

УДК 532.65

ЭВОЛЮЦИЯ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЩЕСТВА СВОБОДНО ПАДАЮЩЕЙ КАПЛИ В СМЕШИВАЮЩИХСЯ ЖИДКОСТЯХ

© 2019 г. Ю. Д. Чашечкин

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН
119526, Москва, пр. Вернадского, 101, к. 1
e-mail: chakin@ipmnet.ru

Поступила в редакцию 07.09.2018 г.
Принята к печати 28.11.2018 г.

Эволюция картины распределения вещества капли чернил свободно падающей в спокойную воду и образующей кумулятивную струйку прослежена методом высокоскоростной видеорегистрации. В фазе первичного контакта и погружения вещество капли, сливающейся с принимающей жидкостью, распределяется в форме тонких волокон, которые образуют регулярную линейчатую картину на поверхности растущего венца, и сетчатый узор, состоящий из трех-, четырех- и пятиугольных ячеек, на дне каверны. Волокнистые распределения окрашенной жидкости сохраняются на всех последующих этапах эволюции течения вплоть до образования каскада вихрей, после чего картина размывается процессами молекулярной диффузии в практически покоящейся жидкости. Формирование дискретной (волокнутой) картины распределения вещества капли связывается с компактностью области освобождения доступной потенциальной поверхностной энергии при слиянии жидкостей, которая инициирует быстрое движение тонкого слоя. Последующее сохранение волокон обеспечивает медленность процессов молекулярной диффузии.

Ключевые слова: капля, окраска, слияние, наблюдения, перенос вещества, волокна.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002-351555367-77>

ВВЕДЕНИЕ

Активность исследований течений в жидкости, образующихся при растекании свободно падающей капли, которые начинались еще в XIX в., в последние годы устойчиво возрастает. Интерес объясняется научной содержательностью задачи и многообразием приложений к описанию процессов в окружающей среде и в промышленных аппаратах, где капельные технологии получили широкое распространение. Диапазон масштабов явлений, в которых активно участвуют капли, простирается от микроскопических (локальный обмен веществами между атмосферой и гидросферой) до глобальных. В частности, «активные центры конденсации», включающие минеральные остатки высыхающих микрокапель морской воды, выносимые ветром в верхние слои атмосферы, влияют на динамику облачных систем, локальную погоду и климатическую изменчивость в целом.

В турбулентных воздушных потоках в атмосфере и технических установках капли деформируются, осциллируют, сталкиваются, слива-

ются и разбиваются (см. обзор [1]). Форма капля в целом далека от идеальной сферической. В них возбуждаются объемные колебания [2], поверхностные капиллярные волны [3], влияющие на рассеяние электромагнитных волн в широком диапазоне частот [4]. Динамическое состояние влияет на характер взаимодействия падающей капли с принимающей жидкостью, направленность и интенсивность процессов обмена веществами между атмосферой и гидросферой [5, 6], излучение звука в водную и воздушную среду [7], генерацию капиллярных волн в окружающей жидкости [8], в венце с каверной [9] и даже на поверхности погружающейся капли [10].

Капли вносят в толщу жидкости растворенные вещества, взвеси и газы, а вылетающие мелкие капельки (брызги) наоборот, выносят в атмосферу минеральные и органические вещества, химически активные соединения и биологические объекты (в частности, вирусы и бактерии, способствующие распространению инфекций [11]). Поскольку интенсивность химических реакций [12] и биологических про-

цессов зависит от характера распределения вещества капли в принимающей жидкости, определяющего эффективную площадь контактной поверхности реагирующих сред, изучение тонкой структуры капельных течений представляет и научный, и прикладной интерес.

Характер взаимодействия свободно падающей капли с принимающей жидкостью зависит от многих физических факторов — состава сред, размеров, формы и углового положения капли, величины и направления ее скорости в момент контакта, а также характера базовых течений в принимающей среде [13]. Классификация режимов течений приведена в [14].

Одним из распространенных методов изучения картины капельных течений является фоторегистрация. Информативность изображений зависит от многих факторов, в том числе от временного и пространственного разрешения инструмента, геометрии опыта. В частности, распространенная боковая фотосъемка не позволяет визуализировать тонкие детали течения на поверхности жидкости, включая линейчатые структуры, замеченные при контакте смешивающихся сред [15, 16]. Уточнение картины переноса вещества капли в покоящейся жидкости необходимо для совершенствования программ расчетов потоков веществ, параметризации процессов на контактной поверхности атмосфера–гидросфера; развития физико-химических и биологических технологий.

В работе методами высокоскоростной видеорегистрации впервые прослежена эволюция тонкой пространственной структуры картины распределения вещества свободно падающей капли в принимающей жидкости в широком диапазоне углов наблюдения. Изучается картина течения при контакте смешивающихся жидкостей.

ПАРАМЕТРЫ ЗАДАЧИ

В качестве основного параметра, характеризующего жидкость (или газ) используется один их термодинамических потенциалов, в частности, потенциал Гиббса (свободная энтальпия) [17]

$$dG = -sdT + VdP + S_b d\sigma + \mu_i dS_i. \quad (1)$$

Производные (1) определяют энтропию $s = -\left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_{P, S_b, S_i}$, плотность среды $\rho = \frac{1}{V} = \left(\frac{\partial G}{\partial P}\right)_{T, S_b, S_i}^{-1}$, коэффициент поверхностного натяжения σ ,

химический потенциал раствора веществ с концентрацией S_i i -ой компоненты $\mu_i = \left(\frac{\partial G}{\partial S_i}\right)_{T, P, S_b}$ (здесь T — температура, P — давление, S_b — площадь контактной поверхности границы раздела фаз). Значения термодинамических величин определяют физическое состояние взаимодействующих сред.

