

УДК 532.5

ПЕРЕНОС ВЕЩЕСТВА КАПЛИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ПЕРВИЧНОЙ КАВЕРНЫ

© 2023 г. Ю. Д. Чашечкин^{1,*}, А. Ю. Ильиных^{1,**}

Представлено академиком РАН В.Ф. Журавлевым 04.04.2022 г.

Поступило 04.04.2022 г.

После доработки 04.04.2022 г.

Принято к публикации 09.06.2022 г.

Методами скоростной видеорегистрации впервые прослежен перенос вещества свободно падающей капли в покоящуюся принимающую жидкость на этапе формирования первичной каверны. В опытах капли воды, разбавленного в соотношении 1:100 раствора чернил или насыщенного раствора пищевой соды диаметром $D = 0.43$ см падали со скоростью $U = 3.1$ м/с в воду или 20%-й раствор роданида аммония в режиме формирования всплеска. Во всех опытах стенку растущей каверны пронизывают тонкие волокна, содержащие вещество капли, которые образуют промежуточный тонкоструктурный слой. После окончания стадии роста волокон продолжительностью 7–8 мс и диффузионного сглаживания градиентов концентрации, вокруг растущей каверны образуется слой жидкости промежуточной плотности толщиной от 1.5 до 0.7 мм. Слой отделен резкой границей от принимающей жидкости. Новая группа наклонных волокнистых петель образуется в следе за схлопывающейся каверной.

Ключевые слова: капля, каверна, волокна, промежуточный слой

DOI: 10.31857/S2686740022060062, **EDN:** TJYXUK

Первичная каверна, осесимметричная полость с гладкой поверхностью в центре выступающего венца, визуально наблюдалась еще в первых опытах с искровым освещением [1]. Длительное время изучалась геометрия течений, создаваемых каплями воды в пресной воде в различных условиях. Для получения контрастных изображений применялось встречное освещение (“на просвет”), подчеркивающее четкость контура растущей каверны.

Максимальная глубина каверны в глубокой жидкости рассчитана в [2], зависимости размеров каверны и всплеска от времени прослежены в [3, 4]. Влияние вязкости на динамику и форму каверны изучено в [5], сравнение расчетов и наблюдений каверны в слое жидкости и тонкой пленке проведено в [6, 7]. Перенос вещества капли в [2–7] детально не изучался.

В последующих опытах с каплей окрашенной жидкости установлено отличие гладких форм поверхности каверны от изломанных границ окра-

шенных участков в глубокой жидкости [8] и с волокнистой структурой в тонком слое [9].

В последние годы в окрестности границы области слияния капли с принимающей жидкостью замечены кольцевые капиллярные волны и тонкие радиальные струйки с веществом капли [10]. Струйки пронизывают пелену и образуют на ее кромке зубцы с тонкими шипами.

Внутри пятна начального контакта капли воды, падающей в концентрированный раствор поваренной соли NaCl с помощью дистанционного микроскопа (разрешение 1.04 мкм/пиксель, скорость съемки — 5 млн к/с, экспозиция — 100 нс, мощность вспышки около 300 Вт) визуализированы радиальные струйки толщиной порядка 10 мкм [11].

При пересечении границы области контакта тонкие струйки ускоряются процессами преобразования доступной потенциальной поверхностной энергии (ДППЭ), сосредоточенной в слое толщиной порядка размера молекулярного кластера $\delta_\sigma \sim 10^{-6}$ см. Здесь ДППЭ переходит в другие формы, в том числе в возмущения давления, ускоряющие тонкий слой сливающихся жидкостей [12]. Струйки с веществом капли текут по дну каверны, образуют зубцы кромки венца и шипы с вылетающими капельками. Следы струек образуют волокнистые структуры на дне каверны и стенках венца.

¹ Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского
Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: chakin@ipmnet.ru

**E-mail: ilynykh@ipmnet.ru

В начале растекания капли, когда линия контакта движется наружу от центра, окрашенные струйки образуют линейчатые структуры [13]. При слиянии донной части капли, когда граница пятна контакта стягивается к центру, струйки на дне каверны образуют сетку, состоящую из треугольных и многоугольных ячеек [14].

Жидкость капли, движущаяся вдоль волокон на границах ячеек, скапливается в узлах сетки и продавливается сквозь стенки каверны. Под узлами в фазе коллапса каверны образуются лигаменты — тонкие струйки с вихревыми оголовками, вторгающиеся в принимающую жидкость. Струйки постепенно вытягиваются, разделяются на волокна и образуют систему наклонных петель. В режиме формирования всплеска петли наблюдаются при слиянии и инертных, и химически реагирующих сред [15–17].

Образование лигаментов связано с процессами быстрой передачи энергии при перестройке тонкой структуры воды и водных растворов, включающей войды, свободные молекулы, кластеры, клатраты, сетки и другие системы [18, 19]. Изменения структуры сопровождаются преобразованием части внутренней энергии в другие формы и, наоборот, потерей части кинетической энергии при образовании новых контактных поверхностей. Возникающие градиенты термодинамических потенциалов формируют тонкие прослойки или волокна в толще и на поверхности жидкости.

