненная маслом – прозрачная. В этом течении вещества капли частично разделились.

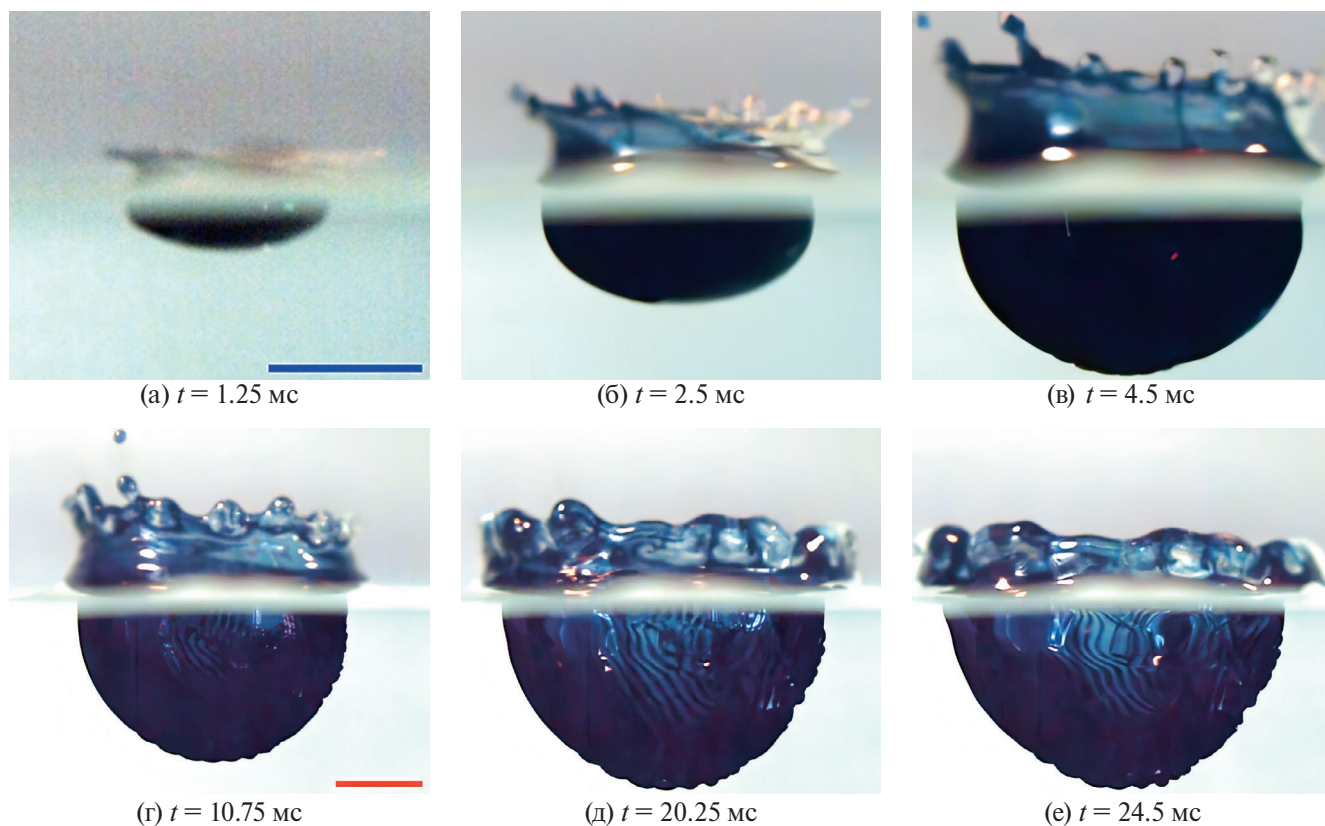


Рис. 8. Эволюция картины распределения вещества составной чернильно-масляной капли в боковой проекции. Длины маркеров – 5 мм ($H = 50$ см, $U = 300$ см/с, $D_n = 2.7$ мм, $D_s = 3.3$ мм, $M_n = 10.31 \times 10^{-6}$ кг, $M_s = 7.74 \times 10^{-6}$ кг, $M = M_n + M_s = 18.05 \times 10^{-6}$ кг, $Re = 165$, $Fr = 278$, $We = 825$, $Bo = 2.97$, $Oh = 0.174$, $En_{k,d} = 81.23$ мкДж, $En_{\sigma,d}^{n,s} = 0.54$ мкДж, $En_{\sigma,d}^{s,a} = 1.13$ мкДж, $R_E = 48.64$, $R_{E\sigma} = 0.48$).

С вершин вытянутых шипов отрываются капельки – слева окрашенные, справа прозрачные (рис. 8б–г). Скорости брызг составляют $u_s^l = 138$ см/с и $u_s^r = 119$ см/с соответственно. Первая капелька слева меньше второй, справа, у капелек масла, – наоборот (рис. 8в, г).

Постепенно нижняя кромка окрашенной жидкости теряет гладкость, на ней появляются широкие выступы, разделенные узкими впадинами (см. рис. 8в).

Со временем каверна углубляется, высота неровностей нижней кромки подрастает (рис. 8г). В сглаженных выступах зубцов оседающего и расплывающегося венца просматриваются отдельные волокна и капельки, окрашенные пигментом жидкости ядра первичной капли.

