

Fine Structure of the Compound Drop Substance, Distribution in the Target Fluid under the Splash Formation Mode

Yu. D. Chashechkin, A. Yu. Ilinykh, S. K. Khairbekov

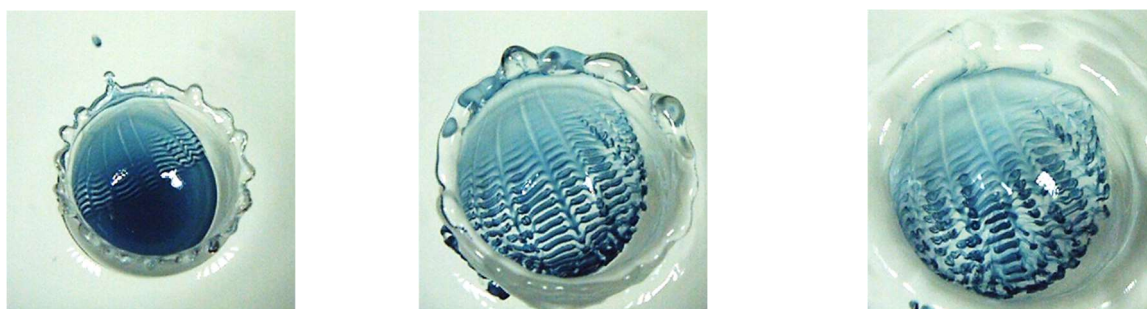
*Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics, Russian Academy of Sciences (IPMech RAS),
Moscow, 119526, Russia*

yulidch@gmail.com, ilynykh@ipmnet.ru, msturistt09@gmail.com

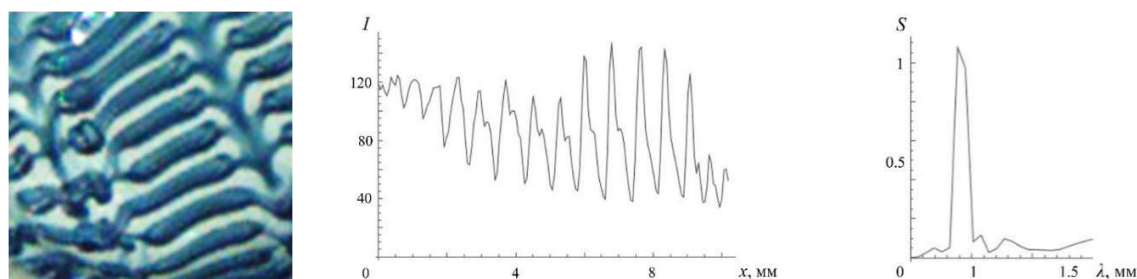
Abstract

The evolution of the regular fine structure of the distribution pattern of a colored substance during the spreading of a freely falling compound drop in deep water was traced for the first time using technical photo and video recording methods. The flow pattern was studied at the initial stage of the formation of the cavity and crown during the merging of a compound drop, the core of which, a drop of alizarin ink solution, was covered with an oil shell. Banded structures were observed in the distribution of the colored liquid at the bottom of the cavern and the walls of the crown. The formation of banded elements of the flow pattern is associated with the influence of the processes of conversion of available potential surface energy (APSE) during the destruction of the contact surfaces of merging liquids. The position of the nucleus in the drop was not controlled and was determined by the formation conditions. The breakdown of the ink core into fibers was observed in all experiments in this series. The area of coverage of the surface of the cavity and the crown with the colored liquid reached a maximum at the central position of the core.

Keywords: compound drops, experiment, cavity, crown, fiber structures.



Developed fine structure observed in a compound drop impact experiments and its evolution



Enlarged view of flow fine structure (left). Illumination change graph (middle) and its spectrum (right)

УДК 532.5

Тонкая структура распределения вещества составной капли в принимающей жидкости в режиме формирования всплеска

Ю. Д. Чашечкин, А. Ю. Ильиных, Ш. Х. Хайирбеков

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН
Россия, Москва, 119526, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1
chakin@ipmnet.ru, ilynykh@ipmnet.ru, msturistt09@gmail.com*

Аннотация

Эволюция регулярной тонкой структуры картины распределения окрашенного вещества при растекании свободно падающей составной 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 полосчатых элементов картины течений связывается с влиянием процессов конверсии доступной потенциальной поверхностной энергии (ДППЭ) при уничтожении контактных поверхностей сливающихся жидкостей. Положение ядра в капле не контролировалось и определялось условиями формирования. Распад чернильного ядра на волокна наблюдался во всех опытах данной серии. Площадь покрытия поверхности каверны и венца окрашенной жидкостью достигала максимума при центральном положении ядра.

Ключевые слова: составные капли, эксперимент, каверна, венец, волокнистые структуры.

1. Введение

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], базирующихся на дифференциальных формах законов сохранения вещества, энергии и импульса – следствий аксиом однородности пространства и времени [12], так и при конститутивных подходах, включающих моделирование действия поверхностных эффектов массовыми силами [13–15].

