

УДК 532.6

ТОНКОСТРУКТУРНЫЕ КОМПОНЕНТЫ ВСПЛЕСКА КАПЛИ

© 2019 г. А. Ю. Ильиных^{1,*}¹ Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия* e-mail: ilynykh@ipmnet.ru

Поступила в редакцию 05.04.2019 г.

После доработки 10.04.2019 г.

Принята к публикации 11.04.2019 г.

Тонкие структуры переноса вещества свободно падающей капли, погружающейся в глубокую жидкость, изучаются методом фоторегистрации с большими пространственным и временным разрешениями. В результате более 500 экспериментов, проведенных в широком диапазоне основных размерных параметров, для смешивающихся жидкостей отмечено дискретное распределение вещества капли по деформированной поверхности принимающей жидкости и равномерное для несмешивающихся. Дискретное распределение реализуется каскадом тонких волокон — лигаментов, образованных капельным веществом. Предложена общая схема распределения вещества капли для случая взаимодействия смешивающихся пар жидкостей, определено влияние на структуру схемы таких параметров задачи как числа Вебера и Онезорге, относительная разность коэффициентов поверхностного натяжения, а также топографии дна.

Ключевые слова: удар капли, коэффициенты поверхностного натяжения, брызги, капиллярные волны, лигаменты

DOI: 10.1134/S0032823519030056

Введение. В картине всплеска при падении капли в жидкость разделяют следующие компоненты течения: пелена тонких струй, вылетающих из области контакта при соприкосновении жидкостей [1], каверна [2], венец с краевым шевроном, с вершин зубцов которого вылетают вторичные капли и струи [3]. Всплеск сопровождается генерацией поверхностных капиллярных волн на поверхности принимающей жидкости [4], венца и каверны [8] и даже на поверхности первичной капли при отрыве [7] или контакте с принимающей жидкостью, выбросом тонкой и толстой кумулятивных струй [5, 6]. При погружении капли в принимающую жидкость в жидкость и в газовую среду излучаются высокочастотные акустические пакеты [6].

Высокоразрешающей визуализацией области контакта капли с принимающей жидкостью установлен факт попадания на поверхность капли мелких брызг, на ней генерируются группы капиллярных волн. Направление вылета брызг и, следовательно, вероятность их попадания на поверхность капли определяется относительной разностью коэффициентов поверхностного натяжения взаимодействующих жидкостей [9].

Цель данного исследования — визуализация мелкомасштабных компонентов течения в стадии первичного контакта, а также определение влияния основных параметров задачи на картину распределения капли по деформированной поверхности принимающей жидкости.

1. Параметры задачи. Картины течений, возникающих при свободном падении капли в принимающую жидкость (рис. 1), зависят от физических свойств контактирую-

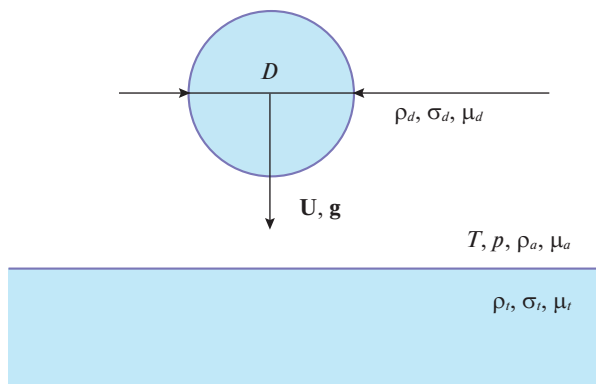


Рис. 1. Постановка и размерные параметры задачи.

щих сред, которые характеризуются термодинамическими и кинетическими параметрами, а также условиями опытов. В число влияющих физических величин входят следующие: плотности (воздуха ρ_a , жидкостей капли ρ_d и принимающей ρ_l), кинематические $\nu_{a,d,l}$ и динамические $\mu_{a,d,l}$ вязкости, коэффициенты поверхностного натяжения σ_d^a , σ_l^a , коэффициенты диффузии вещества капли κ_l^d и маркирующей примеси κ_l^{md} в принимающей жидкости, температуры ($T_d = T_l = T_a$), условия опытов (диаметр D и величина скорости U капли в момент первичного контакта, высота свободного падения H , глубина слоя принимающей жидкости h_l , величина ускорения свободного падения g). Выделяются дополнительные параметры: масса капли M , площадь свободной поверхности S_d , величина импульса p , кинетическая E_k и доступная потенциальная поверхностная энергия E_σ падающей капли.

В опытах использовался широкий набор рабочих жидкостей (водные растворы ализариновых чернил, спирта, неорганических солей, глицерина, уксусной кислоты, подсолнечное и касторовое масла, нефть, молоко и молочные сливки). Значения размерных параметров изменялись в диапазоне: высота падения $H = 40\text{--}260$ см, диаметр капли $D = 0.3\text{--}0.5$ см, глубина слоя жидкости $h_l = 0.2\text{--}8$ см, плотность $\rho = 0.87\text{--}1.26$ г см $^{-3}$, вязкость $\mu = 0.01\text{--}15$ г см $^{-1}$ с $^{-1}$, коэффициент поверхностного натяжения на границе с воздухом $\sigma = 27\text{--}75$ г с $^{-2}$.

На основе выделенных размерных параметров для определения требований к методике эксперимента проведен масштабный пространственно-временной анализ системы уравнений. Наборы линейных и временных масштабов задачи разделены на подгруппы.

Первая группа линейных масштабов включает капиллярно-гравитационный параметр $\delta_g^\gamma = \sqrt{\gamma/g}$, входящий в дисперсионное уравнение коротких поверхностных волн, и диссипативно-капиллярные масштабы $\delta_\gamma^v = \nu^2/\gamma$. Вторая группа линейных масштабов, которые зависят от скорости капли, включает кинематический $\delta_g^U = U_d^2/g$, а также тонкие капиллярный $\delta_U^\gamma = \gamma/U_d^2$ масштаб и масштаб Прандтля $\delta_U^v = \nu/U_d$.

По аналогии, одна часть собственных временных масштабов включает только параметры среды — $\tau_g^\gamma = \sqrt[4]{\gamma/g^3}$, $\tau_\gamma^v = \nu^3/\gamma^2$, другая — размер капли — $\tau_\gamma^d = \sqrt{D^3/\gamma}$, $\tau_\kappa^\gamma = \kappa D/\gamma$, $\tau_\nu^\gamma = \nu D/\gamma$, $\tau_\nu^D = D^2/\nu$, третья группа — ее скорость — $\tau_U^d = D/U_d$, $\tau_g^U = U_d/g$. Значения

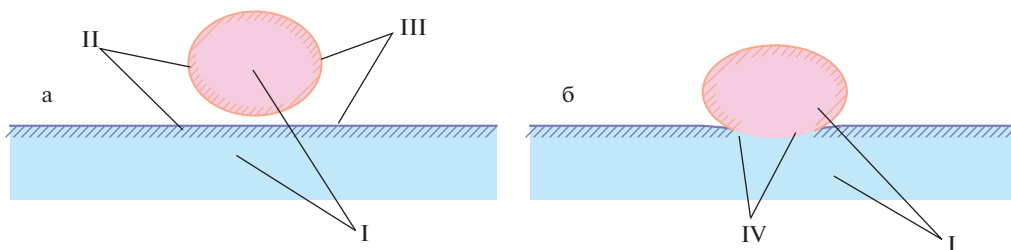


Рис. 2. Схема распределения термодинамических потенциалов: (а) — полет капли; (б) — начало процесса слияния; I — потенциал dg в толще жидкости, II — потенциал dg_σ в приповерхностном слое, III — потенциал dg_s непосредственно на границе раздела — поверхность молекулярного контакта жидкости с газовой фазой, IV — потенциал dg_2 слившихся жидкостей в области соприкоснувшихся приповерхностных слоев.