Процессы диффузионного сглаживания волонистых структур в областях взаимопроникновения лигаментов на границах контактирующих сред дополняют механизмы смешения и перемешивания (“stirring and mixing”), в которых прослойки вытягиваются течениями, скручиваются в спирали вихрями и диффузно расплываются [20]. Большая площадь боковых поверхностей лигаментов — систем волокон и петель, содержащих вещество капли, обеспечивает быстрое диффузионное выравнивание плотностей жидкостей [12]. Волокна в картине распределения вещества капли сохраняются на всех последующих этапах эволюции течения и в покоящейся принимающей жидкости [21], и в поле гравитационно-капиллярных волн [22].

Форма первичной каверны зависит от физических свойств сред, направления движения и скорости капли. Ось каверны отклоняется от вертикали при контакте капли с наклонной поверхностью [23]. Измерения формы каверны капли, падающей на гребень или впадину волны, выполнены в [24].

Интерес к изучению переноса вещества капель в жидкости обусловлен научной содержательностью явления, составляющего основу массовых технологий в химической, нефтехимической,

фармацевтической и других отраслях промышленности. В расчетах обычно предполагается равномерное распределение вещества капли по поверхности каверны [6]. В опытах установлено, что в ряде режимов вещество капли сохраняется в тонких волокнах на поверхности каверны [13, 14], в петлях следа за спадающей каверной [15–17], растущим и спадающим всплеском [21, 22]. Перенос вещества капли на начальном этапе слияния ранее не изучался. В данной работе впервые визуализированы тонкие радиальные волокна, содержащие вещество капли, которые пронизывают поверхность растущей первичной каверны в смешивающихся жидкостях. Со временем вокруг каверны образуется промежуточный слой, отделенный тонкой оболочкой от принимающей жидкости.

Методика опытов разрабатывалась с учетом свойств полных решений системы фундаментальных уравнений механики жидкостей [12]. В силу большой теплоемкости воды течения считались изотермическими, температура смешивающихся жидкостей — комнатной $T_d = T_t = T_a = 20^\circ\text{C}$ (индексом t обозначены параметры принимающей жидкости, d — капли, a — воздушной среды). Жидкости характеризуются потенциалами Гиббса и другими термодинамическими величинами [12].

В опытах капля воды, водного раствора чернил или минеральной соли диаметром D (площадь поверхности S_d , объем V_d , масса M) свободно падает с ускорением g в воздухе с высоты H и достигает скорости U при контакте с принимающей жидкостью в стеклянном бассейне размерами $10 \times 10 \times 5$ см. Размерные параметры течения — плотности $\rho_{a,d,t}$, кинематические $\nu_{a,d,t}$, $\nu_d = \mu_d/\rho_d$ и динамические $\mu_{a,d,t}$ вязкости сред, коэффициенты поверхностного натяжения — полные σ_d^a , σ_t^a и нормированные на плотность $\gamma_d^a = \frac{\sigma_d^a}{\rho_d}$,

$\gamma_t^a = \frac{\sigma_t^a}{\rho_t}$ см³/с², коэффициенты диффузии веще-

ства капли κ_t^d и маркирующей примеси κ_t^m в принимающей жидкости. Отношения физических параметров определяют собственные масштабы

времени $T_U^D = \frac{D}{U}$, длины $L_g^v = \sqrt[3]{\frac{\nu^2}{g}}$ и скорости

$U_v^\gamma = \frac{\gamma}{\nu}$ или $U_k^\gamma = \frac{\gamma}{\kappa}$ [13], которые задают требования к разрешающей способности инструментов.

Отношения коэффициентов и параметров базовой системы уравнений [3] образуют семейство безразмерных величин (чисел) — Рейнольдса

$$\text{Re}_d = \frac{UD}{\nu_d}, \text{ Фруда } \text{Fr}_d = \frac{U^2}{gD}, \text{ Вебера } \text{We}_d = \frac{U^2 D}{\gamma_d^a},$$

$$\text{Бонда } \text{Bo} = \frac{gD^2}{\gamma_d^a}, \text{ Онезорге } \text{Oh}_d = \frac{\nu_d}{\sqrt{\gamma_d^a D}}, \text{ Шмидта}$$

$$\text{Sc} = \nu_t / \kappa_t^m, \text{ капиллярных отношений } \text{Ca}_U^v = \frac{U_d}{U_v^\gamma},$$

$$\text{Ca}_U^\kappa = \frac{U_d}{U_\kappa^\gamma}, \text{ использующихся при описании течений.}$$