Традиционно, начиная с [1, 2] проводится сравнительное изучение слияния падающих капель чистых смешивающихся жидкостей, как одинаковых (вода-вода [16]), так и однородных по составу капель других жидкостей – водных растворов минеральных солей, пигментов, ацетона и других веществ, смешивающихся с водой в любых пропорциях [17, 18]. В последние годы активно изучается 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 капли одной жидкости заключены в другой жидкости (капсулированные, инкапсулированные, оболочечные, ядерные, двух- и многослойные) и **составленные (composed)** (парные, дуальные, многоядерные, многочастичные). 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 опытами с каплями чистых или однородных жидкостей [3].

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

Динамика формирования компонентов течения – брызг, капиллярных волн, каверны, венца, всплеска, и распределения вещества капли зависит от многих 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). 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, $R_{En} = En_k / En_\sigma < 1$, капля плавно втекает в толщу жидкости, а каверна образуется с задержкой в несколько миллисекунд [27, 28].

В импактном режиме, при $R_{En} \gg 1$, 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 на контактной границе области слияния капли и 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 дном каверны формируется расслоенная область жидкости промежуточной плотности с собственным значением показателя преломления, позволяющим измерять толщину 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].

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]).

В двухкомпонентных составных каплях (компаунд, ядерных или оболочечных) с внешней средой контактирует только одно вещество [21], в составленных (дуальных, парных или янус-каплях в зарубежной литературе) – оба. На практике используются и двух-, и многослойные компаунд капли, составленные из нескольких веществ, а также покрытые тонкой жидкой или мягкой (полутвердой) оболочкой [3].

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, покрытием поверхности капель масла наночастицами и другими.

В основном в опытах изучается морфология картины течений – формы каверны, венца и пузырей в толще жидкости. Распределение вещества капли в принимающей жидкости 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.

2. Параметризация

В последние годы системы конститутивных уравнений, широко применявшихся 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 в бинарных составных каплях различного вида приведена на рис. 1.

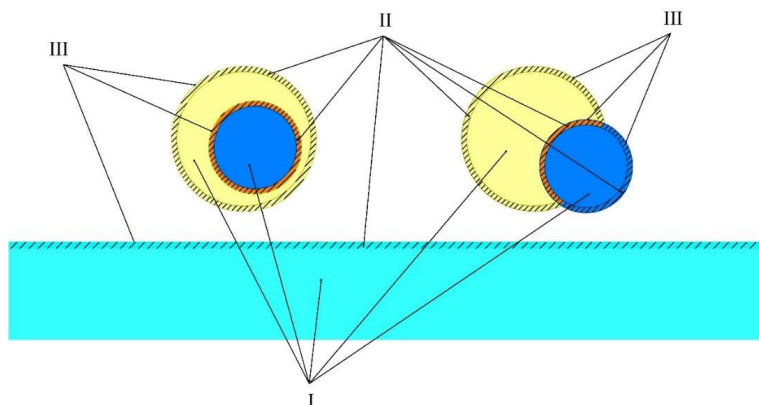


Рис. 1. Структура капельной жидкости (слева – оболочечная, справа – дуальная капля): I – III – толщина, приповерхностный и поверхностный слой

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

$$dG_{\sigma} = -sdT + VdP \quad (1)$$

В приповерхностном слое II толщиной порядка размера молекулярного кластера $\delta_{\sigma} \sim 10^{-6}$ структура жидкости более сложная (см. рис. 1). Энергия также зависит от площади свободной поверхности S_{σ} [8, 21]

$$dG_{\sigma} = -sdT + VdP - S_{\sigma}d\sigma \quad (2)$$

Здесь 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, кластраты, ассоциаты, войды [25]. Также наблюдается самоионизация некоторых сред, в частности, воды. 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).

$$dG_\sigma = -sdT + VdP - S_\sigma d\sigma + \mu_i S_i \quad (3)$$

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 $W_\sigma/W_k \sim V_d/V_\sigma \sim D/\delta_\sigma \sim 10^6$. При слиянии капли диаметром порядка $D \sim 1$ см, падающей со скоростью $U \sim 1$ м/с капля растекается 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].

В данных опытах исследовалась картина растекания оболочечной капли, включающей окрашенное ядро – капельку разбавленных ализариновых чернил – в масляной оболочке. 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 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 кинематических v_d^n, v_d^s, v_a, v_t и динамических вязкостей $\mu_d^n, \mu_d^s, \mu_a, \mu_t$; шесть полных $\sigma_{d,n}^s, \sigma_{d,n}^a, \sigma_{d,s}^a, \sigma_t^a, \sigma_t^{d,n}, \sigma_t^{d,s}$ 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 $En_{\sigma,d}^{n,s} = \sigma_d^{n,s} S_d^n$ и $En_{\sigma,d}^{s,a} = \sigma_d^{s,a} S_d^s$; коэффициенты диффузии вещества ядра и оболочки капли в принимающей жидкости $\kappa_t^{d,n}$, $\kappa_t^{d,s}$, 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 $\delta_\gamma^\nu = \nu^2/\gamma$. Группы линейных масштабов, зависящих от скорости капли U , включают масштабы Прандтля $\delta_U^\nu = \nu/U$ и капиллярные $\delta_U^\gamma = \gamma/U^2$ для каждой из сред.