Внимательное рассмотрение плотно окрашенной стенки каверны позволяет рассмотреть системы окрашенных полос, образующих линейчатые и кольцевые структуры (рис. 8г–е). Отмеченные особенности картины течения сохраняются вплоть до $t \sim 30$ мс. Затем регулярная структура начинает активно размываться как под влиянием молекулярной вязкости и диффузии, так и под действием капиллярных и инерционных сил, активно деформирующих каверну с последующим формированием всплеска.

Сравнение картин и течений показывает, что линейчатый рисунок на рис. 5 создается объемными волокнами. Нижние кромки волокон заметно нарушает гладкость контактной поверхности раствор пигмента ядра капли – масляная пленка оболочки, которая в этих опытах – прозрачная (см. рис. 8).

3.4. Эволюция картины течения при меньшей контактной скорости капли

Общая структура картины течения сохраняется при уменьшении контактной скорости составной капли, сливающейся в импактном режиме, когда каверна образуется с момента первичного контакта [29, 30]. Иллюстрирующие выборки из видеofilма приведены на рис. 9.

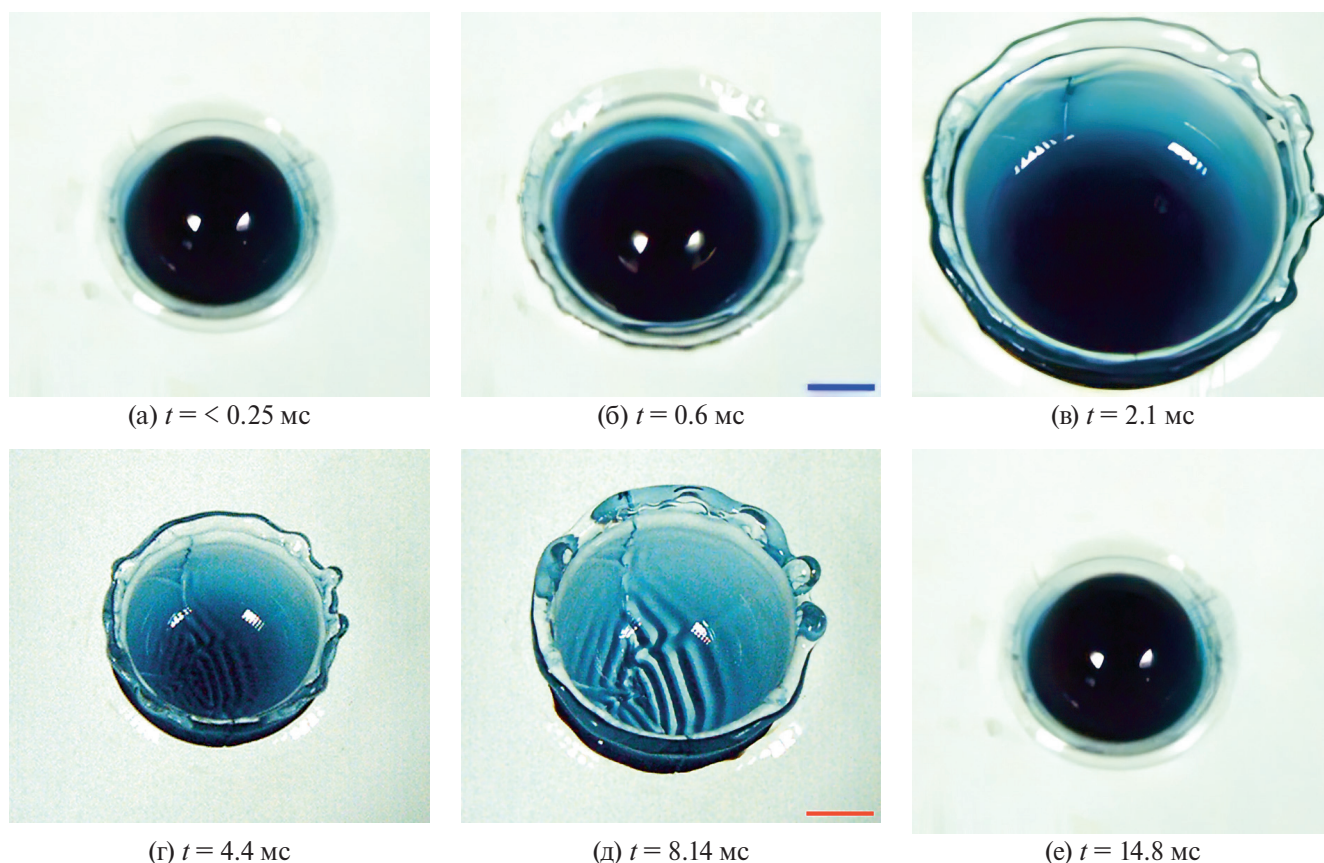


Рис. 9. Распределение пигмента ядра капли в начальной стадии формирования каверны. Длина синего маркера – 2 мм; длина красного маркера – 4 мм ($H = 44$ см, $U = 240$ см/с, $D_n = 3.9$ мм, $D_s = 5$ мм, $M_n = 31.06 \times 10^{-6}$ кг, $M_s = 31.30 \times 10^{-6}$ кг, $M = M_n + M_s = 62.36 \times 10^{-6}$ кг, $Re = 200$, $Fr = 117$, $We = 800$, $Bo = 6.8$, $Oh = 0.14$, $En_{k,d} = 254.79$ мкДж, $En_{\sigma,d}^{n,s} = 1.12$ мкДж, $En_{\sigma,d}^{s,a} = 2.59$ мкДж, $R_E = 48.41$, $R_{E\sigma} = 0.43$).