Различия физических свойств контактирующих сред характеризуются безразмерными отношениями, составленными по аналогии с числом Атвуда — относительной разностью плотностей —

$$\text{R}_\rho = \frac{\rho_t - \rho_d}{\rho_t + \rho_d}, \text{ коэффициентов поверхностного на-}$$

$$\text{тяжения } \text{R}_\sigma = \frac{\sigma_t - \sigma_d}{\sigma_t + \sigma_d} \text{ и динамических вязкостей}$$

$$\text{R}_\mu = \frac{\mu_t - \mu_d}{\mu_t + \mu_d} [14].$$

$$\text{Кинетическая энергия } E_k = \frac{MU^2}{2} \text{ распределе-}$$

$$\text{на по всему объему капли с плотностью } W_k = \frac{E_k}{V}.$$

ДППЭ $E_\sigma = \sigma_d^a S_d$ сосредоточена в приповерхностном слое толщиной порядка размера молекулярного кластера δ_σ и объемом $V_\sigma \approx 4\pi R^2 \delta_\sigma$ с

плотностью $W_\sigma = \frac{E_\sigma}{V_\sigma}$. Отношение компонентов

энергии составляет в опытах несколько процентов: $E_R = \frac{E_\sigma}{E_k} \ll 1$, а их плотностей наоборот: $W_R =$

$$= \frac{E_\sigma V_d}{E_k V_\sigma} \gg 1. \text{ Время передачи кинетической энер-$$

гии определяется скоростью и размером капли $T_U^D \sim 10^{-3}$ с, длительность преобразования ДППЭ в другие формы на масштабах δ_σ много короче и составляет $T_U^\sigma = \delta_\sigma / U \sim 10^{-8}$ с [15]. Освобожденная ДППЭ участвует в формировании лигаментов — быстро движущихся тонких слоев и волокон.

Методика эксперимента и организации освещения разрабатывалась с целью визуализации стенок каверны и разрешения тонких волокон в картине переноса вещества [12–15]. Экспозиция устанавливалась минимальной — от 1/4000 до 1/50000 с. Технические возможности, в частности предельная экспозиции и скорость съемки, ограничивают четкость регистрации быстрых компонентов, изображение границ которых размывается.

Опыты выполнены на стенде ТБП комплекса УИУ “ГФК ИПМех РАН” [25]. Капли воды (коэффициент преломления $n_w = 1.33$), водных растворов ализариновых чернил или пищевой соды (NaHCO_3 — гидрокарбонат натрия, $\rho_s = 1.041 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$,

$\gamma_s^a = 62 \text{ см}^3 \text{ с}^{-2}$, $\nu_s = 0.012 \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$, $n_s = 1.34$) падали в стеклянный бассейн, заполненный частично дегазированной водопроводной водой или водным раствором роданида аммония (NH_4SCN ,

$\rho_r = 1.043 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$, $\gamma_r^a = 50.8 \text{ см}^3 \text{ с}^{-2}$, $\nu_r = 0.009 \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$, $n_r = 1.36$). Различия коэффициентов преломления контактирующих сред обеспечивают визуализацию контактных границ и определение местоположения структурных компонентов прямым теневым методом.

Картина течения регистрировалась видеокамерой Optronis CR300x2. Для освещения одновременно использовались прожектора Reylab Xenos-1000 и Optronis MultiLED, световодные осветители Schott KL2500LCD. Число и расположение осветителей подбирались из условия четкости визуализации тонкой структуры. Опыты проведены в диапазоне параметров образования всплеска — центральной кумулятивной струи, методика опытов приведена более полно в [10, 15, 17].

Выборки из видеофильма течения в начальной стадии формирования каверны свободно падающей каплей воды в растворе роданида аммония (20%) приведены на рис. 1. Первичный контакт капли сопровождается образованием выпуклой неоднородной полоски длиной $d_w = 4.58 \text{ мм}$ и высотой $h_w = 0.58 \text{ мм}$ при $t = 0.25 \text{ мс}$ — размытого изображения области вторжения вещества капли в принимающую жидкость. Шероховатости границы полоски образованы отдельными волокнами и их группами. Контрастность полоски объясняется большими градиентами коэффициента преломления сред на границах волокон и всей области вторжения жидкости капли в принимающем растворе роданида аммония.

Сравнительный анализ тонкой структуры изображений показывает, что область вторжения сформирована отдельными тонкими струйками и петлями, включающими вещество капли (воды). Полосчатая структура изображения позволяет именовать данную область моховидным слоем или мшаником. Размытость кромки капли и отдельных волокон мшаника при $t = 0.25 \text{ мс}$ объясняется высокой скоростью движения компонентов (капля за время экспозиции $\Delta t = 0.25 \text{ мс}$ смещается на $\Delta h_w = 0.78 \text{ мм}$, нижняя кромка полоски — на $\Delta h_m = 0.45 \text{ мм}$). Скорость продвижения наружных кромок волокон $v_f = 1.84 \text{ м/с}$ сравнима со скоростью капли $U = 3.1 \text{ м/с}$.