Соответственно, одна часть временных масштабов задачи включает только параметры среды – $\tau_\gamma^\nu = \nu^3/\gamma^2$, $\tau_g^\gamma = \sqrt[4]{\gamma/g^3}$, другая – размер капли – $\tau_\gamma^D = \sqrt{D^3/\gamma}$, $\tau_\gamma^\nu = \nu D/\gamma$, третья – ее скорость – $\tau_U^D = D/U$, $\tau_g^U = U/g$. Отношения базовых масштабов длины и времени определяют набор характерных капиллярно-диссипативных и капиллярных скоростей задачи. 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 порядков $\delta_c \sim 10^{-6}$ см в процессах освобождения и накопления доступной потенциальной поверхностной энергии, до полного размера области течения.

Динамические параметры капли – импульс $p_d = MU$, кинетическая $En_{k,d} = MU^2/2$ и полная доступная потенциальная поверхностная энергия (ДППЭ) $En_{\sigma,d} = \sigma_d^{n,s} S_d^n + \sigma_d^{s,a} S_d^s$.

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 проведения 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 $R_W = \delta En_k/DEn_\sigma$. 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.

3. Экспериментальная установка

Опыты выполнены на доработанном стенде для изучения тонкой структуры быстропротекающих процессов (ТСТ), входящем в состав Уникальной исследовательской установки УИУ «ГФК ИПМех РАН» [37]. Фотографии и подробное описание стендов приведены в [28, 30]. Картины слияния составных капель регистрировалась высокоскоростной видеокамерой Optronis CR 300x2 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 производится 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.

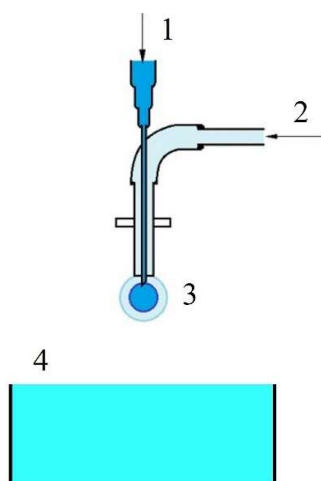


Рис. 2. Схема дозатора составных капель: 1, 2 – капилляры подачи жидкостей ядра и оболочки; 3 – растущая составная капля; 4 – кювета с принимающей жидкостью

Всего была проведена одна серия опытов с оболочечными каплями наружным диаметром $D_s = 5$ мм, свободно падающими с высоты $H = 44$ см. Ядро капли составляла капля ализариновых чернил, разбавленных в пропорции 1 : 20. Оболочка – рафинированное пищевое

подсолнечное масло (плотность масла $\rho_d^s = 0.91 \text{ г/см}^3$, коэффициент поверхностного натяжения на границе с воздухом $\sigma_o^a = 33 \text{ г/с}^2$, а на границе с водой $\sigma_w^o = 23.5 \text{ г/с}^2$). Значение коэффициента поверхностного натяжения определялось методом «подвешенной капли» (suspended drop). Значения коэффициента динамической вязкости для чернильного ядра $\mu_d^n = 0.01 \text{ г}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$, для масляной оболочки $\mu_d^s = 0.55 \text{ г}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$; значение коэффициента кинематической вязкости – $\nu_d^n = 0.01 \text{ см}^2\cdot\text{с}^{-1}$ и $\nu_d^s = 0.6 \text{ см}^2\cdot\text{с}^{-1}$, соответственно.

Положение ядра в каплях (рис. 3) строго не регулировалось и менялось от опыта к опыту. Полученные составные капли имели толщину масляного слоя в диапазоне $0.2 < \Delta l_s < 1.1 \text{ мм}$.

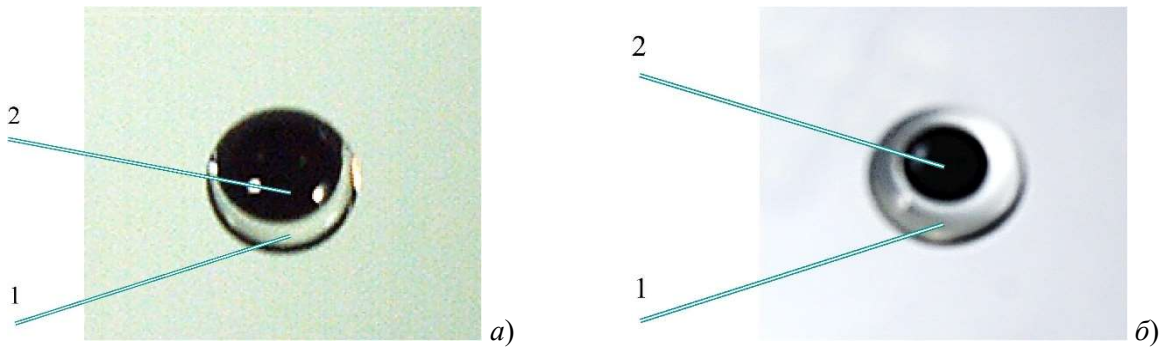


Рис. 3. Фотографии составных капель: а), б) – с сильно и относительно слабым эксцентриситетом; 1 – масляная оболочка; 2 – ядро

Контактная скорость капель лежала в интервале $2.9 < U < 3 \text{ м/с}$. Принимающая жидкость – частично дегазированная водопроводная вода, находилась в кювете $10 \times 10 \times 8 \text{ см}^3$. Характерные энергетические оценки компонентов течений указаны в табл. 1.