Термодинамические потенциалы в неоднородной жидкости со свободной поверхностью распределены неравномерно. Экспериментальными методами (оптической и рентгеновской рефлектометрии, атомно-силовой микроскопии) установлено, что плотности, диэлектрические проницаемости, дипольные моменты в толще жидкости и в структурно выделенном приповерхностном слое толщиной порядка размера молекулярного кластера ($\sim 10^{-6}$ см) заметно отличаются [18, 19].

Анизотропия атомно-молекулярных взаимодействий в областях с большими градиентами термодинамических величин (в частности, на концентрационных прослойках и около свободной поверхности) приводит к формированию доступной потенциальной поверхностной и химической энергии, которая может трансформироваться в другие формы — тепловую, механическую энергию течения жидкости, работу по созданию новой свободной поверхности. Обмен энергией в жидкости происходит с несколькими скоростями — достаточно медленно в диссипативных (диффузионных) процессах; более быстро — в вынужденных течениях; с собственными групповыми скоростями при распространении волн и наиболее быстро при прямом проявлении действия атомно-молекулярных процессов [15].

Динамика течений жидкостей описывается системой уравнений переноса вещества, плотности, импульса и полной энергии — аналогов законов сохранения для замкнутых систем [20, 21] с физически обоснованными граничными условиями на контактных поверхностях, которые здесь для краткости не приводятся. С высоким рангом системы фундаментальных уравнений для слабо диссипативных сред, связано существование тонкоструктурных компонентов периодических и нестационарных течений (классификация приведена в [21, 22]).

В число определяющих физических (термодинамических и кинетических) величин, харак-

теризующих процессы взаимодействия капли с жидкостью, которые определяются уравнениями механики и граничными условиями [20–22], входят плотности контактирующих сред (капли ρ_d , принимающей жидкости ρ_t и воздуха ρ_a , далее $\rho_{a,d,t}$); динамические $\mu_{a,d,t}$ и кинематические $\nu_{a,d,t} = (\mu/\rho)_{a,d,t}$ вязкости; полные σ_d^a и σ_t^a , а также нормированные на плотность сред $\gamma_d^a = \sigma_d^a/\rho_d$ и $\gamma_t^a = \sigma_t^a/\rho_t$ коэффициенты поверхностного натяжения; коэффициент диффузии красящего вещества капли в принимающей жидкости κ . Большая теплоемкость воды позволяет принять температуры всех сред неизменными и равными комнатной.

В данных опытах капля диаметром $D = 5$ мм (площадь поверхности S , объем V и масса M , доступная потенциальная поверхностная энергия $E_s = \sigma_d^a S$) падала с высоты $H = 70$ см с ускорением свободного падения g (скорость в момент контакта с поверхностью принимающей жидкости составляла $U = 3.6$ м/с, кинетическая энергия $E = MU^2/2$). Хотя доля поверхностной энергии E_s , распределенной в приповерхностном шаровом слое толщиной порядка молекулярного кластера $\delta_s \sim 10^{-6}$ см и массой M_c в полном балансе энергии невелика (в условиях данных опытов составляет около 1% от кинетической энергии капли E), ее объемная плотность, существенно выше, чем у кинетической — соответствующее отношение $R_w = E_s M / EM_c \sim 1000$ [16]. Данный компонент энергии играет важную роль в формировании картины течения на этапе погружения падающей капли.

Физические параметры определяют значения характерных масштабов времени и длины, которые задаются только физическими свойствами сред или зависят от размера и скорости капли. В данной задаче они разделяются на несколько групп.

Первая группа линейных масштабов включает капиллярно-гравитационную длину $\delta_g^\gamma = \sqrt{\gamma/g}$, входящую в дисперсионное уравнение коротких поверхностных волн [20], и диссипативно-капиллярные масштабы $\delta_\gamma^v = \nu^2/\gamma$, $\delta_\gamma^\kappa = \kappa^2/\gamma$. Встречаются и другие масштабы, типа $\delta_g^v = \sqrt[3]{\nu^2/g}$ [23], которые могут рассматриваться как производные базовых масштабов, $\delta_g^v = \sqrt[3]{\delta_\gamma^v (\delta_g^\gamma)^2}$. Вторая группа линейных масштабов, зависящих от скорости капли, включает прандтлевы $\delta_U^v = \nu/U$ и $\delta_U^\kappa = \kappa/U$, а также капиллярный $\delta_U^\gamma = \gamma/U^2$ масштабы.

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

В маловязких средах значения масштабов существенно различаются. В частности, для воды при $\gamma = 72$ см³/с² экстремальные масштабы длины равны $\delta_{\min} = \delta_\gamma^v = 1.37 \cdot 10^{-6}$ см и $\delta_{\max} = \delta_g^\gamma = 0.27$ см, соответственно, а временные масштабы — $\tau_{\min} = \tau_\gamma^v = 1.9 \cdot 10^{-10}$ с и $\tau_{\max} = \tau_\gamma^d = 3.2 \cdot 10^{-2}$ с.

Отношения параметров также образуют характерные скорости $U_v^\gamma = \gamma/\nu$ и $U_\kappa^\gamma = \gamma/\kappa$, которые используются при параметризации изучаемых процессов.

Отношения масштабов образуют безразмерные параметры (числа): Рейнольдса $Re = UD/\nu_d$, Фруда $Fr = U^2/gD$, Вебера $We = U^2 D/\gamma_d^a$, Бонда $Bo = D^2/(\delta_g^\gamma)^2 = gD^2/\gamma_d^a$, Онезорге $Oh = \sqrt{\delta_\gamma^v/D} = \nu/\sqrt{\gamma D}$ так называемое капиллярное отношение $Ca_U^v = U_d/U_v^\gamma$, $Ca_U^\kappa = U_d/U_\kappa^\gamma$, а также числа Прандтля $Pr = \nu/\kappa_T$, Шмидта $Sc = \nu/\kappa$ и Левиса $Le = \kappa_T/\kappa$, значения которых для большинства водных растворов, заметно превышают единицу (κ_T — коэффициент температуропроводности). Влияние отдельных параметров анализируется во многих работах, однако роль всей совокупности безразмерных отношений остается недостаточно изученной.