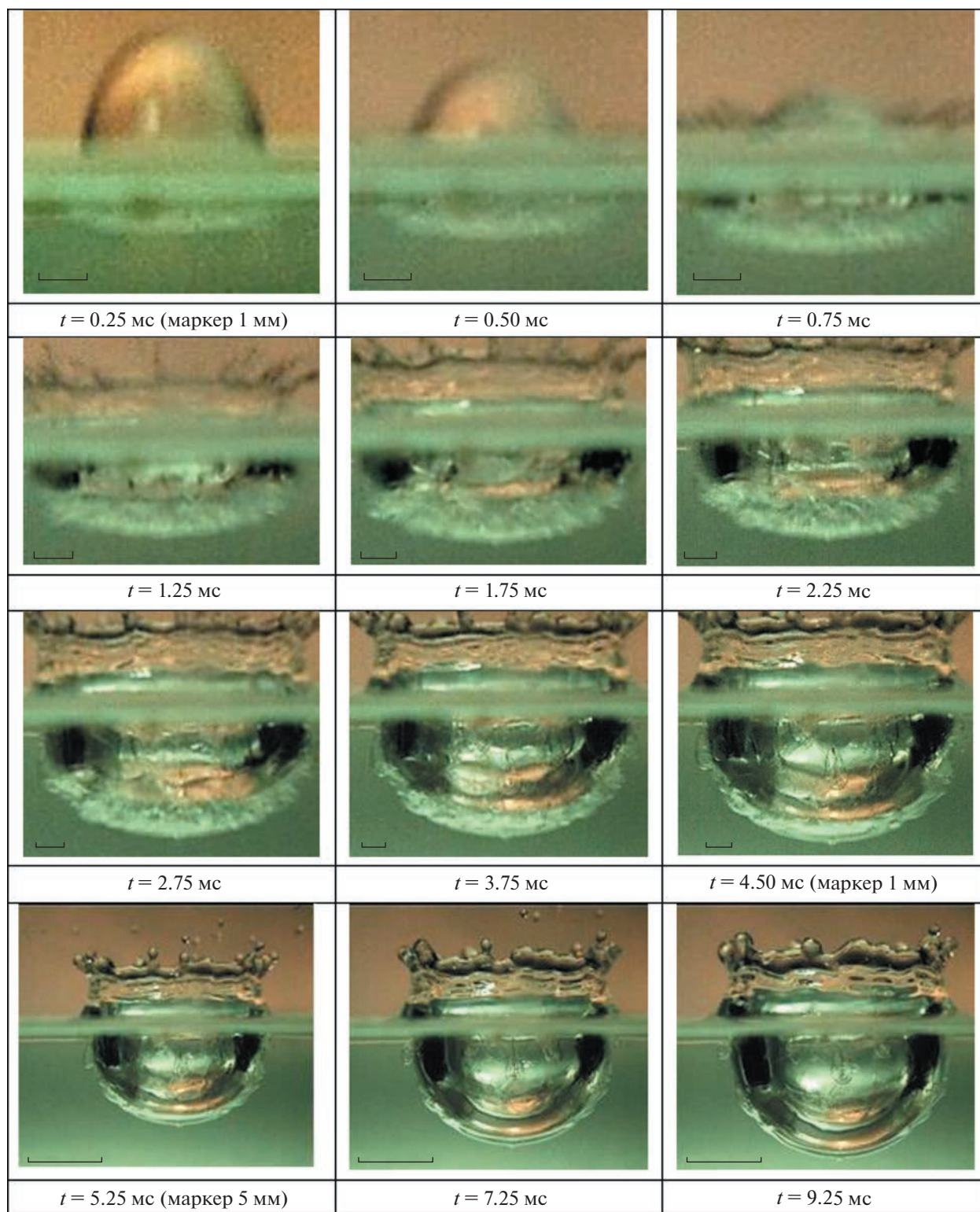


Рис. 1. Эволюция волокнистой структуры промежуточного слоя с веществом капли, образующей оболочку каверны (слияние капли воды с 20%-м раствором роданида аммония, $D = 0.43 \text{ см}$, $U = 3.1 \text{ м/с}$, $E_k = 200 \text{ мкДж}$, $E_\sigma = 4.2 \text{ мкДж}$, $Re = 13\,300$, $We = 570$, $Fr = 228$, $Bo = 2.5$, $Oh = 0.0018$, $E_R = 48$, $W_R = 1.7 \times 10^{-3}$, $R_\rho = 0.03$, скорость съемки 4000 к/с, экспозиция 1/4000 с, разрешение 50 мкм/пикс, кадр 512×512 пикс).

В процессе растекания капли пятно вторжения волокон продвигается в толщу жидкости, утолщается и расширяется (диаметр $d_w = 5$ мм, высота $h_w = 1$ мм при $t = 0.5$ мс). Нижняя кромка мшаника приобретает выпуклую форму. Между верхней кромкой пятна под свободной поверхностью, которая здесь отображается размытым слоем капиллярного поднятия жидкости на стенке кюветы, отдельные каустики высвечивают формирующуюся плоскую каверну диаметром $d_c = 4.8$ мм и глубиной $h_c = 0.25$ мм.