Таблица 1

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

$En_{\sigma,d}^{n,s}$, 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

Наблюдение свободной поверхности осуществлялось под углом $\vartheta = 70^\circ$ к горизонту. Длительность экспозиции составляла 200 мкс, скорость съемки – 4000 к/с.

4. 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. Постепенно границы разрываются и вещество капли стягивается в системы капелек различного размера в толще и на поверхности жидкости.

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

4.1. Начальный этап слияния составной капли

Фотографии составной капли с чернильным ядром, покрытым масляной оболочкой, непосредственно перед началом слияния приведена на рис. 4, а, отсчет времени ведется от момента первичного контакта. При первичном контакте 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. 4, б). Ближайшее к капле светлое кольцо визуализирует плоское дно каверны [27], следующее, более темное – наклонную стенку, следующее светлое – формирующийся венец, и внешнее темное – масляную пелену. Окрашенная жидкость ядра капли начинает растекаться в виде ориентированного на «11 часов» пигментированного языка, снизу и сверху покрытого масляной пленкой. Распределение пигмента в пелене неравномерное, прослеживается полосчатая периодическая структура.

Капля в момент первичного контакта все еще сохраняет округлую форму, ее диаметр составляет $D = 5$ мм; при этом диаметр первичной каверны составляет $d_c = 6.81$ мм. Ширина языка (хорда) составляет $d_{\perp} = 3.86$ мм; угол между медианой и вертикальной осью – $\varphi = 19.5^{\circ}$. При этом длина языка в начале процесса слияния при $t < 2$ мс импакта остается примерно постоянной и составляет $l_{\perp} = 1.72$ мм.

После окончания первичного контакта при $\Delta t > 2$ мс в картине слияния составной капли идентифицируются все традиционные компоненты течения, индуцированного импактом однородной капли – каверна, на стенках которой можно выделить капиллярные волны, венец, на кромке которого формируются короткие шипы (рис. 4, в). На вершинах шипов формируются капельки.

Наиболее полно сформированная капля, в которой тонкие волокна с веществом ядра погружены в материал масляной оболочки составной капли, образуется на вершине шипа, расположенного в центре языка.

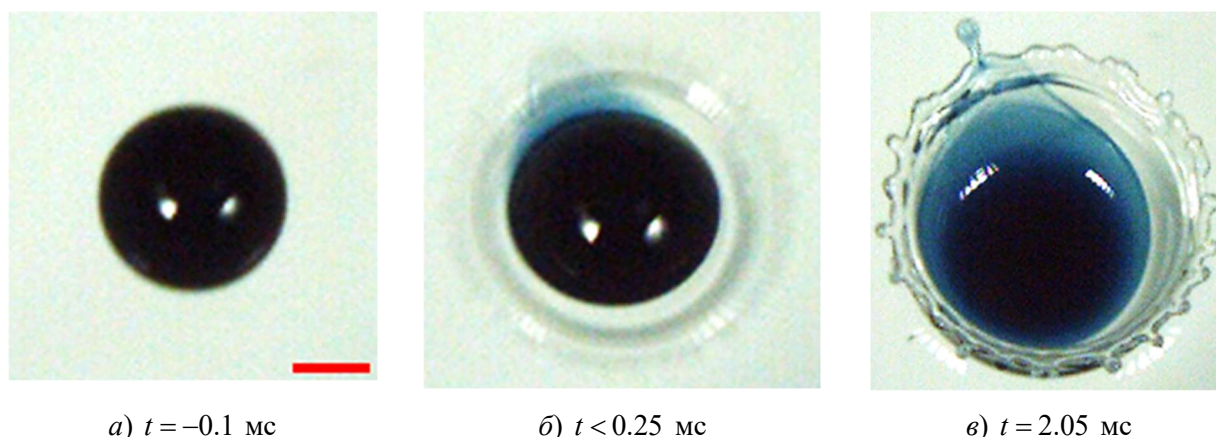


Рис. 4. Эволюция распределения вещества составной чернильно-масляной капли на начальном этапе импакта. Длина маркера – 2 мм ($H = 44$ см, $U = 290$ см/с, $D_n = 2.8$ мм, $D_s = 5$ мм, $M_n = 11.49 \times 10^{-6}$ кг, $M_s = 49.1 \times 10^{-6}$ кг, $M = M_n + M_s = 60.59 \times 10^{-6}$ кг, $Re = 242$, $Fr = 172$, $We = 1168$, $Bo = 6.8$, $Oh = 0.14$, $En_{k,d} = 254.79$ 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 отличие от растекания смешивающихся жидкостей в импактном режиме [28], здесь в первые $\Delta t = 2$ мс после контакта не наблюдается интенсивного образования лигаментов. По поверхности жидкости растекается масляный слой, и освобождающаяся при уничтожении

контактных поверхностей ДППЭ быстро рассеивается и не успевает перейти в кинетическую энергию течения: в соответствии с (2), ДППЭ конвертируется в осцилляции давления и температуры.