масштабов использованных в экспериментах жидкостей изменяются в широком диапазоне. Для воды наибольший и наименьший масштабы длины составили $\delta_{\min} = \delta_v^v = 1.4 \times 10^{-6}$ см и $\delta_{\max} = \delta_g^v = 0.27$ см, соответственно, а временные масштабы — $\tau_{\min} = \tau_v^v = 1.9 \times 10^{-10}$ с и $\tau_{\max} = \tau_v^D = 17.6$ с.

2. Безразмерные числа. Отношения размерных параметров задачи задают наборы безразмерных комбинаций, включающие традиционные числа: Рейнольдса $Re = UD/\nu = 150-10^4$, Фруда $Fr_d = U^2/(gD) = 140-200$, Вебера $We_d = U^2 D/\gamma_d = 400-1000$, Бонда $Bo = gD^2/\gamma_d^d = 2.4-3.4$, Онезорге $Oh = \nu/\sqrt{\gamma D} = 1.8 \times 10^{-3}-1.7 \times 10^{-1}$. При различии в составах вещества капли и принимающей жидкости протекающие процессы характеризуются еще одной группой безразмерных комбинаций, включающей относительную разность плотностей контактирующих сред $R_p = (\rho_t - \rho_d)/(\rho_t + \rho_d)$ (число Атвуда), коэффициентов поверхностного натяжения $R_\sigma = (\sigma_t - \sigma_d)/(\sigma_t + \sigma_d)$, динамических вязкостей $R_\mu = (\mu_t - \mu_d)/(\mu_t + \mu_d)$, которые в экспериментах принимали как положительные, так и отрицательные значения.

Поверхностная энергия, обусловленная анизотропией действия атомно-молекулярных сил на контактных границах, считается равномерно распределенной в тонком слое толщиной порядка размера молекулярного кластера $\delta_\sigma = 10^{-6}$ см (рис. 2). Основную долю энергии капли (более 97%) составляет кинетическая энергия, распределенная во всем объеме капли, однако, ввиду тонкости границы, плотность поверхностной энергии на несколько порядков превышает плотность кинетической энергии. В момент контакта за короткое время $\Delta t_s \sim 10^{-10}$ с (диссипативно-капиллярный масштаб времени) происходит уничтожение поверхностных слоев толщиной порядка размера нескольких размеров молекул $\delta_s \sim 10^{-8}$ см, который соотносится с диссипативно-капиллярным масштабом, и выброс из области слияния отдельных тонких струй. При этом в выражении для термодинамического потенциала Гиббса

$$dg_s = -sdT + VdP + \sigma dS_b + \mu_n dN_n$$

исчезают дополнительные члены, зависящие от химического потенциала μ_n и концентрации соответствующих компонентов dN_n [10].

За более длительное время $\Delta t_\sigma = \delta_\sigma/U \sim 10^{-8}$ с происходит слияние жидкостей (уничтожение приповерхностных слоев) в пятне первичного контакта погружающей-

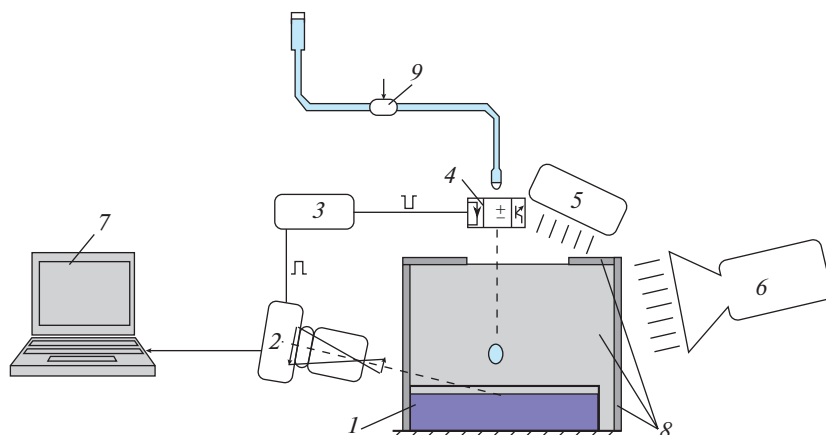


Рис. 3. Стенд ТБП для регистрации мелкомасштабных быстропротекающих процессов на поверхности жидкости: оптическая кювета 1 с принимающей жидкостью глубиной h_f , оптическая система регистрации 2, управляемая компьютером 7 и блоком регулируемых задержек 3 с датчиком прохождения капли 4, источники света видимого диапазона 5, 6, защитные и отражающие экраны 8, дозатор капель 9.

ся капли с принимающей жидкостью толщиной $\delta_\sigma \sim 10^{-6}$ см. Преобразование доступной потенциальной поверхностной энергии в другие формы энергии сопровождается формированием течений, повышением температуры и давления в области слияния. При этом термодинамический потенциал приобретает типичную для толщи жидкости форму $dg_s = -sdT + VdP$. По мере дальнейшего погружения капли в жидкость (продолжительностью $\tau \sim 10^{-3}$ с) характер передачи энергии изменяется — свободная энергия непрерывно поступает лишь в узком кольце контакта приповерхностного слоя капли с принимающей жидкостью.

По мере погружения капли в принимающую жидкость до полувысоты капли скорость контактной линии направлена от области начального соприкосновения жидкостей. Далее область контакта жидкостей движется внутрь каверны, удаляясь от стенок, при слиянии верхней половины капли. Движение жидкости капли в таком случае происходит по возмущенной поверхности принимающей жидкости, что предопределяет иную картину распределения вещества.

3. Экспериментальная установка. Опыты выполнены на стенде “Тонкоструктурные быстропротекающие процессы” (ТБП), входящем в состав гидрофизического комплекса уникальных установок для моделирования гидродинамических процессов в окружающей среде “УСУ ГФК ИПМех РАН”, схематическое изображение которого приведено на рис. 3.

Исследования проводились в режиме формирования выраженной центральной кумулятивной струи, который задавался путем выбора высоты свободного падения и диаметра капли. Дозатор 9 устанавливался на высоте $H = 30\text{--}260$ см над поверхностью принимающей жидкости.