Каверна с плоским дном активно растет ($d_c = 5.4$ мм, $h_c = 0.4$ мм, $t = 0.75$ мс) и на следующем кадре полностью отделяет мшаник высотой $h_m = 1.08$ мм от свободной поверхности (здесь центральная часть каверны шириной $\Delta d_c = 3.8$ мм светлая, ее периферия — темная). Поскольку скорость смещения нижней кромки мшаника $v_f = 1.8$ м/с превышает скорость опускания дна каверны $v_c = 1.6$ м/с, его высота растет. Изображения отдельных волокон в мшанике становятся более четкими.

Остаток капли над свободной поверхностью окружен зубчатым венцом с шипами, с вершин которых вылетают капельки. Качественно структуры распределения вещества капли в обеих контактирующих средах оказываются подобными — шипам в воздухе, включающим обе жидкости, соответствуют волокна в принимающей среде.

В стадии растекания капли размеры каверны, светлой в центральной части и затемненной на периферии, а также области внедрения волокон растут ($h_m = 1.11$ мм, $d_m = 7$ мм при $t = 1.25$ мс). Дно каверны выделено темной линией под верхним неровным краем мшаника, темный бугорок в центре — остаток растекающейся капли. Растущий венец с наклонными шипами на утолщенной кромке окружает облако брызг, вылетающих с вершин шипов.

В ходе дальнейшей эволюции шипы поворачиваются к вертикали, от кромки по стенке венца сбегает капиллярная волна. Дно каверны продолжает углубляться и после полного слияния капли приобретает сферическую форму ($t = 1.75$ мс, $d_c = 7.9$ мм, $h_c = 1.38$ мм). Пятно мшаника толщиной $h_m = 1.34$ мм, $d_m = 7$ мм покрывает нижнюю часть каверны, его верхняя кромка находится на расстоянии $\Delta h_m = 1.38$ мм от поверхности жидкости. Нижняя кромка мшаника изрезана тонкими волокнами, которые теперь прослеживаются по всей толщине слоя вторжения.

Постепенно между мшаником высотой $h_m = 1.38$ мм и свободной поверхностью жидкости вокруг боковой стенки каверны начинает формироваться промежуточный слой более однородной жидкости пониженной плотности высо-

той $h_d = 1.3$ мм и толщиной $h_l = 0.8$ мм. Сохраняющаяся разность плотностей жидкостей вне и внутри промежуточного слоя подчеркивается резкой внешней границей на всех этапах его эволюции — при вторжении волокон, их размывании и последующем растекании слоя.

Высота промежуточного слоя, отделяющего верхнюю кромку мшаника от поверхности жидкости, растет по мере углубления каверны (при $t = 2.25$ мс, $d_c = 8.48$ мм, $h_c = 2.08$ мм) и окончания процесса освобождения ДППЭ после полного слияния капли. Более того, кинетическая энергия жидкости теперь расходуется на создание и перемещение новой контактной поверхности.

Пелена на вершине венца стягивается в изломанный круговой валик, от которого вниз по стенкам венца бегут группы капиллярных волн, форма гребней и впадин которых повторяет контур его кромки.

В течение следующих $\Delta t = 0.5$ мс тонкая структура в верхней части промежуточного слоя с гладкой боковой и волнистой верхней границей выражается. Однако волокна сохраняются под дном и на небольшой высоте сбоку каверны ($h_m = 1.28$ мм, при $t = 2.75$ мс, $d_c = 9.16$ мм, $h_c = 2.8$ мм).

Заметные изменения в структуре промежуточного слоя наблюдаются в интервале $3.75 < t < 4.5$ мс, когда прекращение вторжения новых волокон заменяется быстрым сглаживанием тонкой структуры промежуточного слоя по всей высоте за исключением центра донной части, где сохраняются крупные возмущения. Одновременно начинает убывать его толщина. Узкий промежуточный слой толщиной до 0.6 мм охватывает всю поверхность каверны.

В ходе дальнейшей эволюции промежуточный слой теряет однородность, в нем появляются языки сложной формы и сбоку каверны, и в ее центре. В нижней части каверны при $t = 7.25$ мс наблюдаются несколько вложенных наклонных колец. Граница слоя остается гладкой под дном каверны. Его толщина убывает от $h_m = 0.78$ мм при $t = 5.25$ мс до $h_m = 0.56$ мм при $t = 7.25$ мс. На высоте $h = 2.3$ мм от дна каверны можно выделить две наклонные петли, слева — языки, в центре — набор солевых пальцев.

Венец над свободной поверхностью при этом продолжает расти, его верхняя кромка утолщается (при $t = 7.25$ мс составляет 1.14 мм), как и шипы на сглаженных зубцах. Регулярность картины капиллярных волн на боковой поверхности венца нарушается, кольцевые гребни разбиваются на отдельные наклонные отрезки.