Масштабы определяют требования к технике экспериментов, которая должна обеспечивать регистрацию крупных элементов и разрешать короткоживущие тонкоструктурные компоненты. В настоящих опытах пространственное и временное разрешения составляет 0.1 мм и 200 мкс, соответственно.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Опыты выполнены на стенде ЭСП «ГФК ИПМех РАН», основным элементом которого является прямоугольный прозрачный бассейн размером 140 × 40 × 60 см с парными оптическими иллюминаторами в боковых стенках [24]. Регистрация картины течения проводилась высокоскоростной видеокамерой

Optronis CR3000x2. Капли создавались с помощью дозатора, установленного на высоте 70 см. Область контакта сред освещалась двумя прожекторами MultiLed. Более подробное описание установки приведено в [25].

Бассейн заполнялся дегазированной водопроводной водой, в которую из дозатора падали капли разбавленных растворов ализариновых чернил синего, черного или фиолетового цвета. Падающая капля прерывала фотозатвор, сигнал которого с задержкой, регулируемой по высоте установки дозатора, запускал компьютер. Полученные данные обрабатывались по специализированным математическим программам.

Для приведения видеоданных к физической шкале в поле зрения камер помещался маркер с известными размерами, которые при программной обработке использовались для автоматического определения размеров изучаемых объектов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Эволюцию картины течения иллюстрирует выборка из видеофильма, представленная на рис. 1. Первичный контакт всюду выпуклой капли и принимающей жидкости сопровождается образованием тонкой кольцевой пелены и семейства 38 тонких радиальных струек (стримеров) практически одинаковой длины (рис. 1а). Основная часть стримеров ориентирована радиально из центра области контакта жидкостей, однако некоторые, образованные слиянием двух сходящихся струек, — наклонно (наиболее выражены в угловых положениях на 4, 6 и 10 часов). Расходящиеся стримеры видны в направлении на 2 часа. Стримеры утончаются к вершинам. Одновременно со стримерами из кольцевого зазора между погружающейся каплей и поверхностью жидкости выталкивается воздух, движущийся быстрее, чем граница формирующейся каверны и венца.

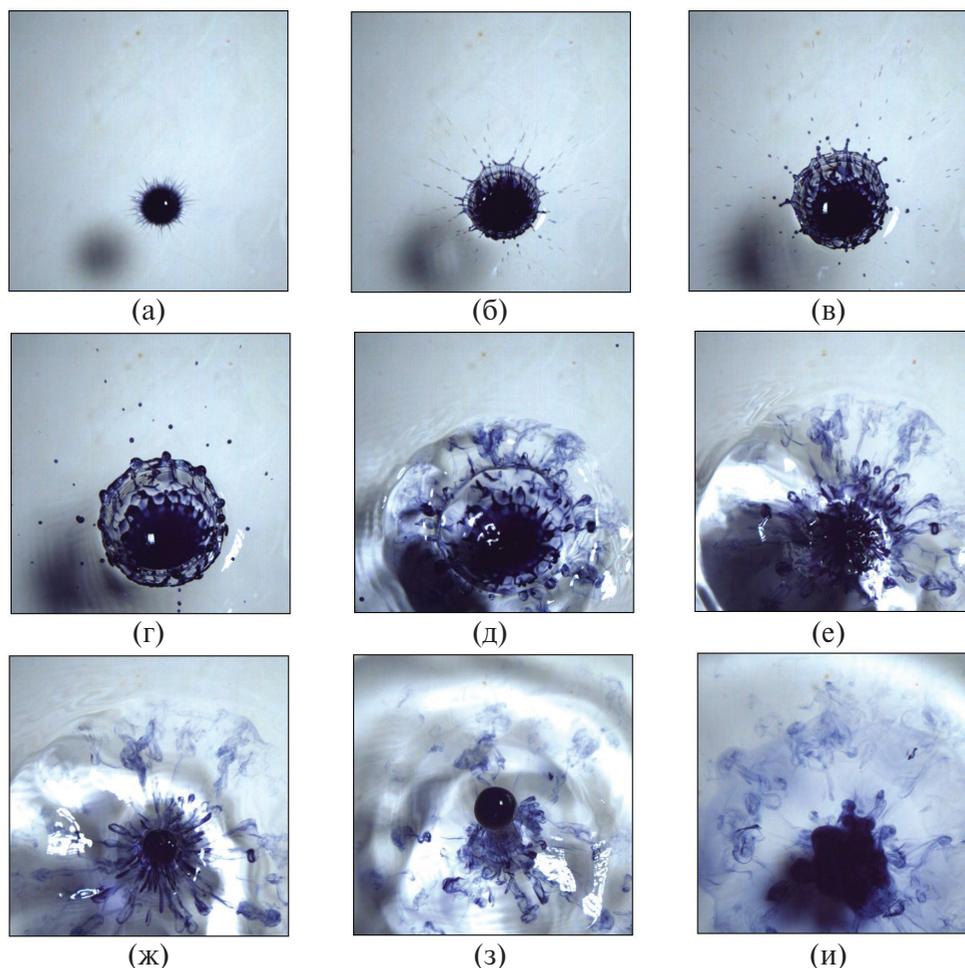


Рис. 1. Эволюция картины распределения красителя (капля синих чернил падает в глубокую воду, $D = 0.5$ см, $U = 4$ м/с): (а)–(и) $t = 0.5, 2.0, 4.5, 10.9, 37.1, 45.8, 55.1, 108.0, 396.9$ мс.