Область наблюдения освещалась постоянными источниками света видимого диапазона. Для освещения использовались студийные софиты ReyLab Xenos RH-1000 мощностью 1 кВт 6 и светодиодные источники Optronis MultiLED 5 со световым потоком 7700 лм, которые располагались над кюветами или сбоку от них. Требования к освещению и, следовательно, схема расположения осветительной техники и отражающих поверхностей задавались геометрией и масштабами исследуемых течений. Применялись схемы освещения в прямых и в отраженных лучах.

Регистрация картины течений проводилась видеокамерой Optronis CR3000x2, управляемой с компьютера, с частотой съемки от 4 до 40 тыс. кадров/с или фотоаппаратами Canon EOS350D 2 с объективами Canon EFS 18–55 мм и EF 50 мм. Фотоаппараты и видеокамера размещались на штативах с 5 степенями свободы. Настройка видеокамеры или фотоаппарата осуществляется с компьютера 7. Линия визирования регистрирующей аппаратуры в одних опытах проходила вдоль покоящейся поверхности принимающей жидкости, в других – составляла разные углы: незначительные отклонения (до 5°) в обе стороны, 20° – 25° к горизонту при съемке сверху (для исследования формы венца и распределения вещества капли по его поверхности), 70° – 75° (регистрация сверху) для исследования распределения вещества капли по дну каверны. Расстояние от передней линзы фотоаппаратов до области регистрируемых течений составляла 7–8 см в большинстве экспериментов.

Для увеличения изображения использовались реверсивное кольцо JJC RR-EOS диаметром 58 мм и набор макрокольцев Canon толщиной 12, 20 и 36 мм в разных комбинациях, позволившие разрешать элементы с линейными размерами порядка 10 мкм. Состав набора дополнительных колец объектива определялся исходя из масштабов и местоположения регистрируемых компонентов течений. Для разрешения воспроизводимых тонкоструктурных компонентов на фотоаппаратах устанавливалась минимальная выдержка $1/4000$ с.

Опыты с подкрашенными каплями (водные растворы чернил, перманганата калия, медного и железного купороса, молоко, спиртовые растворы бриллиантовой зелени) и несмешивающимися жидкостями (окрашенные подсолнечное и касторовое масла, нефть) проводились с использованием ряда квадратных чашек Петри размером $12 \times 12 \times 1.5$ см или глубоких емкостей размером $16 \times 16 \times 8$ см для оперативной смены принимающей жидкости и обеспечения чистоты проведения эксперимента.

Для исследования влияния профиля дна на картину растекания капли по деформированной поверхности неглубокой жидкости ($h_l < D$) были изготовлены кюветы с полусферическими и коническими углублениями (диаметры основания составляли 10 и 20 мм, угол при вершине 60°), клиновидным вырезом (с углом раствора 60° и основанием 20 мм) и кювета, на дне которой располагался стеклянный шар диаметром 20 мм.

4. Циклические эффекты. При уничтожении свободных поверхностей в выбросе мелких капель наблюдается ряд циклических эффектов. Длительное действие механизма уничтожения свободных поверхностей, ускоряющего течения, предопределяет геометрию поступления вещества капли в растущий венец, а также обеспечивает продолжительность процесса удлинения тонких струек и выброса капелек с их вершин. По мере погружения капли размер мелких капелек увеличивается при уменьшении нормального угла их вылета. Первые группы капелек вылетают насильно (под углом 10° к горизонту на рис. 4а), зубья шеврона с отделяющимися крупными каплями располагаются под углом 45° . Зональная структура капельных облаков указывает на существование радиальных периодических движений, почти однородных по азимутальной переменной.

Попадание мелких брызг на поверхность погружающейся капли генерирует группы капиллярных волн, периодически расположенных по линии контакта жидкостей. Форма фронта волны, которая определяется величиной и направлением скорости капельки относительно принимающей поверхности, однозначно определяет направление траектории движения источника (рис. 4б). Здесь в силу свойств дисперсионного уравнения капиллярных волн в картине течения выражены опережающие возмущения – дуги, располагающиеся перед источником (в отличие от гравитационных волн, которые отстают от источника). Вторичные капли отрываются от зубьев шеврона эшелонами в несколько этапов (рис. 4в).

Направление и диапазон углов вылета тонких струй и капель определяется динамикой столкновения и действием поверхностных сил, зависящих от относительной раз-

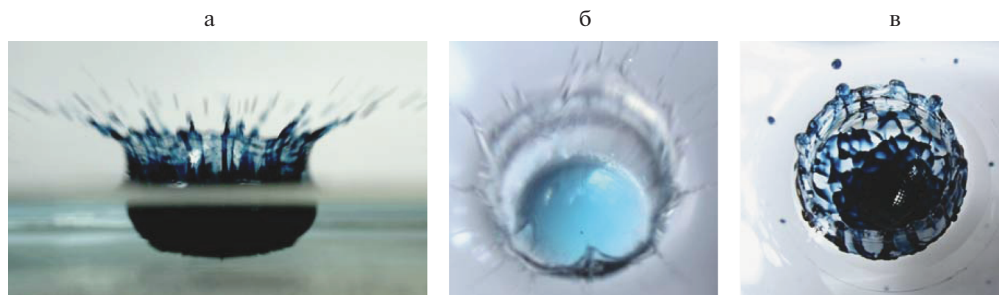


Рис. 4. Циклические эффекты в выбросе мелких брызг в фазе первичного контакта: набор струй, выбрасываемых при падении капли раствора чернил в воду (а), кольцевые структуры брызг на поверхности капли водного раствора медного купороса погружающейся в воду (б), зональная структура каплевидных облаков (в).

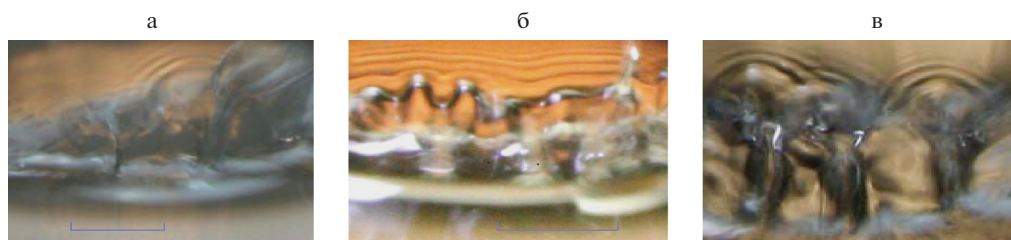


Рис. 5. Капиллярные волны на поверхностях капель чистой воды, погружающейся в раствор спирта (а) и масло (б), а также капли раствора соли — в чистую воду (в).

ности коэффициентов поверхностного натяжения R_σ . Экспериментально установлено, что при значениях $R_\sigma \leq 0$ часть вылетающих струй попадает на поверхность капли, генерируя группы коротких волн капиллярного масштаба (рис. 5).

В случае положительных значений R_σ (например, при погружении капель этанола и подсолнечного масла в воду) угол разлета струй меняется, и капиллярные волны на поверхности первичной капли не обнаруживаются.