Сравнения размеров каверны, полной глубины области возмущения h_c , включающей собственно каверну и промежуточный слой (мша-

Таблица 1

t , мс	0.25	0.5	0.75	1.25	1.75	2.25	2.75	3.75	4.5	5.25	7.25	9.25
d_c , мм			5.37	7.02	7.93	8.48	9.16	10.30	10.94	11.32	13.05	14.01
h_s , мм	0.58	1.03	1.49	2.13	2.72	3.46	4.08	5.07	5.69	6.34	7.34	8.27
h_m , мм	0.58	1.03	1.08	1.11	1.34	1.38	1.28	1.08	1	0.78	0.56	0.56

ник), и высоты промежуточного слоя h_m , приведенные в табл. 1, показывают, что на начальной стадии процесса на фоне равномерного роста каверны толщина мшаника растет, достигает максимума при $t = 2.25$ мс и далее начинает быстро убывать.

Сжатие промежуточного слоя вызвано увеличением размеров каверны и прекращением роста волокон после полного погружения капли. Далее волокна распливаются под действием процессов диффузии. Большая продолжительность этапа роста каверны обеспечивается инерционными свойствами течений в маловязкой жидкости.

Распределения освещенности на границе каверны с увеличенным изображением промежуточного слоя при $t = 1.75$ и 2.75 мс, пространственные спектры поперечных масштабов возмущений приведены на рис. 2. В стадии формирования структуры при $t = 1.75$ мс в спектре выделены поперечные масштабы от 0.03, 0.04, 0.045, 0.08, 1.05 и 1.1 мм. Со временем мелкомасштабные возмущения постепенно сглаживаются, а крупные неоднородности размером в 1–2 мм сохраняются.

Визуализация картины распределения вещества при растекании капли разбавленных чернил в воде показывает, что на ранних этапах слияния здесь также образуется промежуточный слой, составленный из окрашенных волокон, пронизывающих стенки каверны (рис. 3). Для наглядности на первых трех фотографиях приведены первичный кадр и его нижняя часть в масштабе 5 : 1. Здесь при $t = 0.5$ мс выражены волокнистая центральная часть и более гладкая периферия. Гладкая часть кромки окрашенной жидкости слева вверх и размытая справа указывают на аксиальную неоднородность распределения вещества капли.

По мере роста размеров каверны общая картина течения перестраивается с сохранением неравномерности распределения вещества капли, включающего вертикальные полосы на стенках и волокна в промежуточном слое ($t = 2.75$ мс). В картине распределения брызг отчетливо выражена зональная структура; ярусы, содержащие капли, разделены пустыми промежутками. Волокна в каверне толщиной до 0.2 мм продолжают-

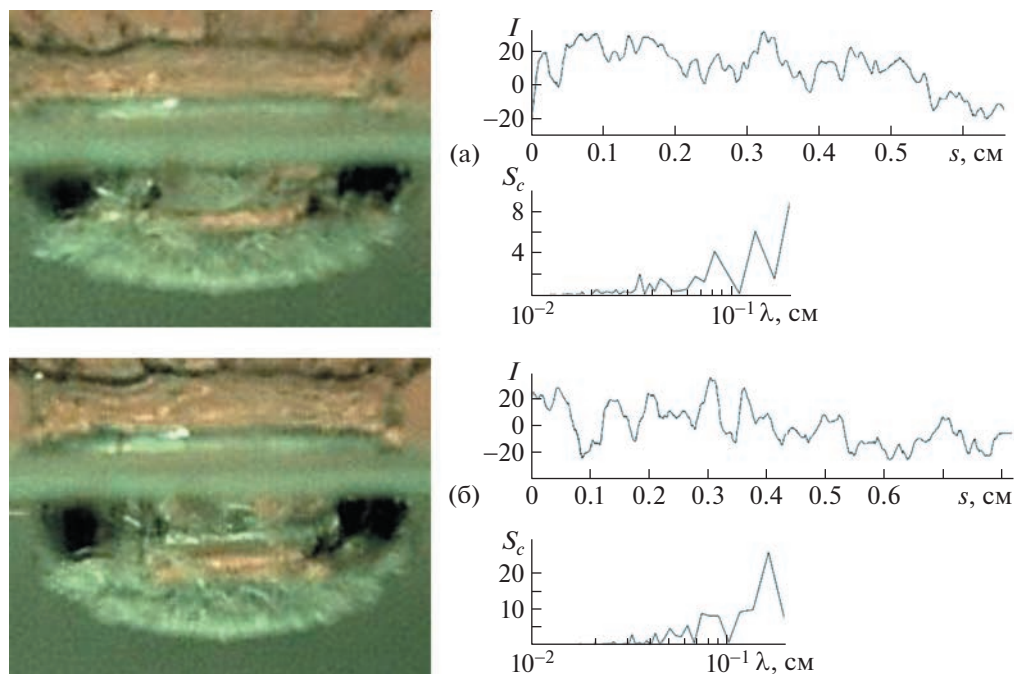


Рис. 2. Распределения интенсивности света в волокнистом слое вдоль границы каверны и пространственные спектры структуры (слияние капли воды с 20%-м раствором роданида аммония): $t = 1.75$ (а) и 2.75 мс (б).