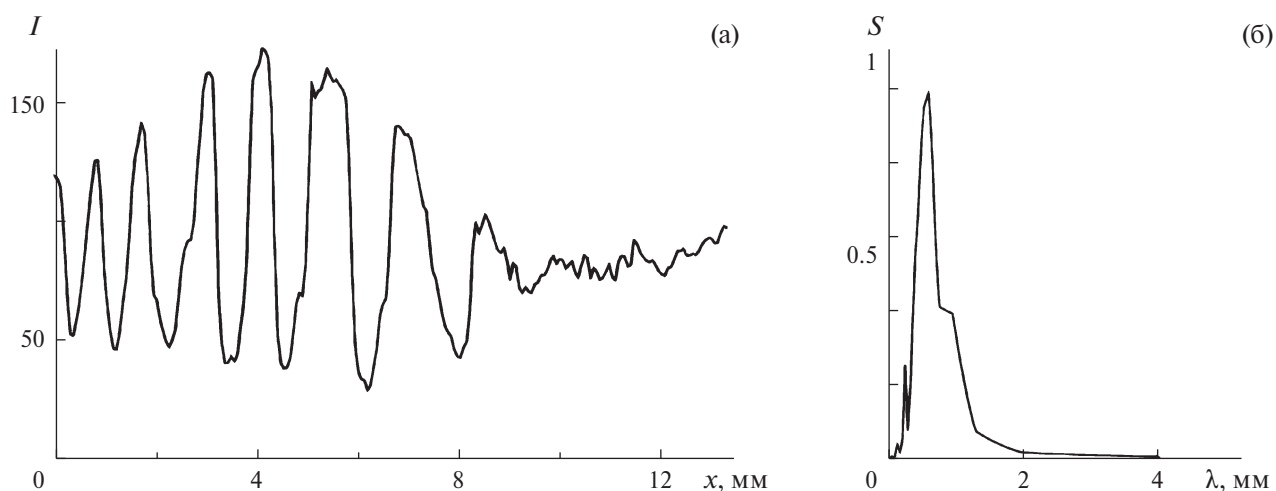


Рис 10. Структура полосчатого течения по данным рис. 9е: фигуры а, б – распределение относительной освещенности I , нормированной на максимальное значение, вдоль центральной нормали к полосам в правом нижнем квадранте и его пространственный спектр S .

В данном опыте капля падала с высоты $H = 30$ см и достигала контактной скорости $U = 240$ см/с. Пигментированное ядро $D_n = 3.9$ мм располагалось практически в центре масляной оболочки диаметром $D_s = 5$ мм, что подтверждается симметрией начальной картины слияния $t < 0.25$ мс, в которой можно выделить только небольшой “язык” в нижней части течения.

Кольцевая пелена с гладкой кромкой продолжает венец, верхняя кромка которого представлена синим кольцом на рис. 9б. Светло синему кольцу внутри него соответствует вертикальная стенка венца, которая переходит в более ярко окрашенную стенку каверны. Дно каверны закрывает остаток ядра капли диаметром $d = 5.69$ мм. Симметрию несколько нарушает небольшая плоская струйка – “язык” шириной $d_{\perp} = 3.42$ мм в направлении на 5 ч (рис. 9б). По условиям съемки этот дефект виньетируется стенкой каверны и далее не наблюдается.

В ходе дальнейшей эволюции течения растет глубина каверны и высота окрашенной стенки, при этом теряется контраст границы с жидкостью на дне каверны. На боковой поверхности в направлении на 11 ч появляется новый дефект – “смятие” кромки окрашенной стенки, в центре которого располагается более темная “двойная складка”, доходящая до окрашенного остатка капли на дне каверны (рис. 9в).

Постепенно контрастность “складки” увеличивается, длина растет и при $t = 4.4$ мс (рис. 9г) она принимает вид тонкой струйки, переносящей дополнительный пигмент на кромку венца и в пелену. Одновременно струйка служит направляющей положения полос формирующейся структуры, в которой начинают проявляться линейные и тонкие кольцевые элементы (рис. 9г). Распределение окрашенных нитей в зубцах на правой части венца указывает, что их формирование также обусловлено подтеканием струек из области слияния капли с принимающей жидкостью, где происходило уничтожение свободной поверхности и освобождалась ДППЭ, переходящая в другие формы.

Вертикальная струйка распадается на отдельные элементы на растущей каверне к моменту $t = 8.14$ мс, к вершинам которых подходят новые аксиальные складки. Одновременно в структуре течения появляются две новые струйки – выраженная в направлении на 8 ч и малоконтрастная – на 3 ч. Полосы отчетливо выражены на дне каверны и более слабо – на ее стенках (рис. 9д).

Отдельные тонкие окрашенные волокна появляются на сглаженной кромке венца при $t = 14.9$ мс. Контрастность полос в центре каверны увеличивается, прозрачные просветы становятся шире, а пигментированные волокна – тоньше. На правой стенке проявляется последовательность аксиальных полос (рис. 9е). Максимальный диаметр каверны при $t = 14.86$ мс составляет $D_c = 16.5$ мм. Ширина четырех наиболее контрастных окрашенных полос в правом нижнем квадранте составляет слева направо, мм: $\Delta l_{\perp} = 0.59, 0.62, 0.73, 0.63$.

Сравнение картин течений, приведенных на рис. 5, 8, 9, показывает, что полосчатые структуры в следе сливающейся составной кадры в импактном режиме образуются в обоих опытах. Сохраняется и характерное время развития структуры $8 < \Delta t < 15$ мс.