5. Общая картина течения (смешивающиеся жидкости). В большом числе экспериментов со смешивающимися жидкостями (а также эмульсиями и суспензиями) отмечено, что вещество капли на деформированной поверхности принимающей жидкости распределяется дискретным образом, собирается в тонких линейчатых элементах — лигаментах. В верхнем ряду венца лигаменты образуют вертикальную линейчатую структуру. На поверхности каверны выражена сетчатая структура, включающая трех-, четырех- и пятиугольные ячейки, на дне каверны сохраняется центральное пятно (рис. 6). Линейчатые структуры устойчиво воспроизводятся, наблюдаются во всех фазах процесса слияния капли: на растущей каверне и венце, а также на заполняющейся каверне и погружающемся венце, сохраняются до распада кумулятивной струи. Положение и пространственная ориентация волокон сетки со временем меняются [11].

В линейчатой структуре распределения вещества капли по внутренней поверхности каверны выделяется три масштаба. Первый из них определяет длину структур $\delta_l = Ut$, второй — диссипативно капиллярный — определяет толщину слоя $\delta_\gamma^v = v^2/\gamma$, третий — линейный масштаб тонких окрашенных нитей и полосчатых структур δ_w — находится в диапазоне между капиллярным и капиллярно-гравитационным масштабами. Поло-

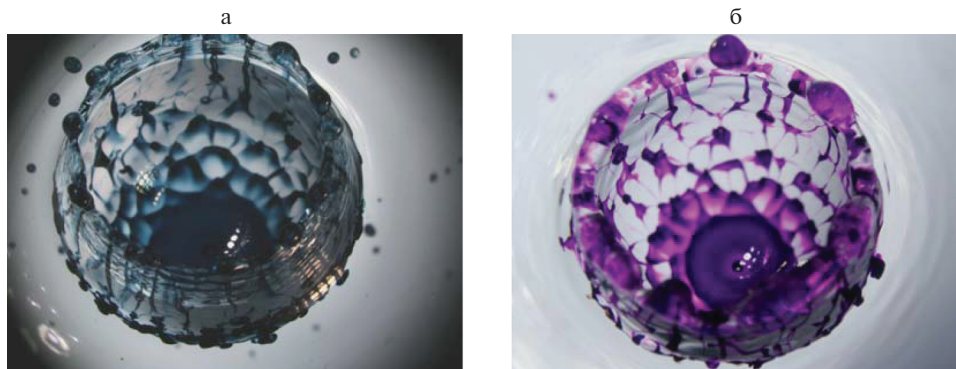


Рис. 6. Линейчатые структуры на поверхностях венца и каверны при растекании капель: чернил (а), перманганата калия (б).

счатые структуры в процессе эволюции венца распадаются на более тонкие окрашенные нити, толщиной от 0.005 до 0.04 см.

Линейчатые структуры наблюдаются на нескольких начальных фазах процесса слияния капли, на растущей каверне и венце, а также на заполняющейся каверне и погружающемся венце, сохраняются до распада кумулятивной струи. Образование линейчатых структур объясняется действием больших флуктуаций давления в сравнительно малых по объему областях уничтожения свободной поверхности сливающихся жидкостей. Большие флуктуации давления ускоряют совместное тонкослойное течение соприкасающихся жидкостей и формируют неравномерное распределение вещества капли по поверхности венца и каверны.

Для характеристики влияния основных параметров задачи проведена параметризация картин распределения вещества капли по деформированной поверхности принимающей жидкости. Картина распределения вещества капли по внутренним поверхностям венца и каверны представляет собой сетчатую структуру с центральным пятном, ограниченным окружностью R_1 (рис. 7). Далее по мере удаления от центра дна каверны располагаются ярусы сетки, количество которых зависит от условий эксперимента и фазы процесса (на схеме приведено пять ярусов $k = 5$). Каждый ярус сетки $R_k R_{k+1}$ образован ребрами f_k , в которых концентрируется вещество капли. Ребра образуют ячейки сетчатой структуры (преимущественно трех- и четырехугольные, однако встречаются и пятиугольные), в которых вещество капли диффузно распределено в меньшей концентрации или не обнаруживается вовсе. Внешний ярус сетки образован вертикальными линейчатыми структурами f_k (f_5 на рис. 7), располагающимися на поверхности венца и, частично, каверны.

Ярусы сетки ограничиваются условными кольцами R_k , на которых располагаются узлы сетки (узлы повышенной концентрации вещества капли). Кольцом R_{k+1} (R_6) обозначена кромка шеврона венца — граница картины распределения вещества капли. Исходящие из кольца R_{k+1} линейчатые структуры f_{k+1} обозначают зубцы шеврона, с вершин которых отрываются вторичные капли, также содержащие вещество основной капли. Положения капель и вершин зубьев шеврона также образуют кольцо.

Параметрами картины распределения вещества капли служат количество ярусов сетки k , изменяющееся при условиях опыта и состава жидкостей, диаметры колец R_k и уровень их целостности (отношение окрашенных участков колец к длине окружности).

6. Влияние высоты (скорости) падения капли на картину распределения вещества. С учетом сил тяжести, Стокса и плавучести, действующих на свободно падающую в

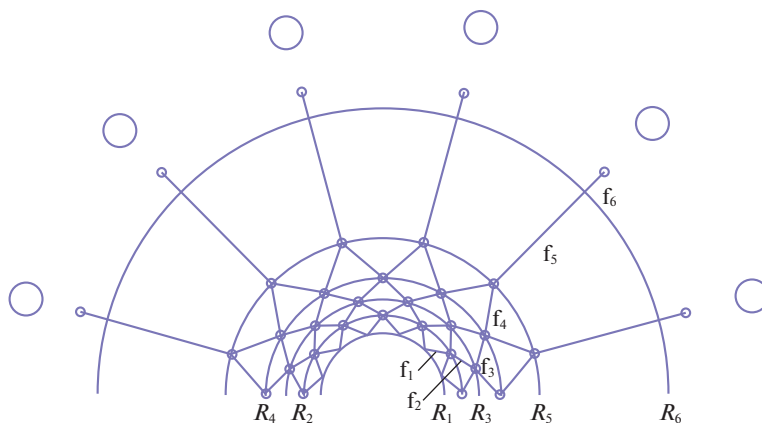


Рис. 7. Схема картины распределения вещества капли по внутренней поверхности короны.

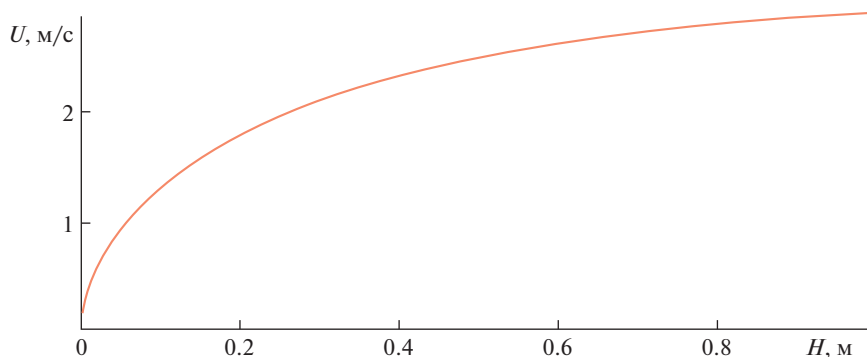


Рис. 8. Характер изменения скорости свободного падения капли с высотой падения.