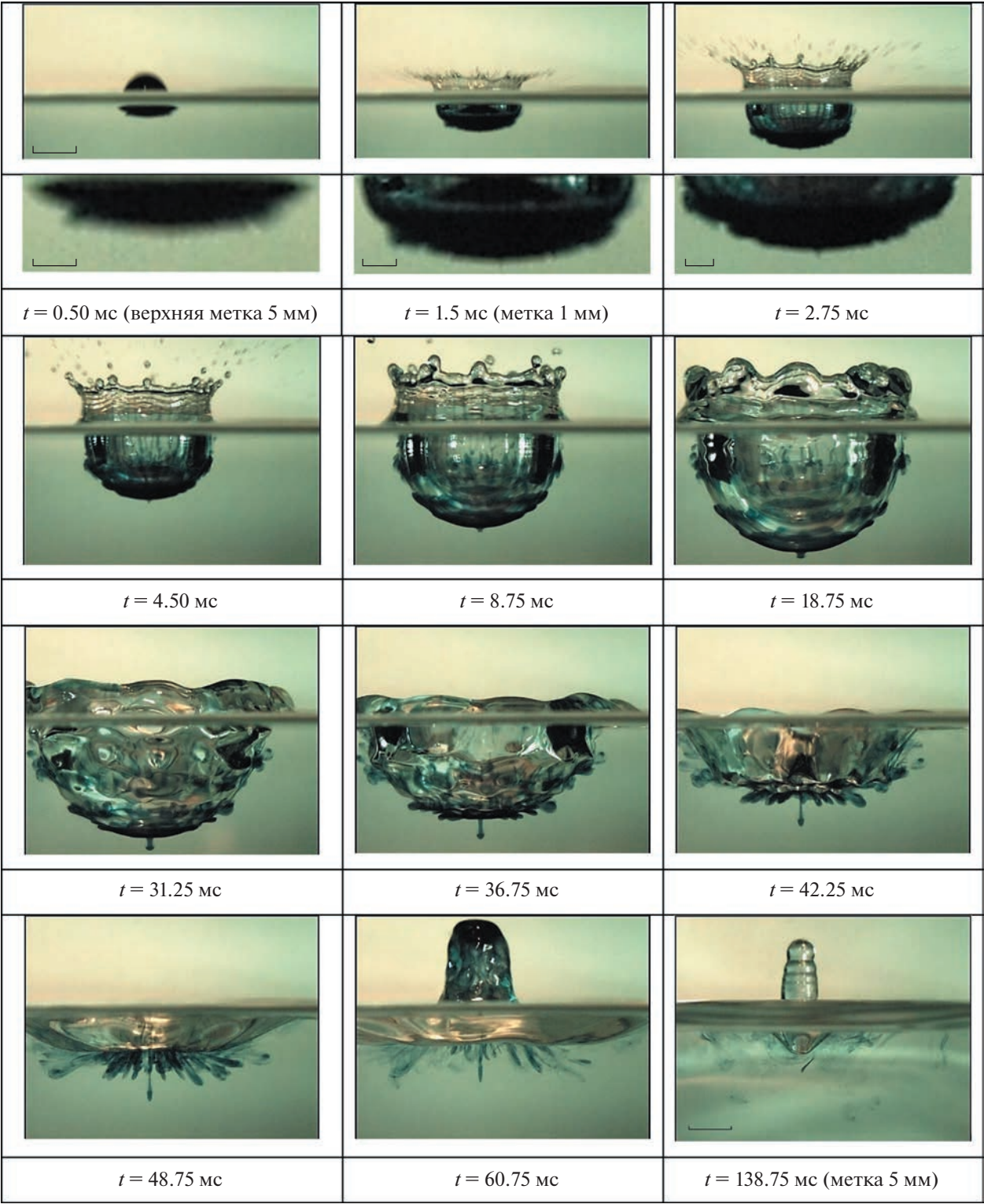


Рис. 3. Эволюция течения с волокнистым промежуточным слоем (слияние капли разбавленного раствора чернил в соотношении 1:100 с водой): $D = 0.43$ см, $U = 3.1$ м/с, $R_0 = -0.01$, разрешение 52 мкм/пикс, остальные параметры приведены на рис. 1, на первых трех кадрах приведено увеличенное изображение дна каверны в масштабе 5:1.

Таблица 2

t , мс	0.25	0.5	0.75	1.25	1.75	2.5
d_c , мм	3.62	4.97	5.92	7.17	8.07	9.31
h_s , мм	0.39	0.78	1.2	1.98	2.64	3.56
h_m , мм	0.39	0.78	1	1.35	1.47	1.47

ся в венце, шипах и образуют неравномерно окрашенные капельки. Постепенно стенки каверны выглаживаются, окрашенная жидкость собирается в пятнах в нижней части каверны, образующих кольцевой слой высотой $h_l = 1.7$ мм при $t = 4.5$ мс.