Из сравнения выборок, представленных на рис. 5 и 9, следует: решетка наблюдается во всем диапазоне параметров, соответствующих импактному режиму растекания капли. С уменьшением контактной скорости и кинетической энергии капли, соответственно, геометрия структуры в начале формирования каверны становится более осесимметричной. Однако площадь покрытия дна каверны высококонтрастными полосами при этом уменьшается.

Фотометрирование позволяет идентифицировать и контрастные полосы в центральной части структуры, в которой наблюдается практически полное отсутствие пигмента между окрашенными полосками, и в правой части на стенке каверны, где полосы могут быть “угаданы” на изображении (рис. 10).

Максимум величины S на спектре (рис. 10б) достигается при $\lambda_s = 0.7$ мм. Слева от максимума на графике виден локальный пик, соответствующий $\lambda_s = 0.24$ мм. Так как просветление изображения с его последующим масштабированием (аналогично рис. 6б) не позволяет надежно идентифицировать наличие волокон в пределах одной полосы, то данный пик может свидетельствовать о наличии тонкой структуры с характерным шагом 0.24 мм.

3.5. Растекание капли со смещенным ядром

В некоторых опытах ядро достаточно правильной формы оказывается смещенным относительно геометрического центра оболочки, что можно видеть на схеме и фотографии на рис. 1, 2. Выборки из видеопленки, иллюстрирующие распределение вещества ядра диаметром $D_n = 2.7$ мм разбавленного раствора чернил в капле внешним диаметром $D_s = 3.3$ мм, соприкасающейся с поверхностью воды в кювете со скоростью $U = 300$ см/с, приведены на рис. 11.

В формирующейся каверне вещества ядра и оболочки разделяются. В левой части каверны образуется толстый масляный слой с вкраплениями чернил на внешней и внутренней оболочках, в правой — толстый слой чернил, отделенный от принимающей жидкости масляной пленкой, на что указывает шероховатость нижней кромки на рис. 11б.