4.2. 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. 5, а) и удаляется со скоростью $u_s = 128$ см/с.

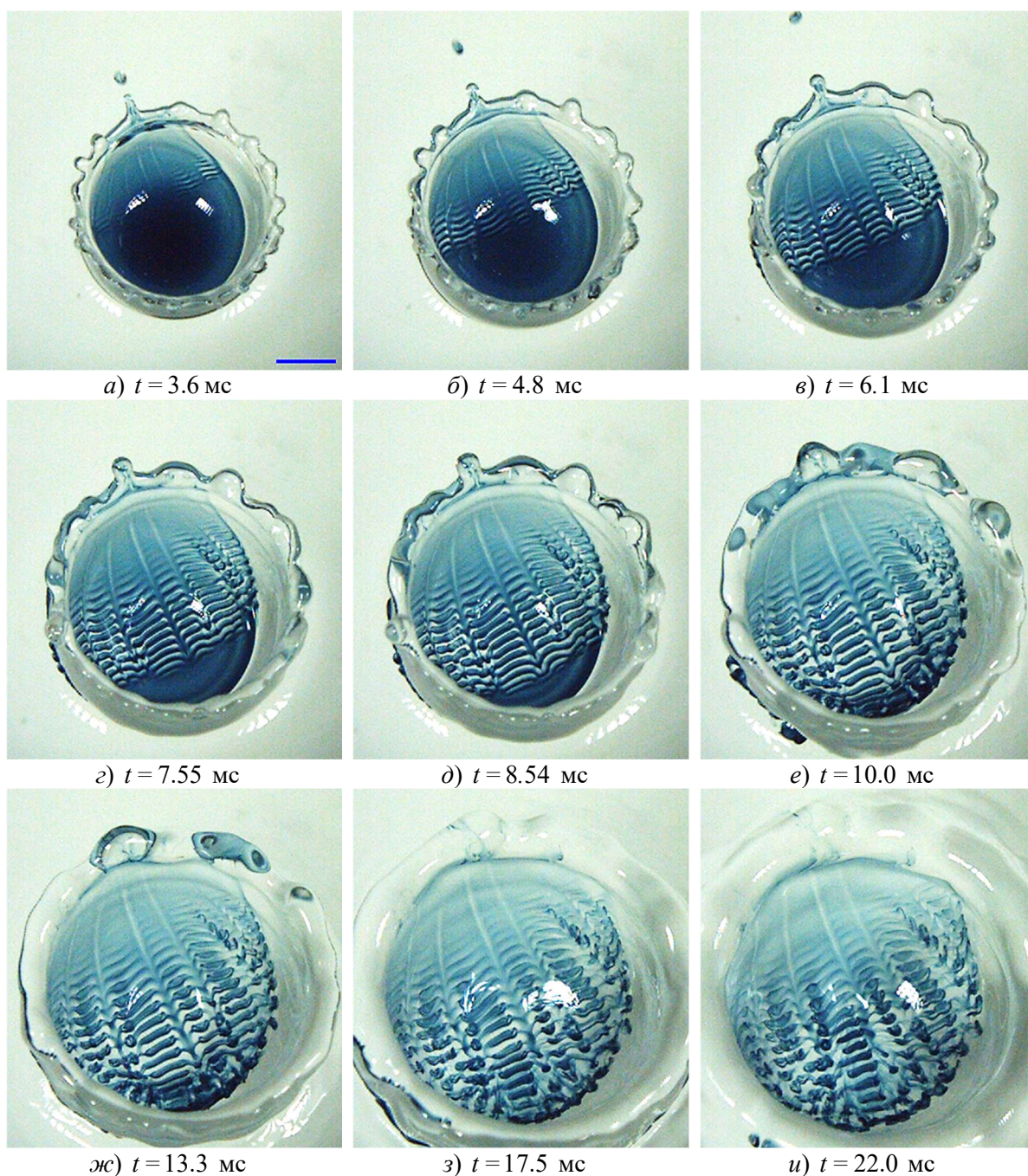


Рис. 5. Эволюция распределения вещества составной чернильно-масляной капли на этапе образования лигаментов. Длина маркера – 4 мм ($H = 44$ см, $U = 290$ см/с, $D_n = 2.8$ мм, $D_s = 5$ мм, $M_n = 11.49 \times 10^{-6}$ кг, $M_s = 49.1 \times 10^{-6}$ кг, $M = M_n + M_s = 60.59 \times 10^{-6}$ кг, $Re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