воздухе каплю воды диаметром $D = 0.42$ см (в пренебрежении отклонением формы капли от сферической), скорость капли меняется с высотой падения, как показано на рис. 8.

Значения скорости капли в момент контакта с принимающей жидкостью, капиллярного масштаба, чисел Вебера и Фруда при разных высотах свободного падения капли, устанавливаемых в экспериментах, приведены в табл. 1.

Дискретный характер распределения синих ализариновых чернил в принимающей жидкости сохраняется в широком диапазоне высот падения капли (рис. 9). При падении с высоты $H = 100$ см в картине течения в фазах роста и начала расплывания венца выражены собранные в ярусы треугольные и линейчатые ячейки (рис. 9, строка I). Плотность окраски увеличивается по мере приближения к остатку капли в центре каверны.

С увеличением высоты падения нарастает контрастность зональной структуры, состоящей из элементов разной формы: и линейчатых, и более сложной геометрии (рис. 9, строка II). На стенках венца наблюдаются практические свободные от краски ячейки. При большой высоте падения кольцевая структура распределения красителя, образованная элементами сложной формы, становится преобладающей уже на стадии роста венца (рис. 9, строка III). Под действием сил поверхностного натяжения вершина венца стягивается в купол.

Таблица 1. Параметры экспериментов (разные высоты падения)

Высота падения, H , см	Скорость, U , м/с	Капиллярный масштаб $\delta_U^\gamma \times 10^3$, см	We	Fr
40	2.34	1.3	320	130
80	2.82	0.92	460	190
100	2.94	0.85	500	210
120	3.02	0.8	530	220
150	3.09	0.76	560	230
200	3.15	0.74	580	240
260	3.17	0.73	586	244

С увеличением высоты падения капли и, следовательно, скорости (энергии) лигаменты становятся более тонкими, вещество капли сохраняется больше в узлах ярусов сетки и картина распределения вещества капли приобретает выраженный кольцевой характер. Кроме того, изменяется направление загиба венца и траектории выброса вторичных капель (внутри венца). Остальные структурные элементы остаются без существенных изменений.

При погружении капли чернил, свободно падающей с высоты 100 см, из контактной линии жидкостей отходят широкие окрашенные линейчатые структуры шириной

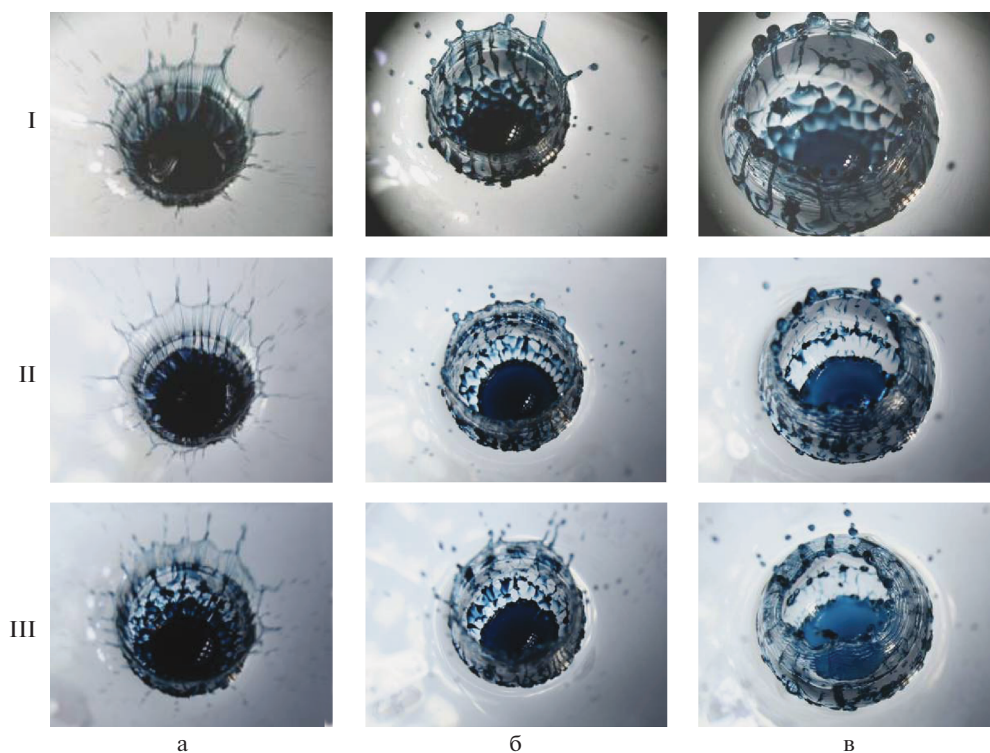


Рис. 9. Распределение вещества капли по деформированной поверхности принимающей жидкости в фазах: выброса пелены брызг (а), формирования короны (б), развитой короны. Высоты свободного падения капли, см: 100 (I), 150 (II), 260 (III).

Таблица 2. Значения параметров распределения вещества капли при разных значениях высоты падения, см: 100 (I), 150 (II), 260 (III)

	(а)	(б)	(в)
I	$k = 1, R_1 = 0.33 \text{ см},$ $R_{2i} = 1.88$	$k = 4, R_1 = 0.45 \text{ см},$ $R_{2i} = 1.13, R_{3i} = 1.27,$ $R_{4i} = 1.56, R_{5i} = 1.78,$ $\chi_{R_4} = 59\%$	$k = 4, R_1 = 0.44 \text{ см},$ $R_{2i} = 1.38, R_{3i} = 1.88,$ $R_{4i} = 2.18, R_{5i} = 2.43,$ $\chi_{R_4} = 34\%$
II	$k = 2, R_1 = 0.38 \text{ см},$ $R_{2i} = 1.38, R_{3i} = 2.01$	$k = 4, R_1 = 0.63 \text{ см},$ $R_{2i} = 1.26, R_{3i} = 1.43,$ $R_{4i} = 1.57, R_{5i} = 1.65,$ $\chi_{R_3} = 90\%$	$k = 2, R_1 = 0.75 \text{ см},$ $R_{2i} = 1.32, R_{3i} = 1.36,$ $\chi_{R_2} = 83\%$
III	$k = 3, R_1 = 0.63 \text{ см},$ $R_{2i} = 1.48, R_{3i} = 1.76,$ $R_{4i} = 2.2$	$k = 2, R_1 = 0.66 \text{ см},$ $R_{2i} = 1.22, R_{3i} = 1.46,$ $\chi_{R_2} = 64\%$	$k = 2, \chi_{R_2} = 64\%$

порядка 0.03 см, между которыми находятся слабоокрашенные области. На рис. 9а в строке I четко визуализируется кольцо перехода из каверны в венец. Линейчатые структуры при переходе через кольцо дробятся на лигаменты шириной порядка 0.005 см.