На одних участках стримеры контактируют с внешней кромкой пелены (6–9 часов), на других пелена отсутствует. Неравномерность пелены и радиальных размеров стримеров указывает на отклонение формы капли в момент контакта от сферической. По данным высокоскоростной (20000 к/с) регистрации скорость концов стримера достигает 30 м/с при $t = 50$ мкс и заметно превышает скорость капли $U = 4$ м/с.

Погружающаяся капля продавливает поверхность жидкости и формирует каверну — впадину, оконтуренную кольцевым венцом, выступающим над невозмущенным уровнем принимающей жидкости (рис. 1б, $t = 2$ мс, основная часть капли слилась с принимающей жидкостью). Сохраняющаяся четкость изображения масштабной сетки на дне бассейна, показывает, что донная часть погружающейся капли сохраняет свою невозмущенную форму.

На вершинах зубцов — выступов на кромке венца, к которому подтекают волокна окрашенной жидкости капли, располагаются утончающиеся к внешним концам стримеры. Их число (здесь — 19) прогрессивно уменьшается по мере погружения капли. Продолжения стримеров — последовательности вылетающих с их вершин мелких капелек (брызг), представлены на фотографии семействами штрихов.

С удалением от стримера длина штрихов растет, а толщина убывает. соответственно скорости вновь вылетающих капелек прогрессивно уменьшаются, а диаметры растут. Контур отрывающихся капелек (брызг) наиболее четко видны на вершинах стримеров.

В картине брызг выражена зональная структура — в радиальном направлении наблюдается несколько кольцевых участков с повышенными и пониженными значениями числа капелек, достаточно синхронно вылетающих с разных стримеров, что указывает на существование колебательных процессов, охватывающих весь венец.

Последовательности мелких капелек, вылетающие с вершин стримеров, преимущественно располагаются вдоль радиальных прямых (хотя линии разлета двух капелек отклоняются от радиального направления в положении на «9 часов»). Линейность траекторий брызг указывает на отсутствие азимутальных течений на кромке венца.

На поверхности неравномерно окрашенной каверны и растущего венца вещество капли располагается, в основном, в виде отдельных тонких волокон толщиной 0.1–0.5 мм. В верхней

части каверны волокна образуют регулярную полосчатую структуру, которая сменяется сетчатой, составленной из трех-, четырех- и пятиугольных ячеек, на ее дне (рис. 1б).

Некоторые волокна, с которыми связаны основания стримеров, подходят к вершинам зубцов на кромке венца (шевроне) и обеспечивают частичную окраску вылетающих капелек. Рассмотрение увеличенных изображений брызг показывает, что они включают обе сливающиеся жидкости, разделенные резкой границей. На кромке шеврона венца и кольцевой границе контакта каверны и венца наблюдается повышенная концентрация пигмента.

По мере роста глубины на дне каверны образуется все более сложная картина распределения пигмента (рис. 1в, $t = 4.5$ мс). В ней выражены окрашенные линейчатые участки и области пониженной плотности окраски нерегулярной формы. Число выбрасываемых капелек стримеров уменьшаются (здесь — 13), диаметры брызг продолжают увеличиваться, синхронизация выбросов теряется.

На более поздних стадиях эволюции венца зубцы шеврона скругляются — здесь остается их 10. От верхней кромки венца к каверне начинает сбегать группа капиллярных волн, амплитуда которых растет по мере продвижения (рис. 1г, $t = 10.9$ мкс, картина волн на поверхности венца более детально изучена в [9]). В увеличенном изображении нижней части венца начинают прослеживаться окрашенные округлые выступы — оголовки растущих в окружающую жидкость тонких струек с вихревым оголовком — лигаментов [21, 22]. Их появление свидетельствует о сложном трехмерном характере течения и на границе структурных элементов, и вблизи стенок каверны.

Постепенно рост венца прекращается, и он начинает расплываться. От его внешней кромки уходит система кольцевых капиллярных волн (рис. 1д, $t = 37.1$ мс). Волнистая форма фазовых поверхностей волн отражает неравномерность распределения скорости растекания венца.

Цветные волокна на остатках венца образует систему вихревых колец и петель, связанных тонкими нитями с окрашенными участками каверны. Между группами вихревых структур и плотно окрашенной областью в центре каверны располагается зональный участок, в котором выражены линейчатые и мелкие кольцевые элементы. Стенки каверны образуют четко очерченную границу области перехода к остатку венца.

Со временем впадина в центре течения сменяется растущим сферическим выступом — оголовком формирующейся кумулятивной струи с сложной картиной распределения окрашенных волокон. Центральная область окружена кольцом более светлой жидкости, подтекающей из нижележащих горизонтов (рис. 1е, $t = 45.8$ мкс). Светлое кольцо окружено двумя круговыми рядами мелких колец с двойными линейными следами, прорисовывающими линейную траекторию их движения. Волокна на периферии течения начинают размываться. Контрастность данной части течения падает.

В стадии формирования кумулятивной струи со сферическим оголовком окрашенная жидкость собирается в регулярно расположенные петли (рис. 1ж, $t = 55.1$ мкс), форма и размеры которых быстро меняются по мере эволюции картины течения. Сходящее течение растягивают радиально расположенные кольцевые вихри и их следы — пары окрашенных волокон. В то же время, отдельные вихорьки удаляются от центра (один из них — в направлении на «3 часа»).

На стадии распада кумулятивной струи значительная часть пигмента собирается в отрывающейся капле (рис. 1з, $t = 108.0$ мкс). Наряду с линейчатыми структурами и вихрями на поверхности, в жидкости возникают диффузно окрашенные области, площадь которых постепенно увеличивается. На увеличенном изображении видно, что в основании кумулятивной струи присутствуют кольцевые структуры как с вертикальной, так и с горизонтальной ориентацией.