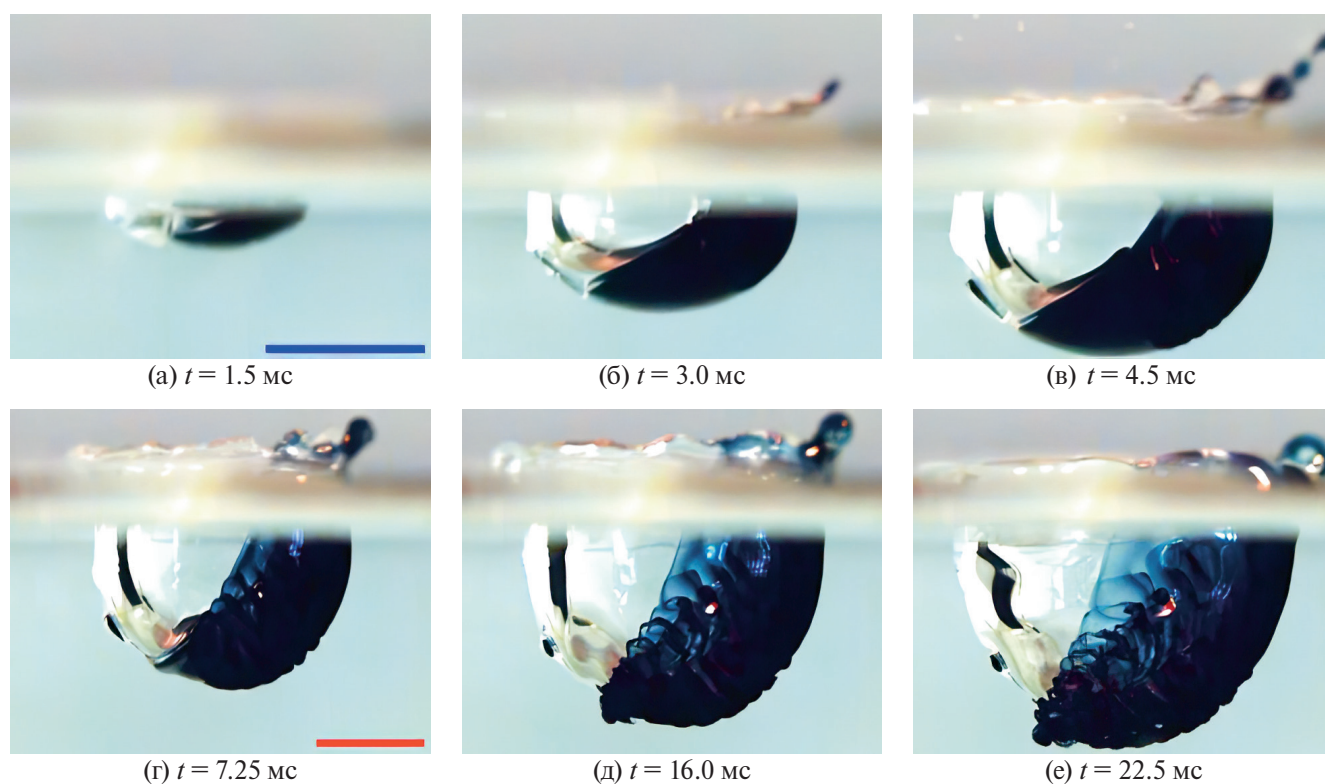


Рис. 11. Эволюция картины распределения вещества составной чернильно-масляной капли в боковой проекции. Длины маркеров – 5 мм ($H = 50$ см, $U = 300$ см/с, $D_n = 2.7$ мм, $D_s = 3.3$ мм, $M_n = 10.31 \times 10^{-6}$ кг, $M_s = 7.74 \times 10^{-6}$ кг, $M = M_n + M_s = 18.05 \times 10^{-6}$ кг, $Re = 165$, $Fr = 278$, $We = 825$, $Bo = 2.97$, $Oh = 0.174$, $En_{k,d} = 81.23$ мкДж, $En_{\sigma,d}^{a,s} = 0.54$ мкДж, $En_{\sigma,d}^{s,a} = 1.13$ мкДж, $R_E = 48.64$, $R_{E\sigma} = 0.48$).

По мере роста каверны картина распределения пигмента становится более сложной. Приповерхностные пигментированные глобулы истончаются, в центре каверны на границе с окрашенным слоем просматривается капля пигментированной жидкости в слое масла (рис. 11г). С вершин шипов на кромке венца выбрасываются отдельные довольно крупные капельки, справа включающие жидкость ядра в масляной оболочке, в центре – масляные.

Внешняя граница окрашенного слоя справа теряет гладкость, на ней появляются отдельные гладкие выступы (рис. 11д). Расщепляется и внутренняя граница. Окрашенная жидкость в масляном слое начинает стягиваться в компактный объем. На кромке венца появляются новые шипы, с вершин которых вылетают новые водно-масляные брызги.

Постепенно размеры окрашенных частей полосчатых структур уменьшаются, плотность окраски возрастает – пигментированная жидкость стягивается в более компактные объемы. Размеры выступов на внешней границе окрашенного слоя справа увеличиваются, появляются выступы и на внутренней границе (рис. 11е). Просветление изображения выделяет сложную и регулярную внутреннюю структуру распределения пигментированной жидкости, в которой выражены яркие петли, оконтуривающие области более слабо окрашенной жидкости (рис. 11д–е).

На заключительном кадре при $t = 22.5$ мс тонкие волокна просматриваются внутри светлых пятен во всей окрашенной области течения. Ступенька в распределении пигмента у дна каверны, возможно, является свидетельством того, что пигментированная жидкость продавилась через дно и сформировала промежуточный слой. Эффект перколяции при формировании первичной каверны ранее был замечен при слиянии однородной капли смешивающейся жидкости [33].

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Схема эволюции картины течения при слиянии составной оболочечной водно-масляной капли с водой приведена на рис. 12. В иллюстративных целях капля с каверной показаны в разрезе в идеализированном виде – с центральной симметрией, круглыми ядром и оболочкой. Центры ядра и оболочки считаются совпадающими (рис. 12а). Вещество ядра считается смешивающимся с принимающей жидкостью, а оболочки – несмешивающимся.