Лигаменты формируют один ярус сетки $k = 1$, радиус остатка капли $R_1 = 0.33 \text{ см}$, радиус кромки шеврона составляет $R_2 = 0.62 \text{ см}$, отдельные струи, образующиеся на кромке шеврона, достигают размеров $f_2 = 0.27 \text{ см}$. На следующем кадре (рис. 9б, строка I) картина распределения вещества капли становится сетчатой. Надежно определяются 4 яруса ($k = 4$). Значения радиусов центральных пятен и отношения радиусов колец к радиусу центрального пятна $R_{1i} = R_i/R_1$ приведены в табл. 2. Целостность (заполненность) кольца верхнего яруса χ_{R_4} (рис. 10, $H = 100 \text{ см}$), определенная методом фотометрии как отношение окрашенных областей к длине окружности, составляет 59%. С развитием короны целостность крайнего кольца снижается. Число ярусов сетчатой структуры, относительные радиусы колец и их целостности для разных фаз всплеска и разных высот свободного падения капли (I–III) в соответствии с рис. 9 приведены в табл. 2.

Подобная сетчатая картина наблюдалась при высотах свободного падения капли $H < 100 \text{ см}$, $We < 500$. Однако уже при высоте $H = 120 \text{ см}$ ($We = 530$) выраженная сетчатая структура приобретает кольцевой характер (целостность крайнего кольца $\chi_{R_3} = 70\%$ при более плотных нижних), а при высоте $H = 150 \text{ см}$, $We = 560$ (рис. 10) целостность кольца достигает $\chi_{R_3} = 90\%$.

Далее с увеличением высоты (скорости, числа Вебера) уменьшается число ярусов картины распределения вещества и целостность кольцевых элементов, образованных вихревыми кольцами, связанных тонкими волокнами (рис. 11).

В картине распределения вещества капли по деформированной поверхности принимающей жидкости с увеличением высоты свободного падения капли уменьшается число ярусов сетки (рис. 11а): с пяти ярусов при $H = 80 \text{ см}$ до двух при $H = 200 \text{ см}$. Линейчатые структуры, образующие ячейки, истончаются; вещество капли концентрируется в кольцах, целостность которых увеличивается и достигает максимального значения при $H = 150 \text{ см}$, при больших значениях H кольцевые структуры распадаются на вихревые кольца (целостность колец падает, рис. 11б).

7. Влияние вязкости капли на картину распределения вещества. Разные концентрации подкрашенного водного раствора глицерина позволили оценить влияние вязкости на

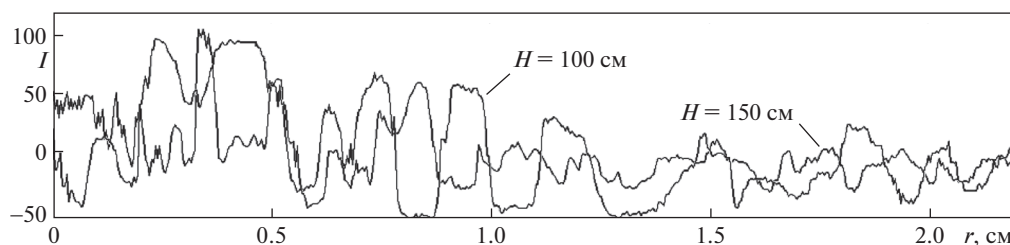


Рис. 10. Распределение краски в кольце R_4 картины течения, образованного при падении капли чернил с высоты: $H = 100$ см и $H = 150$ см.

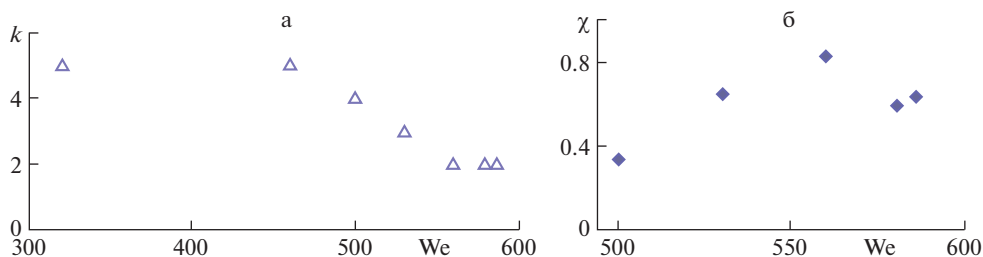


Рис. 11. Зависимости числа ярусов (а) и целостности колец (б) в картине распределения вещества капли в фазе развитого венца (рис. 9в) от числа Вебера.

картину растекания вещества капли по деформированной поверхности принимающей жидкости. Вязкости растворов и числа Онезорге в экспериментах приведены в табл. 3

По мере увеличения вязкости (концентрации глицерина) материал капли распределяется по поверхности каверны более равномерно при частичном сохранении линейчатых структур на поверхности венца (рис. 12). Картина распределения капли чернил приведена на рис. 12а. Здесь отмечается четыре яруса сетчатой структуры ($k = 4$) с центральным пятном на дне каверны. Отношение радиуса центрального пятна к радиусу каверны составляет $R_1/R = 0.36$.

На следующем кадре (рис. 10б) на поверхности каверны располагается всего три яруса структуры, отношение радиусов составляет $R_1/R = 0.43$. Зависимость числа ярусов структур и отношения радиусов от числа Онезорге приведены на рис. 13.

С увеличением вязкости капли число ярусов сетчатой структуры уменьшается, как показано на рис. 13а. При 90% концентрации глицерина в капле в структуре распределения вещества остаются лишь вертикальные структуры на внутренней поверхности венца, далее вещество капли распределяется практически равномерно. Центральное пятно заполняет все бо́льшую площадь каверны (рис. 13б).

Таблица 3. Параметры экспериментов (разные концентрации глицерина)

Концентрация	Вязкость μ , г см ⁻¹ с ⁻¹	Oh	Относительная разность вязкостей R_μ
0	0.01	18×10^{-4}	0
40	0.038	66×10^{-4}	-0.58
90	2.35	0.42	-1
100	15	2.65	-1

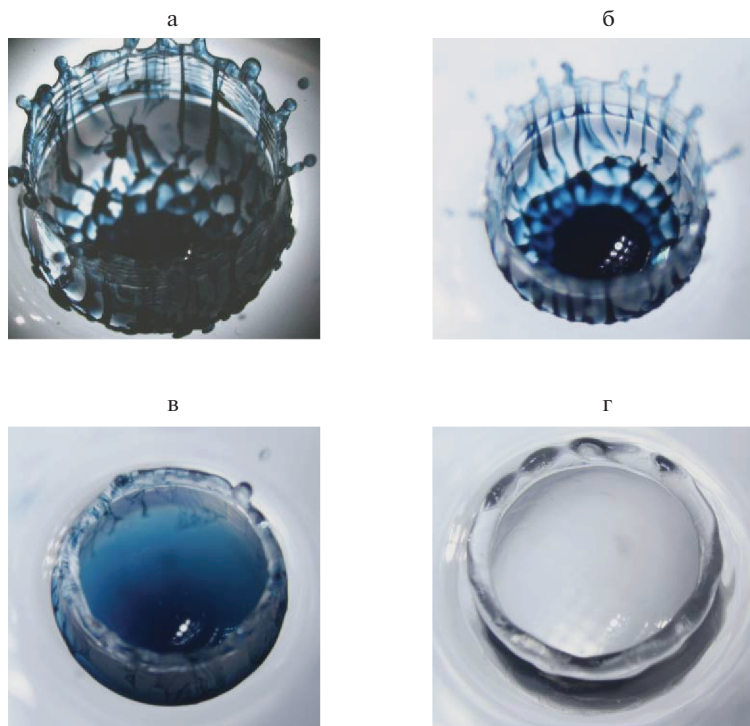


Рис. 12. Картины распределения вещества капли при погружении капель: раствора чернил (а), раствора глицерина: 40% (б) и 90% (в), чистого глицерина (г). Высота падения $H = 80$ см.