На выборке видеок кадров видно, что в процессе полета капля совершает свободные колебания, наложенные на вращательное движение, меняя при этом 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. 5, *а, б*). Граница области трансформации структуры языка продвигается равномерно. Ее максимальная скорость достигается в интервале $3 < t < 4$ мс и составляет $U_f = 1.33$ мм/с. Минимальная скорость $U_f = 1.12$ мм/с наблюдается при окончании процесса стягивания при $t \sim 10$ мс. Средняя скорость продвижения границы стягивающейся пленки составляет $U_f = 1.3$ мм/с. 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. 5, *в*). Образующиеся поперечные волокна «разрезаны» на части длиной $\delta_l = 0.26 \div 0.33$ мм, длина которых постепенно увеличивается по мере роста размеров каверны (рис. 5, *з, д*) и при $t = 10$ мс (рис. 5, *е*) 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. 5, *ж*). Наиболее быстро трансформация идет на периферии течения около вертикальных стенок каверны, где появляются двойные петли. Далее начинают распадаться две центральные полосы, причем правая эволюционирует быстрее, чем левая. Системы колечек появляются и на продольных линиях (рис. 5, *з*). 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 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. 5, *е* приведены на рис. 6 в увеличенном формате. Продольный размер последовательности валиков на главном диаметре (оранжевая выделенная область на рис. 6, *а*) $d_c = 13.50$ мм составляет $\Delta l_{||} = 0.58$ мм; 2.03 мм; 2.81 мм; 1.66 мм; 1.59 мм; 0.61 мм; 0.42 мм (отсчет от левой кромки).

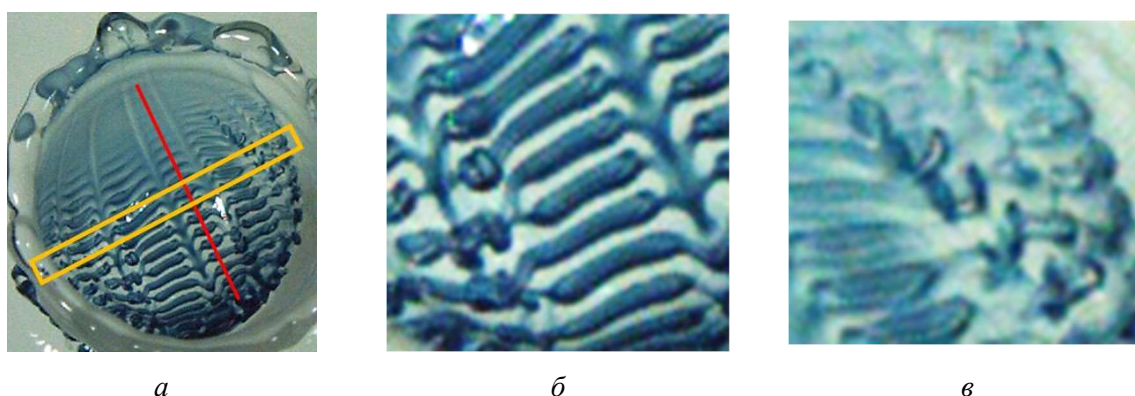


Рис. 6. Увеличенные изображения элементов картины течения на рис. 5, *е*: *а*) – центр области рассматривания, *б*) – чернильные валики слева от красной линии, *в*) – диффузные петельки справа

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. 7, *a*). Видно, что график на рис. 7, *a* 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.

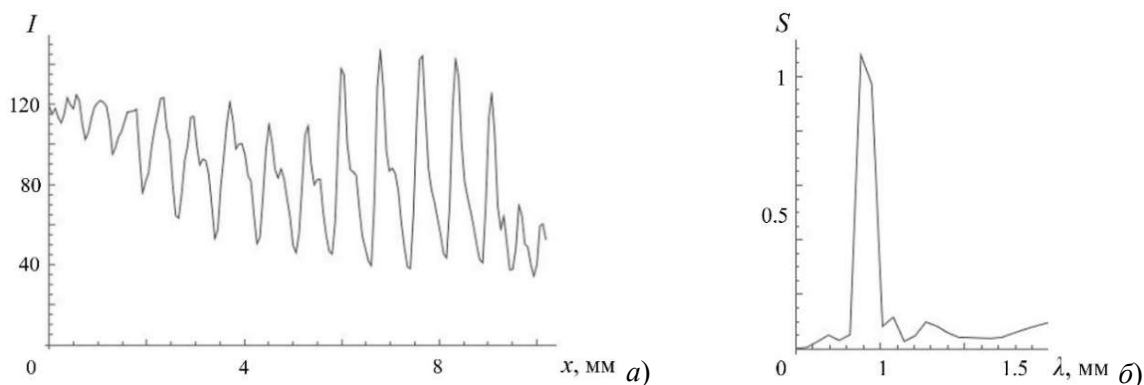


Рис. 7. Структура полосчатого течения по данным рис. 5: *a*, *б*) – распределение относительной освещенности I , нормированной на максимальное значение, вдоль продольной центральной линии и его пространственный спектр S

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

Средняя ширина впадин на рис. 7, *a* 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. 6, *a*.