На поздних стадиях картина распределения пигмента теряет регулярность, контуры элементов в центральной части расплываются (рис. 1и). На границе центральной плотно окрашенной области продолжается формирование отдельных мелких завитков. К ней примыкает кольцевая область с пониженной концентрацией красителя, которую окаймляет более плотно окрашенное внешнее кольцо. На периферии течения видны грибовидные структуры — типичные следы движения мелких вихрей.

Тонкоструктурное распределение вещества капли в принимающей жидкости в форме тонких волокон наблюдались во всех фазах эволюции течения, начиная с первичного контакта и вплоть до формирования и распада кольцевых вихрей, во всех проведенных опытах (более 500)

с различными хорошо растворимыми красителями (соли металлов, пигменты, кислоты).

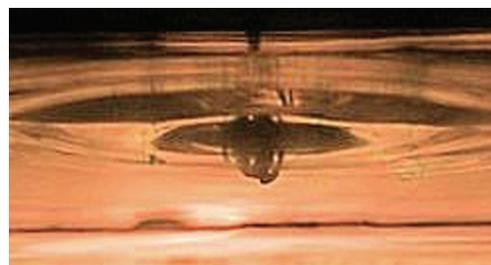
Для иллюстрации сложности трехмерной картины распределения вещества капли на стадии выраженной кумулятивной струи приводятся фотографии картины течения в стеклянной чашке Петри ($12 \times 12 \times 1.5$ см) — рис. 2. Съемка производилась снизу под углом 15° к свободной поверхности. Это позволяло одновременно регистрировать вид течения сбоку (рис. 2а) и в плане в отраженном от дна изображении свободной поверхности (рис. 2б).

В боковом изображении над плотно окрашенной кумулятивной струей располагаются четыре последовательно выброшенные капли, совершающие сложные колебания, что проявляется в различиях их форм [3]. Под струйкой располагаются остатки уплощенного пьедестала. В толще принимающей жидкости под основанием кумулятивной струйки находятся несколько окрашенных петель (рис. 2, 3).

В сложном рельефе свободной поверхности выражены капиллярные волны, имеющие наибольшую длину на остатке венца, а также гребни и впадины неправильной формы на дне ложбины (рис. 2б). Группа окрашенных волокон занимает ограниченную область в основании



(а)



(б)

Рис. 2. Синхронные фотографии картины течения, вызванного падением капли разбавленных синих чернил в воду в фазе выброса последовательности вторичных капель с вершины кумулятивной струйки: (а) — вид сбоку, (б) — вид снизу на свободную поверхность (изображение инвертировано).



Рис. 3. Текстура поверхностей кумулятивной струи и конического пьедестала при падении капли воды в воду.

кумулятивной струи. Следы вихревых колечек на периферии изображения в данной проекции выглядят размытыми.

Тонкие детали неоднородной текстуры свободной поверхности кумулятивной струи, порожденной падающей в воду каплей чистой воды, визуализированы на рис. 3. На заостренной вершине струи располагается отрывающаяся капля. Поверхность струйки выглядит гладкой. В то же время плотная окраска нижней части в контрасте со светлой в верхней части указывает на присутствие микрорельефа.

Собственно струя отделена от конического пьедестала прослойкой, которой соответствует прозрачный диск и светлая полоска на разделяющей границе (именно в этом сечении толщина струйки минимальна на рис. 2а). Изображение боковой поверхности пьедестала, в котором выражены протяженные волокна (риблеты в англоязычной литературе), отражает регулярность микрорельефа. Пьедестал находится в центре остаточного углубления с гладкими впадинами и более острыми гребнями (рис. 3).

Картины течений, возникающие при падении капель воды, окрашенных ализариновыми чернилами синего, черного или фиолетового цветов, в воду (рис. 4), позволяют проследить влияние вида пигмента. В левой колонке приведены фотографии, а в правой — графики спектров линейных масштабов, рассчитанные по флуктуациям освещенности вдоль выделенной дуги, также показанной на фотографиях. Спектры на рис. 4 даны в полулогарифмической шкале, позволяющей выделить малоcontrastные вариации в распределении красителя.

В картинах углового распределения нормированной освещенности (вставки $Y(\alpha)$) выражены

нерегулярные контрастные пики, более частые для синего и черного пигментов, и существенно более редкие — для фиолетового. Все спектры S , приведенные в линейной шкале Λ , носят, преимущественно, линейчатый характер. Пиковым значениям на больших масштабах (2 мм) соответствуют расстояния между окрашенными полосками на фотографиях, а малым (0.1 мм) — поперечные размеры окрашенных волокон.

Вариабельность длин окрашенных микроструек L отражает неравномерность распределения механической энергии в центральной области течения и кратковременность процессов их формирования. Сложная геометрия течения указывает на многообразие процессов, одновременно влияющих на перенос вещества в области падения капли.

На рассмотренных стадиях эволюции в картине течения представлены преимущественно планарные линейчатые структуры. Следует отметить, что на поздних стадиях выражены трехмерные кольца и деформированные петли. На всех стадиях эволюции течения сохраняются волокнистые тонкие и сверхтонкие структуры.