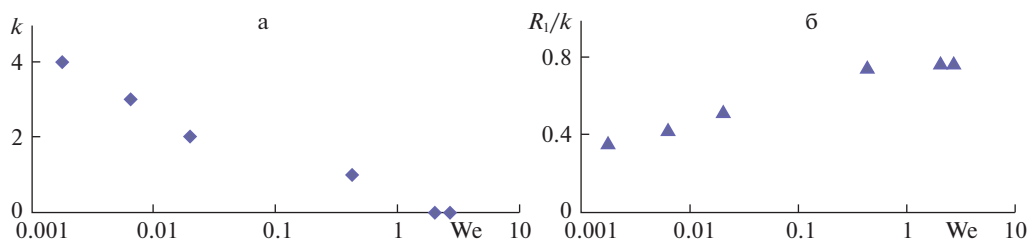


Рис. 13. Изменение числа ярусов (а) и отношения радиусов центрального пятна и каверны (б) с числом Онезорге.

8. Влияние топографии дна на картину распределения вещества. Погружение капли чернил в тонкий слой воды ($h_l \sim D$) показал, что форма дна бассейна оказывает существенное влияние на картину распределения вещества капли лишь в случае непосредственного контакта (рис. 14). Контакт каверны с гранями углубления приводит к искажению формы каверны и сетчатого рисунка — существенно увеличивается отношение радиуса первого яруса к радиусу центрального пятна.

В целом сетчатая картина распределения вещества капли по деформированной поверхности принимающей жидкости наблюдается в широком диапазоне чисел Вебера и Онезорге, при погружении капли в тонкие слои жидкости при различных формах поверхности дна.

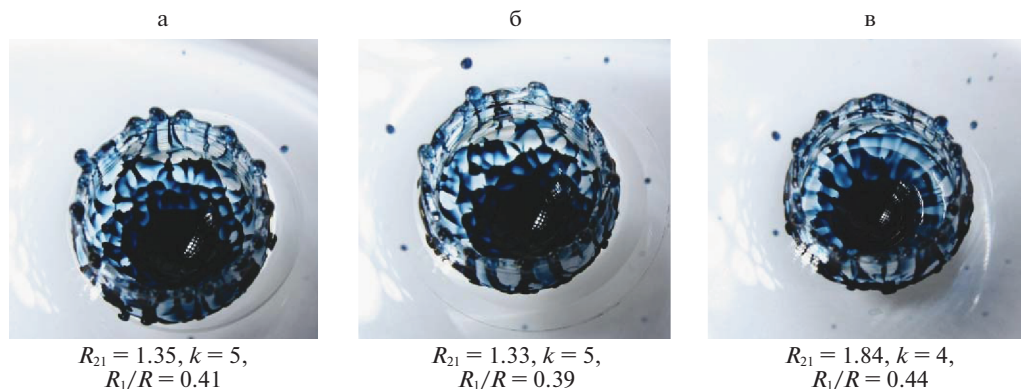


Рис. 14. Погружение капли раствора чернил в тонкий слой воды ($h_l = 2$ мм) с профильным дном с углублением: сферическим $d = 20$ мм (а), коническим $d = 20$ мм (б), сферическим $d = 10$ мм (в).

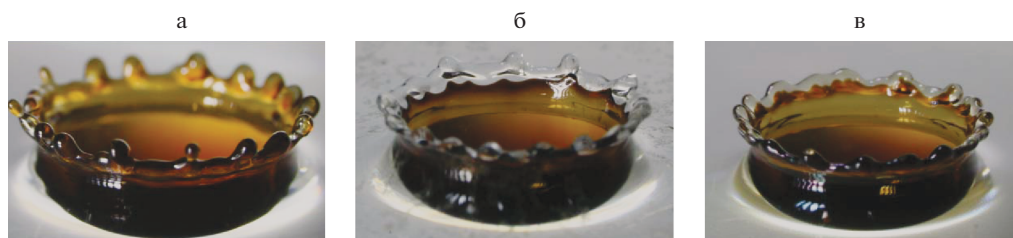


Рис. 15. Картина распределения нефти по поверхности воды: чистой (а), запыленной (б), покрытой тонкой нефтяной пленкой (в).

9. Картина распределения несмешивающегося вещества. Наблюдаемая быстрая эволюция картины течений при падении капли нефти или масла (формирование первичной пелены, струек, каверны и венца) в воду также обусловлена быстрым освобождением потенциальной поверхностной энергии, поскольку обе несмешивающиеся жидкости одновременно визуализируются на поверхностях всех элементов течения, включая вылетающие брызги. При погружении капли вещества, несмешивающегося с принимающей жидкостью, картина распределения более равномерная, линейчатых структур не наблюдается.

При падении капли нефти на чистую поверхность воды шеврон венца оказывается полностью окрашенным, как и внутренняя часть венца. Вторичные капли, вылетающие с вершин шеврона, также преимущественно состоят из вещества капли (рис. 15а).

Наличие пыли или нефтяной пленки на поверхности воды приводит к значительному уменьшению ее поверхностного натяжения. Отношением коэффициентов поверхностного натяжения капли и принимающей жидкости регулируется положение границы центрального пятна и состав вторичных капель (рис. 15).

Заключение. В картине распределения вещества капли по деформированной поверхности принимающей жидкости важную роль играют быстрые процессы, связанные с уничтожением контактирующих поверхностей и высвобождением части энергии, которая расходуется, в частности, на энергию трансляционного движения новых компонентов течений и их поверхностную энергию. Движение контактной границы при начальном погружении капли осуществляется по гладкой поверхности принима-

ющей жидкости в направлении от области соприкосновения, а позднее, при погружении половины капли — по возмущенной поверхности ко дну формирующейся каверны.

В зависимости от условий эксперимента и свойств сред картина пространственного распределения вещества капли различна. При погружении капли вещества смешивающего ($\kappa > 0$) с принимающей жидкостью формируется сетчатый рисунок с числом ярусов $k \geq 2$. Значение k на разных фазах процесса зависит от высоты свободного падения капли, причем уменьшается по мере увеличения высоты падения (для капли раствора чернил: от $k = 5$ при $H < 100$ см до $k = 2$ при $H = 260$ см). Количество вещества, концентрирующегося в узлах сетчатого, возрастает при снижении концентрации в ребрах сетки.