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

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 в случае растекания однокомпонентной капли [36]. Сложный процесс дальнейшей эволюции течения при слиянии составной капли требует дополнительного изучения.

4. 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.

Благодарности и ссылки на гранты

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>).

Литература

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. Pp. 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 // *Current Opinion in Colloid & Interface Science*. 2020. V. 51. Pp. 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. of Fluid Mech*. 2015. V. 764. Pp. R1–12. DOI: 10.1017/jfm.2014.723
5. Thoroddsen S. T., Etoh T. G., Takehara K. High-Speed Imaging of Drops and Bubbles // *Ann. Rev. of Fluid Mech*. 2008. V. 40. No. 1. Pp. 257–285. doi:10.1146/annurev.fluid.40.111406.102215
6. Lohse D. Fundamental fluid dynamics challenges in inkjet printing // *Ann. Rev. Fluid Mech*. 2022. V. 54. Pp. 349. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-022321-114001>
7. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. Наука: М., 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. No. 4. Pp. 286. <https://doi.org/10.3390/axioms10040286>
10. Gibbs J.W. Elementary principles in statistical mechanics. Scribner's and sons: New York, US, 1902. 207 p.
11. Feistel R. Thermodynamic properties of seawater, ice and humid air: TEOS-10, before and beyond // *Ocean. Sci*. 2018. V. 14. Pp. 471–502.
12. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика. ГИФМЛ: М., 1958. 206 p.
13. Brackbill J.U., Kothe D.B., Zemach C. A continuum method for modelling surface tension // *J. Comput. Phys*. 1992. V. 100. No. 2. Pp. 335–354. doi: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), pp. 036319. DOI: 10.1103/PhysRevE.82.036319
15. Popinet S. Numerical models of surface tension // *Ann. Rev. Fluid Mech*. 2018. V. 50. Pp. 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. No. 4. Pp. 045301. doi: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. Pp. 022110. <https://doi.org/10.1063/5.0081064>

18. Rein M. Phenomena of liquid drop impact on solid and liquid surfaces // *Fluid Dyn. Research*. 1993. V. 12. No. 2. Pp. 61–93. doi: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. Pp. 102101. DOI: 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. No. 2. Pp. 316–323. DOI:10.1016/j.foodhyd.2011.10.008
21. Johnson R.E., Sadhal S.S. Fluid mechanics of compound multiphase drops and bubbles // *Ann. Rev. of Fluid Mech.* 1985. V. 17. No.1. Pp. 289–320. doi: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. Pp. 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. No. 4. Pp. 760–774. DOI: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. of Fluid Mech.* 2020. V. 906. DOI: <https://doi.org/10.1017/jfm.2020.791>
25. Эйзенберг Д., Кауцман В. Структура и свойства воды. Гидрометеиздат: Л. 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. 94. № 1. С. 73–92. DOI: <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. DOI: 10.31857/S268674002101003X
28. Чашечкин Ю. Д., Ильиных А. Ю. Распределение вещества капли в принимающей жидкости в интрузивном режиме слияния // *Физ.-хим. кинетика в газовой динамике*. 2022. Т. 23. № 6. <http://chemphys.edu.ru/issues/2022-23-6/articles/1023>
29. Chashechkin Yu. D., Ilinykh A. Y. Intrusive and impact modes of a falling drop coalescence with a target fluid at rest // *Axioms*. 2023. V. 12. No.4. Pp. 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 // *Физ.-хим. 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. Физика, Технические науки*. 2021. Т. 497. С. 31–35. DOI: 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. Pp. 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. DOI: 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. and Fluid Sci.* 2016. V. 77. Pp. 246–256. doi:10.1016/j.expthermflusci.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. DOI: 10.1134/S0032823519030032

36. Чашечкин Ю. Д. Эволюция тонкоструктурного распределение вещества свободно падающей капли в смешивающихся жидкостях // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 3. С. 67–77. DOI: 10.1134/S0001433819020026
37. 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.
Сайт: <http://www.ipmnet.ru/uniquequip/gfk/#equip>