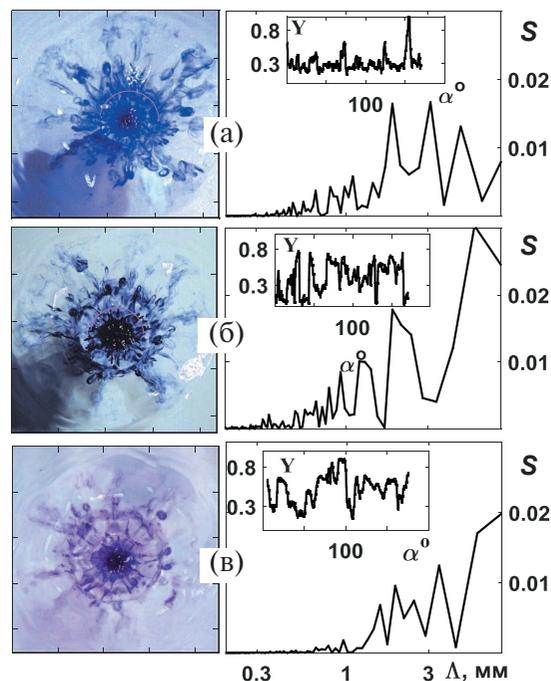


Рис. 4. Тонкая структура течения на поверхности жидкости при $t = 44$ мс. Левая колонка — фотографии течений, радиус окрашенной дуги отсчета $R = 6.2$ мм: (а)–(в) — следы капель, окрашенных синим, черным и фиолетовым пигментом. Правая колонка — графики зависимости пространственных спектров S от масштаба Λ , рассчитанные по нормированным на собственный максимум флуктуациям освещенности Y , значения которой вдоль отсчетной дуги приведены на врезках (угол α отсчитывается от центральной горизонтали против часовой стрелки).

На стадии выраженной кумулятивной струи со сферическим оголовком в картине окрашенных волокон, колечек и петель выражена зональная структура (рис. 5). Во внешнем кольце (средний радиус 15 мм) располагаются наиболее крупные вихорьки — оголовки восьми тонких струек (лигаментов), вылетевших на ранней стадии течения (рис. 5а, синий краситель). Ближе к центру на расстоянии 3.5 мм расположены вытянутые в радиальном направлении окрашенные петли с типичными размерами 3.5 мм (продольный) и 0.8 мм (поперечный).

На внешней поверхности конического пьедестала располагаются тонкие волокна, соединяющие внешние вихревые кольца с центральным ядром течения, и собственное семейство сильно деформированных вихревых колец. Все указанные элементы течения характеризуются тонкой волокнистой структурой на фоне диффузной окраски всей области течения (каждый эксперимент проводился с полным обновлением принимающей жидкости — чистой воды).

Основные особенности дискретного распределения примеси сохраняются и при растекании капли, окрашенной черными чернилами (здесь волокна тоньше, рис. 5б).

Волокнистые структуры наблюдаются и при растекании капли, окрашенной фиолетовыми чернилами (рис. 5в). Во внешнем кольце (средний радиус 18 мм) насчитывается девять остатков вихревых колечек. Более плотно окрашенные колечки расположены на радиусах от 7 до 12 мм в направлении 11–15 часов. Основание кумулятивной струи покрыто деформированными петлями и отдельными волокнами. К нему примыкает охватывающее кольцо толщиной 5 мм с пониженной концентрацией красителя.

На увеличенном изображении (рис. 5в, вставка) заметны сверхтонкие (толщиной около 0.2 мм) структуры соединительных волокон, плотность окраски которых заметно различается. Угловые распределения размеров, приведенные на рис. 4 (правая колонка), указывают на слабую изменчивость поперечников вихрей Δ и сильную немонотонную вариабельность длин соединительных нитей L , что свидетельствует о существенном влиянии тонких компонентов течения — лигаментов с толщиной порядка диаметра волокон — на общую геометрию течения.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенные опыты показывают, что во всех случаях вещество капли распределяется в принимающей жидкости неравномерно с образова-

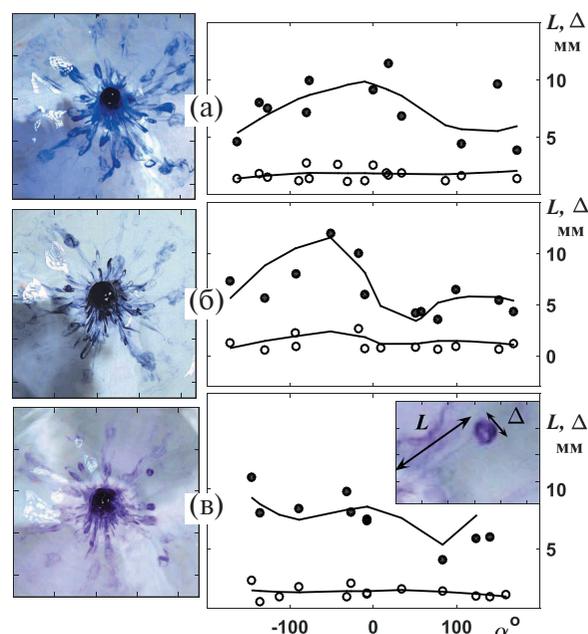


Рис. 5. Следы окрашенных капель в чистой воде при $t = 57$ мс: (а)–(в) — картины течения с каплями, подкрашенными синими, черными и фиолетовым чернилами, длины радиальных нитей L (\bullet) и максимальные диаметры Δ (\circ) вихревых колечек. Деления на границах фото с шагом 10 мм (левая колонка), на вставке (в) в правой колонке — с шагом 2 мм. Сплошные линии — осреднение.

нием сложных линейчатых структур, вытянутых в радиальном направлении на периферии течения, и концентрируются на границах многоугольников на дне каверны. Кольцевая геометрия указывает на циклическое изменение скорости течения в процессе формирования структур.

Механизм гидродинамической трансформации объемного распределения вещества в тонкие линейчатые и планарные структуры связан с неоднородностью распределения компонентов внутренней энергии, включающей доступную потенциальную энергию, в течениях со свободной поверхностью, а также с независимостью эволюции базовых характеристик течений жидкости — массы, импульса и концентрации растворенных компонентов.