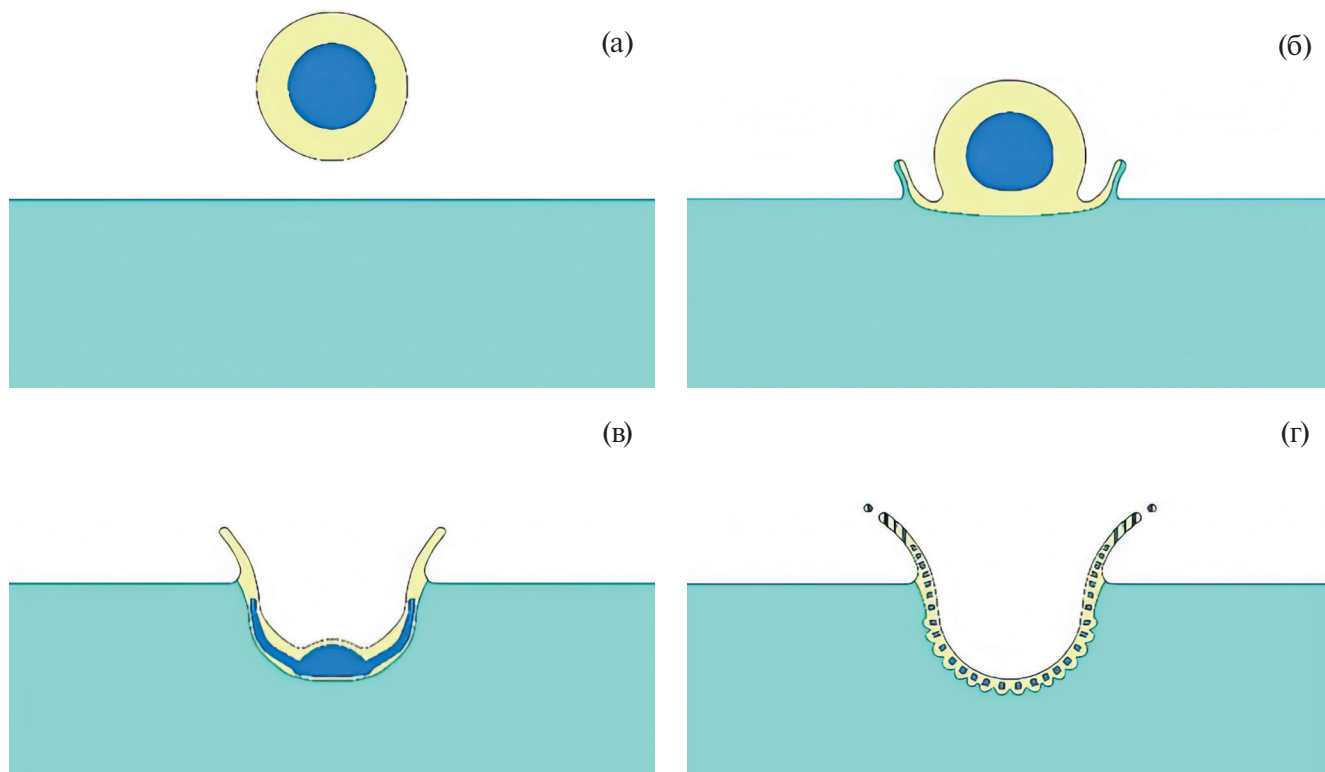


Рис. 12. Схема слияния составной капли.

В импактном режиме деформация поверхности начинается с момента первичного контакта. Дно образующейся каверны, по которому быстро растекается формирующая венец жидкость, оказывается сравнительно плоским [33]. Вначале растекается жидкость оболочки, образующая масляное покрытие каверны и венца (рис. 12б). Затем образуется “сэндвич” – начинает растекаться ядро из смешивающейся жидкости, покрытое снизу и сверху масляной пленкой (рис. 12в).

Постепенно на стенке каверны возникают тонкие неоднородности. Последние преобразуются в тонкие струйки, которые достигают кромки венца и формируют зубцы. С выступающих на вершинах некоторых зубцов окончаний струек (шипов) вылетают капли, содержащие масло, воду и пигментированный раствор ядра капли. Сложная картина течений, индуцированных в масляной пленке градиентами коэффициента поверхностного натяжения и толщины, разбивает окрашенный слой на отдельные волокна (рис. 12г). Дно каверны приобретает “бугристый” вид с выступами под окрашенными волокнами и заостренными впадинами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развита методика и доработана установка ТСТ УИУ “ГФК ИПМех РАН” для изучения картины слияния составных капель, состоящих из сферических слоев несмешивающихся жидкостей, с водой в принимающей кювете. Проведена регистрация картины слияния составной капли, центральное ядро которой – разбавленный в пропорции 1:20 водный раствор синих ализариновых чернил, оболочка – рафинированное подсолнечное масло, в импактном режиме, когда кинетическая энергия капли превышает доступную потенциальную поверхностную энергию. Рассмотрен начальный этап формирования каверны и венца.

Впервые прослежена эволюция картины течения и визуализирован распад прослойки пигментированной жидкости ядра капли на отдельные волокна, образующие выраженные линейчатые структуры. Отмечено влияние лигаментов – тонких струек, текущих от области слияния жидкостей к кромке венца, на геометрию течения.

Симметрия течения существенно зависит от положения ядра относительно внешнего контура падающей капли.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Эксперименты проведены на стенде ТБП УИУ “ГФК ИПМех РАН”. 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>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Thomson J.J., Newall H.F. On the formation of vortex rings by drops falling into liquids, and some allied phenomena // Proc. R. Soc. London. 1885. V. 29. P. 417–436.
2. Worthington A. The splash of the drop. Series "The romance of science". E. & J.B. Young & Co: New York, USA. 1895. 92 p.
3. Blanken N., Saleem M.S., Thoraval M.-J., Antonini C. Impact of compound drops: a perspective // Curr. Opin. Colloid Interface. 2020. V. 51. P. 101389. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2020.09.002>
4. Agbaglah G., Thoraval M.-J., Thoroddsen S., Zhang L., Fezzaa K., Deegan R. Drop impact into a deep pool: vortex shedding and jet formation // J. Fluid Mech. 2015. V. 764. P. R1–12. <https://doi.org/10.1017/jfm.2014.723>
5. Thoroddsen S.T., Etoh T.G., Takehara K. High-Speed Imaging of Drops and Bubbles // Ann. Rev. Fluid Mech. 2008. V. 40. № 1. P. 257–285. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.40.111406.102215>
6. Lohse D. Fundamental fluid dynamics challenges in inkjet printing // Ann. Rev. Fluid Mech. 2022. V. 54. P. 349–382. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-022321-114001>
7. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука. 1986. 736 с.
8. Müller P. The equations of oceanic motions. CUP: Cambridge, UK. 2006. 302 p.
9. Chashechkin Y.D. Foundations of engineering mathematics applied for fluid flows // Axioms. 2021. V. 10. № 4. P. 286. <https://doi.org/10.3390/axioms10040286>.
10. Gibbs J.W. Elementary principles in statistical mechanics. Scribner's and sons: New York, USA. 1902. 207 p.
11. Feistel R. Thermodynamic properties of seawater, ice and humid air: TEOS-10, before and beyond // Ocean. Sci. 2018. V. 14. P. 471–502. <https://doi.org/10.5194/os-14-471-2018>
12. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика. М.: ГИФМЛ. 1958. 206 с.