References

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, vol. 29, pp. 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, *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 2020, vol. 51, pp. 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, vol. 764, pp. R1–12.
DOI: 10.1017/jfm.2014.723
5. Thoroddsen S. T., Etoh T. G., Takehara K., High-Speed Imaging of Drops and Bubbles, *Ann. Rev. of Fluid Mech.*, 2008, vol. 40, no.1, pp. 257–285. doi:10.1146/annurev.fluid.40.111406.102215
6. Lohse D., Fundamental fluid dynamics challenges in inkjet printing, *Ann. Rev. of Fluid Mech.*, 2022, vol. 54, pp. 349. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-022321-114001>
7. Landau L.D., Lifshitz E.M., *Fluid Mechanics. V.6. Course of Theoretical Physics*. Pergamon Press: Oxford, UK, 1987. 560 p.
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, vol. 10, no. 4, pp. 286. <https://doi.org/10.3390/axioms10040286>
10. Gibbs J.W., *Elementary principles in statistical mechanics*, Scribner's and sons: New York, US, 1902. 207 p.
11. Feistel R., Thermodynamic properties of seawater, ice and humid air: TEOS-10, before and beyond, *Ocean. Sci.*, 2018, vol. 14, pp. 471–502. DOI:10.5194/os-14-471-2018
12. Landau L.D., Lifshitz E.M., *Mechanics: Volume I*, Butterworth-Heinemann: Oxford, UK, 1976. 169 p.
13. Brackbill J.U., Kothe D.B., Zemach C., A continuum method for modelling surface tension, *J. Comput. Phys.*, 1992, vol. 100, no.2, pp. 335–354. DOI: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.
DOI: 10.1103/PhysRevE.82.036319
15. Popinet S., Numerical models of surface tension, *Ann. Rev. of Fluid Mech.*, 2018, vol. 50, pp. 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, vol. 86, no.4, p. 045301.
DOI: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, vol. 34, pp. 022110. <https://doi.org/10.1063/5.0081064>
18. Rein M., Phenomena of liquid drop impact on solid and liquid surfaces, *Fluid Dyn. Research*, 1993, vol. 12, no.2, pp. 61–93. DOI: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, vol. 34, p. 102101. DOI: 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, vol. 27, no.2, pp. 316–323. DOI:10.1016/j.foodhyd.2011.10.008
21. Johnson R.E., Sadhal S.S., Fluid mechanics of compound multiphase drops and bubbles, *Ann. Rev. of Fluid Mech.*, 1985, vol. 17, no.1, pp. 289–320. DOI: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, vol. 26, pp. 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, vol. 10, no. 4, pp. 760–774. DOI: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, vol. 906. DOI: <https://doi.org/10.1017/jfm.2020.791>
25. Aisenberg D., Kauzmann W., *The structure and properties of water* (Oxford Classic texts in the physical sciences), Oxford University Press: Oxford, UK, 2005. 308 p.
26. Chashechkin Yu. D., Packets of capillary and acoustic waves of drop impact, *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2021, vol. 94, no.1, pp. 73–92 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2021-1-73-91>
27. Chashechkin Yu. D., Ilinykh A. Y., Delay of cavity formation in the intrusive coalescence of a free falling drop with target fluid, *Dokl. Physics*, 2021, vol. 66, no.1, pp. 20–25. DOI: 10.1134/S102833582101002X
28. Chashechkin Yu. D., Ilinykh A. Yu., Distribution of the drop substance in the target fluid at the coalescence intrusive mode, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2022, vol. 23, no.6, pp. 1–18. [in Russian]. <http://chemphys.edu.ru/issues/2022-23-6/articles/1023>. <http://doi.org/10.33257/PhChGD.23.6.1023>
29. Chashechkin Yu. D., Ilinykh A. Y., Intrusive and impact modes of a falling drop coalescence with a target fluid at rest, *Axioms*, 2023, vol. 12, no. 4, p. 374. <https://doi.org/10.3390/axioms12040374>
30. Chashechkin Yu. D., Ilinykh A. Yu., Fine structure of the substance distribution pattern of a free – falling drop on the surface and in the thickness of the target fluid in the impact mode of merging, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2023, vol. 24, no. 2, [in Russian]. <http://chemphys.edu.ru/issues/2023-24-2/articles/1043>. <http://doi.org/10.33257/PhChGD.24.2.1043>
31. Chashechkin Yu. D., Ilinykh A. Yu. Drop decay into individual fibers at the boundary of the contact area with a target fluid, *Dokl. Physics*, 2021, vol. 66, no. 4, pp. 101–105. DOI: 10.1134/S1028335821040078
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, vol. 31, p. 012107. <https://doi.org/10.1063/1.5064640>
33. Ilinykh A. Yu., Chashechkin Yu. D., Mass transfer from a drop in fall into the fluid thickness in the initial stage of the coalescence process, *Fluid Dyn.*, 2023, vol. 58, no.1, pp. 31–44. DOI: 10.1134/S0015462822601607
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. and Fluid Sci.*, 2016, vol. 77, pp. 246–256. DOI:10.1016/j.expthermflusci.2016.04.020
35. Chashechkin Yu. D., Visualization of the fine perturbation structure of a liquid surface by flows induced by a drop impact, *Fluid Dyn.*, 2019, vol. 54, no.7, pp. 919–926. <https://doi.org/10.1134/S0015462819070036>
36. Chashechkin Yu. D., Evolution of the fine structure of the matter distribution of a free-falling droplet in mixing liquids, *Izv. Atmosph. Ocean. Phys.*, 2019, vol. 55, no.3, pp. 285–294. DOI: 10.1134/S0001433819020026

37. Hydrophysical complex for modeling hydrodynamic processes in the environment and their impact on underwater technical objects, as well as the distribution of impurities in the ocean and atmosphere, Institute for Problems in Mechanics RAS. Available online: <http://ipmnet.ru/uniquequip/gfk> (accessed on 15 June 2023).

Статья поступила в редакцию 23 октября 2023 г.