В ходе погружения капли в первичном пятне контакта, толщиной порядка 10^{-6} см, происходит уничтожение свободных поверхностей сливающихся жидкостей и трансформация доступной потенциальной энергии в другие формы за времена порядка 10^{-9} с. Скачок термодинамического потенциала сопровождается локальным увеличением давления и температуры, которые вызывают выброс тонкого слоя жидкости в воздух, течения вдоль поверхности и генерацию высокочастотного звукового импульса [25].

Процесс освобождения поверхностной энергии, продолжающийся в кольце шириной 10^{-6} см в окрестности линии контакта поверхностей сливающейся капли и принимающей среды, образует течение в тонком приповерхностном слое. Ускоренная жидкость распространяется в форме стримеров в воздухе и тонких струек в тонком подповерхностном слое.

С учетом скорости капли время уничтожения первичного пятна в момент контакта составляет около 60 нс, что на несколько порядков меньше времени полного погружения капли (1.2 мс). Оценки толщины области взаимодействия сред согласуются с масштабом $\delta_\gamma^v = 1.3 \cdot 10^{-6}$ см, который по порядку величины близок к размеру молекулярного кластера [18, 19], а длительность взаимодействия — с временным масштабом $\tau_\gamma^v = 1.8 \cdot 10^{-10}$ с. Делокализация течения в стримере проявляется в постепенном увеличении диаметра вылетающих капелек (брызг).

В начальной фазе, вплоть до погружения половины капли, линия контакта движется от центра к границе каверны по гладкой поверхности. При этом в области слияния площадь свободной поверхности убывает, и вся потенциальная поверхностная энергия сливающихся сред трансформируется в возмущения давления, температуры и в энергию механического движения. Тонкая область с высокой плотностью энергии определяет детали геометрии общего течения, которое создается вносимым импульсом и кинетической энергией капли.

Энергичное локальное воздействие приводит к формированию и крупных компонентов течения (каверны, венца, капиллярных волн) и тонких струек — лигаментов, стримеров и капелек, поперечные размеры которых определяются кинетическими коэффициентами и характерной скоростью локального течения $\delta_u^v = v/u$ $\delta_u^k = \kappa/u$ [21, 22]. Скорости брызг (порядка 30 м/с в данных опытах) и приведения капли ($U = 3.6$ м/с в данных опытах) различаются почти на порядок, что обусловлено краткостью процесса слияния, обеспечивающей сохранение выделившейся энергии в тонком приповерхностном слое.

После погружения половины капли линия контакта капли и принимающей жидкости возвращается к центру течения по возмущенной среде. При этом одновременно уничтожается контактная поверхность капли и формируется новая открывающегося дна каверны. Соответственно меняется и характер те-

чения — если в фазе погружения головной половины жидкость капли распределялась по дну каверны в форме прямолинейных радиальных струек, то теперь они ориентированы достаточно произвольно, углы вылета меняются и, как следствие, окрашенная жидкость формирует сетчатый узор с трех-, четырех-, и пятиугольными ячейками с прямыми сторонами.

Тонкие струйки (лигаменты), длительное время сохраняющиеся в картине течения, постепенно тормозятся, оставляя окрашенные следы — двойные прямолинейные волокна. Их оголовки образуют системы мелких колечек диаметром 1–2 мм. Длительное существование тонких структур течений обусловлено отсутствием перемешивания и малостью диссипативных коэффициентов. Образовавшиеся в результате первичного контакта интенсивные подводные течения участвуют в отрыве и последующем переносе излучающих звук газовых полостей [25].

Непрерывность картины распределения энергии и импульса и дискретность распределения окрашивающего вещества погружающейся капли в слабодиссипативных средах является следствием независимости фундаментальных переменных в течениях жидкостей с неоднородным распределением внутренней энергии. С увеличением вязкости контрастность картины распределения красителя уменьшается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые экспериментально прослежена эволюция элементов дискретной картины распределения вещества окрашенной капли в принимающей жидкости, иллюстрирующая длительное существование тонких струек — лигаментов. На шевроне, боковой поверхности венца и каверны окрашенные волокна образуют линейчатые структуры, на дне каверны формируют сетку из многоугольников. С вершин зубцов пигмент капли попадает в тонкие радиальные стримеры и вылетающие брызги.

Со временем картина распределения приреси усложняется, в добавление к линейчатым волокнам появляются плоские вихревые петли и небольшие объемные вихревые кольца. Дискретный характер распределения красителя в принимающей жидкости сохраняется длительное время, включая фазу распада каскада вихревых колец.

Качественно волокнистая картина течения, визуализированная в данных опытах с тремя ви-

дами ализариновых чернил (синими, черными и фиолетовыми) сохраняется и для капель, подкрашенных другими веществами, растворы которых смешиваются с водой (солями металлов, кислотами и др.).

Благодарности. Автор благодарен В.Е. Прохорову за помощь в проведении опытов и неизвестному рецензенту за ценные замечания