13. *Brackbill J.U., Kothe D.B., Zemach C.* A continuum method for modelling surface tension // *J. Comput. Phys.* 1992. V. 100. № 2. P. 335–354. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(92\)90240-y](https://doi.org/10.1016/0021-9991(92)90240-y)
14. *Bisighini A., Cossali G. E., Tropea C., Roisman I.V.* Crater evolution after the impact of a drop onto a semi-infinite liquid target // *Phys. Rev.* 2010. E 82(3, Pt.2). P. 036319. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.82.036319>
15. *Popinet S.* Numerical models of surface tension // *Ann. Rev. Fluid Mech.* 2018. V. 50. P. 49–75. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-122316-045034>
16. *Castrejón-Pita A.A., Castrejón-Pita J.R., Hutchings I.M.* Experimental observation of von Kármán vortices during drop impact // *Phys. Rev.* 2012. V. 86. № 4. P. 045301. <https://doi.org/10.1103/physreve.86.045301>
17. *Das S.K., Dalal A., Breuer M., Biswas G.* Evolution of jets during drop impact on a deep liquid pool // *Phys. Fluids.* 2022. V. 34. P. 022110. <https://doi.org/10.1063/5.0081064>
18. *Rein M.* Phenomena of liquid drop impact on solid and liquid surfaces // *Fluid Dyn. Res.* 1993. V. 12. № 2. P. 61–93. [https://doi.org/10.1016/0169-5983\(93\)90106-k](https://doi.org/10.1016/0169-5983(93)90106-k)
19. *Wang L., Thoraval M.-J.* Air-in-liquid compound drop impact onto a pool // *Phys. Fluids.* 2022. V. 34. P. 102101. <https://doi.org/10.1063/5.0086745>
20. *Sapei L., Naqvi M.A., Rousseau D.* Stability and release properties of double emulsions for food applications // *Food Hydrocolloids.* 2012. V. 27. № 2. P. 316–323. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.10.008>
21. *Johnson R.E., Sadhal S.S.* Fluid mechanics of compound multiphase drops and bubbles // *Ann. Rev. Fluid Mech.* 1985. V. 17. № 1. P. 289–320. <https://doi.org/10.1146/annurev.fl.17.010185.001445>
22. *Kolesky D.B., Truby R.L., Gladman A.S., Busbee T.A., Homan K.A., Lewis J.A.* 3D bioprinting of vascularized, heterogeneous cell-laden tissue constructs // *Adv. Mater.* 2014. V. 26. P. 3124–3130. <https://doi.org/10.1002/adma.201305506>
23. *Kan H.C., Udaykumar H.S., Shyy W., Tran-Son-Tay R.* Hydrodynamics of a compound drop with application to leukocyte modeling // *Phys. Fluids.* 1998. V. 10. № 4. P. 760–774. <https://doi.org/10.1063/1.869601>
24. *Kim D., Lee J., Bose A., Kim I., Lee J.* The impact of an oil droplet on an oil layer on water // *J. Fluid Mech.* 2020. V. 906. A5. <https://doi.org/10.1017/jfm.2020.791>
25. *Эйзенберг Д., Кауцман В.* Структура и свойства воды. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 280 с.
26. *Чашечкин Ю.Д.* Пакеты капиллярных и акустических волн импакта капли // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки.* 2021. Т. 1. № 94. С. 73–92. <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2021-1-73-92>
27. *Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю.* Задержка формирования каверны в интрузивном режиме слияния свободно падающей капли с принимающей жидкостью // *Доклады РАН.* 2021. Т. 496. С. 34–39. <https://doi.org/10.31857/S268674002101003X>
28. *Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю.* Распределение вещества капли в принимающей жидкости в интрузивном режиме слияния // *Физико-химическая кинетика в газовой динамике.* 2022. Т. 23. № 6. <http://chemphys.edu.ru/issues/2022-23-6/articles/1023>
29. *Chashechkin Yu.D., Pliynkh A.Y.* Intrusive and impact modes of a falling drop coalescence with a target fluid at rest // *Axioms.* 2023. V. 12. № 4. P. 374. <https://doi.org/10.3390/axioms12040374>
30. *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. Т. 24. № 2. <http://doi.org/10.33257/PhChGD.24.2.1043>
31. *Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю.* Распад капли на отдельные волокна на границе области контакта с принимающей жидкостью // *Доклады РАН.* 2021. Т. 497. С. 31–35. <https://doi.org/10.31857/S2686740021020139>
32. *Ersoy N.E., Eslamian M.* Capillary surface wave formation and mixing of miscible liquids during droplet impact onto a liquid film // *Phys. Fluids.* 2019. V. 31. P. 012107. <https://doi.org/10.1063/1.5064640>
33. *Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю.* Перенос вещества капли в толщу принимающей жидкости в начальной стадии процесса слияния // *Изв. РАН. МЖГ.* 2023. № 1. С. 54–68. <https://doi.org/10.31857/S056852812260031X>
34. *Kuhlman J.M., Hillen N.L.* Droplet impact cavity film thickness measurements versus time after drop impact and cavity radius for thin static residual liquid layer thicknesses // *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2016. V. 77. P. 246–256. <https://doi.org/10.1016/j.exptthermfluidsci.2016.04.020>
35. *Чашечкин Ю.Д.* Визуализация тонкой структуры возмущений поверхности жидкости течениями, вызванными упавшей каплей // *ПММ.* 2019. Т. 83. № 3. С. 403–412. <https://doi.org/10.1134/S0032823519030032>
36. *Чашечкин Ю.Д.* Эволюция тонкоструктурного распределение вещества свободно падающей капли в смешивающихся жидкостях // *Известия РАН. ФАО.* 2019. Т. 55. № 3. С. 67–77. <https://doi.org/10.1134/S0001433819020026>
37. *Fujimatsu T., Fujita H., Hirota M., Okada O.* Interfacial deformation between an impacting water drop and a silicone-oil surface // *Colloid and Interface Sci.* 2003. V. 264. № 1. P. 212–220. [https://doi.org/10.1016/s0021-9797\(03\)00402-8](https://doi.org/10.1016/s0021-9797(03)00402-8)
38. *Ильиных А.Ю., Чашечкин Ю.Д.* Гидродинамика погружающейся капли: несмешивающиеся жидкости // *Изв. РАН. МЖГ.* 2020. Т. 55. № 2. С. 19–27. <https://doi.org/10.31857/S056852812002005X>