Погружение вязких несмешивающихся жидкостей (нефть, масло) формирует центральное пятно R_l , покрывающее практически всю внутреннюю поверхность венца ($\kappa = 0$, $k = 0$), с шеврона венца $R_{k+1} = R_l$ выступают зубцы $f_{k+1} = f_1$, с которых выбрасываются вторичные капли. Положение границы R_l зависит от относительного коэффициента поверхностного натяжения сред R_σ . При $R_\sigma \leq 0$ граница центрального пятна проходит по кромке венца шеврона R_{k+1} или вблизи нее, вторичные капли содержат незначительное количество вещества капли. При $R_\sigma > 0$ граница центрального пятна не совпадает с кромкой шеврона, а лежит на внешней поверхности венца, количество вещества основной капли во вторичных существенно возрастает.

Из результатов эксперимента следует, что параметр k чувствителен к относительной разности вязкостей взаимодействующих сред (уменьшается с увеличением вязкости капли), при этом существенно возрастает диаметр центрального пятна R_l .

При разных профилях дна картина течения зависит от отношения диаметров образующейся каверны и углубления, одна сама форма практически не влияет на распределение вещества капли. Столкновение развивающейся каверны с гранями углубления приводит к увеличению длины первого яруса сетчатого рисунка.

В целом сетчатая картина распределения вещества капли по деформированной поверхности принимающей жидкости наблюдается в широком диапазоне чисел Вебера и Онезорге, при погружении капли в тонкие слои жидкости при разных формах донных поверхностей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 19-19-00598 “Гидродинамика и энергетика капли и капельных струй: формирование, движение, распад, взаимодействие с контактной поверхностью”). Эксперименты проведены на стенде ТБП (стенд для регистрации тонкоструктурных быстропротекающих процессов), входящем в Гидрофизический комплекс для моделирования гидродинамических процессов (УНУ “ГФК ИПМех РАН”).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Thompson D.W.* On Growth and Form. Cambridge: Univ. Press, 1992. 368 p.
2. *Engel O.G.* Crater depth in fluid impacts // J. Appl. Phys. 1996. V. 37. № 4. P. 1798–1808.
3. *Чашечкин Ю.Д., Прохоров В.Е.* Тонкая структура всплеска при падении капли на свободную поверхность покоящейся жидкости // Докл. РАН. 2011. Т. 436. № 6. С. 768–773.
4. *Zhu G.-Z., Li Z.-H., Fu D.-Y.* Experiments on ring wave packet generated by water drop // Chinese Sci. Bull. 2008. V. 53. № 11. P. 1634–1638.
5. *Ray B., Biswas G., Sharma A.* Regimes during liquid drop impact on a liquid pool // J. Fluid Mech. 2015. V. 768. P. 492–523.
6. *Прохоров В.Е., Чашечкин Ю.Д.* Генерация звука при падении капли на поверхность воды // Акустич. ж. 2011. Т. 57. № 6. С. 792–803.
7. *Прохоров В.Е., Чашечкин Ю.Д.* Динамика отрыва одиночных капель в воздушной среде // Изв. РАН. МЖГ. 2014. № 4. С. 109–118.

8. Чашечкин Ю.Д., Прохоров В.Е. Гидродинамика удара капли: короткие волны на поверхности венца // Докл. РАН. 2013. Т. 451. № 1. С. 41–45.
9. Ильиных А.Ю., Чашечкин Ю.Д. Гидродинамика контакта падающей капли со свободной поверхностью жидкости // Изв. РАН. МЖГ. 2016. № 2. С. 3–12.
10. Teschke O., de Souza E.F. Water molecule clusters measured at water/air interfaces using atomic force microscopy // Phys. Chem. 2005. V. 7. № 22. P. 3856–3865.
11. Ильиных А.Ю., Чашечкин Ю.Д. Гидродинамика погружающейся капли: линейчатые структуры на поверхности венца // Изв. РАН. МЖГ. 2017. № 2. С. 152–164.

Fine Structural Components of the Drop Splash

A. Yu. Ilynykh^{a, #}

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

[#] *e-mail: ilynykh@ipmnet.ru*

The fine structures of the spreading of a substance of free drop falling into a deep liquid were studied by photo-registration with high spatial and temporal resolutions. As a result, more than 500 experiments were performed in a wide range of basic dimensional parameters. For miscible liquids a discrete distribution of the droplet substance over the deformed surface of the target liquid and uniform for immiscible ones were shown. The discrete pattern is formed by a set of fine filaments – ligaments formed by droplet substance. A general scheme for the spreading of a droplet substance is proposed for the case of interaction of mixing liquid pairs. Effects of Weber and Ohnesorge numbers, the relative difference in surface tension coefficients, as well as bottom topography on the structure of the flow pattern are defined.

Keywords: droplet impact, surface tension coefficients, droplets, capillary waves, ligaments

REFERENCES

1. Thompson D.W. On Growth and Form. Cambridge: Univ. Press, 1992. 368 p.
2. Engel O.G. Crater depth in fluid impacts // J. Appl. Phys, 1996, vol. 37, no. 4, pp. 1798–1808.
3. Chashechkin Yu.D., Prokhorov V.E. The fine structure of a splash induced by a droplet falling on a liquid free surface at rest // Doklady Physics, 2011, vol. 56, no. 2, pp. 134–139.
4. Zhu G.-Z., Li Z.-H., Fu D.-Y., Experiments on ring wave packet generated by water drop // Chinese Sci. Bull., 2008, vol. 53, no. 11, pp. 1634–1638.
5. Ray B., Biswas G., Sharma A. Regimes during liquid drop impact on a liquid pool // J. Fluid Mech., 2015, vol. 768, pp. 492–523.
6. Prokhorov V.E., Chashechkin Yu.D. Sound generation as a drop falls on a water surface // Acoust. Phys, 2011, vol. 57, no. 6, pp. 807–818.
7. Prokhorov V.E., Chashechkin Yu.D. Dynamics of separation of a single drop in air // Fluid Dyn., 2014, vol. 60, no. 8, pp. 355–359.
8. Chashechkin Yu.D., Prokhorov V.E. Drop-impact hydrodynamics: Short waves on a surface of the crown // Doklady Physics, 2013, vol. 58, no. 7, pp. 296–300.
9. Ilynykh A.Yu., Chashechkin Yu.D. Hydrodynamics of a falling drop of contact with the free surface of the liquid // Fluid Dyn., 2016, vol. 51, no. 2, pp. 127–135.
10. Teschke O., de Souza E.F. Water molecule clusters measured at water/air interfaces using atomic force microscopy // Phys. Chem., 2005, vol. 7, no. 22, pp. 3856–3865.
11. Ilynykh A.Yu., Chashechkin Yu.D. Hydrodynamics of a submerging drop: lined structures on the crown surface // Fluid Dyn., 2017, vol. 52, no. 2, pp. 309–320.