Источник финансирования. Работа выполнена по теме АААА-А18-118011990267-5 государственного задания при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект 18-05-00870). Эксперименты проведены на стенде ЭСП УИУ «ГФК ИПМех РАН».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Szakall M., Mitra S.K., Diehl K., Borrmann S. Shapes and oscillations of falling raindrops — a review // Atmos. Res. 2010. V. 97. P. 416–425. doi 10.1016/j.atmosres.2010.03.024
2. Strutt J.W. (3rd Baron Rayleigh) On the capillary phenomena of jets // Proc. R. Soc. London. 1879. V. 29. P. 71–97.
3. Кистович А.В., Чашечкин Ю.Д. Поверхностные колебания свободно падающей капли идеальной жидкости // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54. № 2. С. 206–212. doi: 10.7868/S0003351518020095
4. Горелик А.Г., Стерлядкин В.В. Влияние вибрации дождевых капель на поляризационные характеристики радиоэха // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1989. Т. 25. № 9. С. 960–968.
5. Veron F. Ocean Spray // Annual Review of Fluid Mechanics. 2015. V. 47. P. 507–538. doi: 10.1146/annurev-fluid-010814-014651
6. Monahan E.C., Staniec A., Vlahos P. Spume Drops: Their Potential Role in Air-Sea Gas Exchange // J. Phys. Oceanology. 2017. V. 122. Iss. 12. P. 9500–9517. doi: 10.1002/2017JC013293
7. Прохоров В.Е., Чашечкин Ю.Д. Подводные и воздушные звуковые сигналы при падении капли на поверхность жидкости // ДАН. 2012. Т. 443. № 5. С. 570–575. doi: 10.1134/S1028335812040076
8. Zhu G.Z., Li Z.H., Fu D.Y. Experiments on ring wave packet generated by water drop // Chinese Science Bulletin. 2008. V. 53. № 11. P. 1634–1638. doi: 10.1007/s11434-008-0246-0
9. Чашечкин Ю.Д., Прохоров В.Е. Гидродинамика удара капли: короткие волны на поверхности венца // ДАН. 2013. Т. 451. № 1. С. 41–45. doi: 10.1134/S1028335813070021
10. Ильиных А.Ю., Чашечкин Ю.Д. Гидродинамика контакта падающей капли со свободной поверхностью жидкости // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2016. № 2. С. 3–12. doi: 10.7868/S0568528116020092
11. Fitt B.D.L., McCartney H.A., Walkalate P. The role of rain in dispersal of pathogen inoculum // Annual Review of Phytopathology. 1989. V. 27. P. 241–270. doi: 10.1146/annurev.py.27.090189.001325
12. Liu H., Dasgupta P.K. Analytical chemistry in a drop // Trends in Analytical Chemistry. 1996. V. 15. № 9. P. 468–475. doi: 10.1016/S0165-9936(96)00065-9
13. Степанова Е.В., Чаплина Т.О., Трофимова М.В., Чашечкин Ю.Д. Структурная устойчивость процесса переноса вещества из компактного пятна в составном вихре // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48. № 5. С. 578–590. doi: 10.1134/S000143381205009X
14. Ray B., Biswas G., Sharma A. Regimes during liquid drop impact on a liquid pool // J. Fluid. Mech. 2015. V. 768. P. 492–523. doi: 10.1017/jfm.2015.108
15. Чашечкин Ю.Д. Капли: короны, всплески, звуки... // Природа. 2016. № 11. С. 13–23.
16. Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю. Полосчатые структуры в картине распределения вещества капли по поверхности принимающей жидкости // ДАН. 2018. Т. 481. № 2. С. 282–287. doi: 10.1134/S1028335818070066
17. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Статистическая физика. Часть I. М.: Наука. ГРФМЛ, 1976. 584 с. (т. V).
18. Pang X.-F. Water: Molecular Structure and Properties. Singapore: World Scientific. 2014. 472 p.
19. Эйзенберг Д., Кауцман В. Структура и свойства воды. Л-д: Гидрометеиздат. 1975. 280 с. 20.
20. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. Теоретическая физика: т. VI. (3-е изд., перераб. — М.: Наука. Гл. ред. физ-мат. лит., 1986. 736 с. 21.
21. Chashechkin Yu.D. Singularly perturbed components of flows — linear precursors of shock waves // J. Math. Model. Nat. Phenom. 2018. V. 13. № 2. P. 1–29. doi: 10.1051/mmnp/2018020
22. Chashechkin Yu.D. Waves, vortices and ligaments in fluid flows of different scales // Physics & Astronomy International Journal. 2018. V. 2(2). P. 105–108. doi: 10.15406/paij.2018.02.00070
23. Эртель Г. мл. Путеводитель Прандтля по гидродинамике. М. — Ижевск: НИЦ РХТ. 2007. Т. V. С. 24.
24. Гидрофизический комплекс для моделирования гидродинамических процессов в окружающей среде и их воздействия на подводные технические объекты, а также распространения примесей в океане и атмосфере (ГФК ИПМех РАН) // <http://www.ipmnet.ru/uniquequip/gfk/>
25. Чашечкин Ю.Д., Прохоров В.Е. Структура первичного звукового сигнала при столкновении свободно падающей капли с поверхностью воды // ЖЭТФ. 2016. Т. 149. № 4. С. 864–875. doi: 10.1134/S1063776116020175

Evolution of the Fine Structure of the Pattern of the Distribution of a Substance of the Free-Fall Droplet in Mixing Liquids

Yu. D. Chashechkin

*Ishlinsky Institute for Problems of Mechanics, RAS
prospect Vernadskogo, 101/1, Moscow 119526, Russia
e-mail: chakin@ipmnet.ru*

Received: 07.09.2018

Accepted: 28.11.2018

The evolution of the pattern of the substance of a drop of ink falling freely into quiet water in the mode of formation of a cumulative back jet stream was traced by high-speed video recording. In the phase of primary contact and coalescence, the pigment of the drops merging with the targeted fluid is distributed in the form of fine fibers (ligaments), which form a regular striped pattern on the surface of the growing crown, and a net pattern consisting of three-, four- and pentagonal cells at the bottom of the cavity. The fibrous distributions of the substance droplets was saved at all subsequent stages of the evolution of the flow until the formation of a cascade of vortices, after which the picture is blurred by the processes of molecular diffusion in a practically quiescent liquid. The formation of a discrete (fibrous) pattern of the distribution of the substance of a drop is associated with the compactness of the region of release of the available potential surface energy during the confluence of liquids, which initiates a fast movement of a thin layer. Subsequent preservation of fibers ensures the slowness of molecular diffusion processes.

Keywords: drop, color, merge, observation, substance transfer, fibers.