39. *Minami F., Hasegawa K.* Cavity and jet formation after immiscible droplet impact into deep water pool // *Phys. Fluids*. 2022. V. 34. P. 033315. <https://doi.org/10.1063/5.0084456>
40. *Zhang Q., Xu M., Liu X., Zhao W., Zong C., Yu Y., Wang Q., Gai H.* Fabrication of Janus droplets by evaporation driven liquid-liquid phase separation // *Chem. Commun.* 2016. V. 52. № 28. P. 5015–5018. <https://doi.org/10.1039/C6CC00249H>
41. *Чашечкин Ю.Д., Якуш С.Е., Ильиных А.Ю.* Группы брызг импакта капли воды, свободно падающей в расплавленный металл // Доклады РАН. 2021. Т. 498. С. 22–26. <https://doi.org/10.31857/S268674002103007X>
42. *Hsieh W.-D., Lin S.-Y., Chen R.-H., Lin T.-H.* Burning behavior of gas-in-oil compound drops // *Combust. Sci. Technol.* 2010. V. 183. P. 51. <https://doi.org/10.1080/00102202.2010.497517>
43. *Ширяев А.А.* О собственных частотах осцилляций поверхности свободнопадающей составной капли идеальной жидкости. // Известия РАН. МЖГ. 2020. Т. 3. С. 3–11. <https://doi.org/10.31857/S0568528120020127>
44. *Boruah M.P., Randive P.R., Pati S., Suman Chakraborty S.* Morphodynamic evolution due to inertia-mediated impact of a compound drop on a deep liquid pool // *Phys. Fluids*. 2022. V. 34. P. 032106. <https://doi.org/10.1063/5.0085814>
45. *Sarker A., Boruah P.M., Randive P.R., Pati S.* The role of compound droplet size on transition from jetting to bubble entrapment during its impact on liquid // *Phys. Fluids*. 2021. V. 33. P. 102103. <https://doi.org/10.1063/5.0064564>
46. *Tryggvason G., Scardovelli R., Zaleski S.* Direct numerical simulations of gas-liquid multiphase flows. CUP: Cambridge, UK. 2011. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511975264>
47. *Zhang H., Wang F., Nestler B.* Janus droplet formation via thermally induced phase separation: a numerical model with diffusion and convection // *Langmuir*. 2022. V. 38. P. 6882–6895. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.2c00308>
48. *Mengqi L., Dongqing L.* Janus droplets and droplets with multiple heterogeneous surface strips generated with nanoparticles under applied electric field // *J. Phys. Chem. C*. 2018. V. 122. P. 8461–8472. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.8b01920>
49. *Malenkov G., Naberukhin Y., Voloshin V.* Collective effects in diffusional motion of water molecules: computer simulation // *Struct. Chem.* 2011. V. 22. P. 459–463. <https://doi.org/10.1007/s11224-011-9766-3>
50. *Karakashev S.I., Grozev N.A.* The law of parsimony and the negative charge of the bubbles // *Coatings*. 2020. V. 10. P. 1003. <https://doi.org/10.3390/coatings10101003>
51. *Чашечкин Ю.Д., Прохоров В.Е., Андросенко В.Н.* Моделирование влияния электрического поля на капельные течения // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2023. Т. 24. № 4. <http://chemphys.edu.ru/issues/2023-24-4/articles/1057>
52. 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. <http://www.ipmnet.ru/uniquequip/gfk/#equip>
53. *Fisher L.R., Mitchell E.E., Parker N.S.* Interfacial tensions of commercial vegetable oils with water // *Food Sci.* 1985. V. 50. № 4. P. 1201–1202. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1985.tb13052.x>

THE INITIAL STAGE OF THE COALESCENCE OF A COMPOUND DROP IN AN IMPACT REGIME

Yu. D. Chashechkin^{a,*}, A. Yu. Il'nykh^{a,**}, and Sh. Kh. Khairbekov^{a,***}

^a*Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics, Moscow, 119526 Russia*

* E-mail: chakin@ipmnet.ru

** E-mail: ilynykh@ipmnet.ru

*** E-mail: msturistt09@gmail.com

The evolution of the regular fine structure of the colored matter distribution produced, when a freely falling multifluid drop spreads in deep water, is for the first time traced using the techniques of engineering photo and video recording. The flow pattern is studied in the initial stage of the formation of a cavity and a crown during the coalescence of a compound drop, whose core is a drop of alizarin ink solution coated with an oil shell. The distributions of the colored fluid at the cavity bottom and the crown walls include streaky structures, whose formation can be due to the processes of the available potential surface energy (APSE) conversion occurring when the contact surfaces of the merging fluids are eliminated. In the experiments the height of the falling drop was varied. The core position in the compound drop was not checked but was determined by separation conditions. The ink core disintegration into fibers was observable in all the experiments. The areas of the cavity and crown surfaces covered by the colored fluid reached maximum at the central position of the core.

Keywords: compound drops, experiments, cavity, crown, fiber structures