Далее окрашенные слои разделяются. Дно каверны охватывает плотный слой высотой $h_l = 0.5$ мм при $t = 8.75$ мс. Верхний слой высотой $h_u = 0.8$ мм, отстоящий от дна на $\Delta h = 4.7$ мм, распадается на отдельные сгустки волокон, примыкающих снаружи к стенкам каверны.

Со временем распределение чернил на поверхности каверны становится все более неравномерным, при $t = 18.75$ мс в верхнем слое высотой 3.2 мм, отстоящем от свободной поверхности на $\Delta h = 0.9$ мм, образуются отдельные пятна. Промежуточный слой высотой $h_l = 2.4$ мм также теряет однородность. На контуре каверны прослеживаются группы кольцевых капиллярных волн. Стекающая по волокнам окрашенная жидкость частично просачивается через стенки каверны и образует характерные выступы в принимающей жидкости, как и в [15].

В начале фазы схлопывания форма каверны усложняется, азимутальная однородность волновых фронтов нарушается, кольцевые волны трансформируются в трехмерные с выраженными выступами и впадинами, распределенными по ярусам. Окрашенная жидкость скапливается в отдельных сгустках по всей поверхности каверны за исключением донного слоя ($t = 31.25$ мс).

В стадии коллапса стенки каверны принимают угловатые формы, в принимающей жидкости под дном каверны появляются петли $t = 36.75$ мс, длина которых растет по мере схлопывания каверны ($t = 42.25$ мс) вплоть до начала фазы формирования всплеска ($t = 48.75$ мс) [15, 17]. По мере затягивания жидкости в растущий всплеск плотность окраски верхних слоев жидкости, длина и число петель уменьшаются.

Окрашенная жидкость с выраженными волокнами собирается в верхней части растущего всплеска ($t = 60.75$ мс) и уносится вылетающей с его вершины каплей. Отдельные окрашенные волокна сохраняются в толще жидкости до полного погружения всплеска ($t = 138.75$ мс). Здесь плотно окрашены кромки новой растущей конической каверны и оболочки заостренного всплеска, бо-

ковая поверхность которого покрыта капиллярными волнами длиной $\lambda = 0.57, 0.8, 1.13$ мм.

Выборки из видеогаммы начальной стадии картины течения при растекании капли насыщенного раствора соды в воде, визуализированной “методом темного поля”, приводятся на рис. 4 в прямой и частично инвертированной форме. На первом кадре представлена структура области вторжения жидкости капли с выраженной волокнистой структурой, которая проявляется в изрезанной форме границы с дном каверны.

Дно каверны, к которому примыкает система волокон промежуточного слоя, появляется в поле зрения при погружении нижней четверти капли ($t = 0.5$ мс).

Далее под каверной видны группа пронизывающих волокон и нижняя граница промежуточного слоя ($t = 0.75$ мс).

При полном погружении капли $t = 1.25$ мс образуется каверна ($d_c = 7.17$ мм, $h_c = 0.63$ мм), под которой располагается промежуточный слой высотой $h_m = 1.35$ мм и шириной $d_m = 3.2$ мм с тонкими волокнами толщиной $\Delta l = 0.15$ мм, расположенными в угловом диапазоне от 40° до 90° к горизонту. На дне каверны виден шаровой сегмент погружающейся капли.

Нижнюю границу промежуточного слоя обозначает округлое пятнышко под центром каверны на расстоянии $\Delta h = 2$ мм от свободной поверхности — вершина формирующейся быстрой струйки, образовавшейся при уничтожении свободной поверхности в первичном контакте сливающихся жидкостей.

Под плоским дном каверны ($h_c = 1.17$ мм, $t = 1.75$ мс) выделяется группа волокон конической формы с вихревыми окончаниями, граница области которых отстоит на $\Delta h = 2.2$ мм от свободной поверхности. Здесь высота промежуточного слоя составляет $h_m = 1.47$ мм, его нижняя кромка располагается на расстоянии $\Delta h = 2.64$ мм от свободной поверхности.

Постепенно дно каверны скругляется, при $t = 2.5$ мс волокна не регистрируются в данной технике визуализации. Размеры основных структурных компонентов — диаметра и глубины каверны, толщины промежуточного волокнистого слоя приведены в табл. 2. Здесь размеры каверны растут монотонно, а высота промежуточного слоя достигает максимума при $t = 2.5$ мс.

Временные зависимости всей глубины области возмущения, включающей каверну и промежуточный слой, образующейся при погружении капли раствора соды в воду ($R_p = -0.03$), воды в раствор роданида аммония ($R_p = 0.03$), а также глубина каверны при погружении капли раствора соды в воду представлены на рис. 5. Все три по-

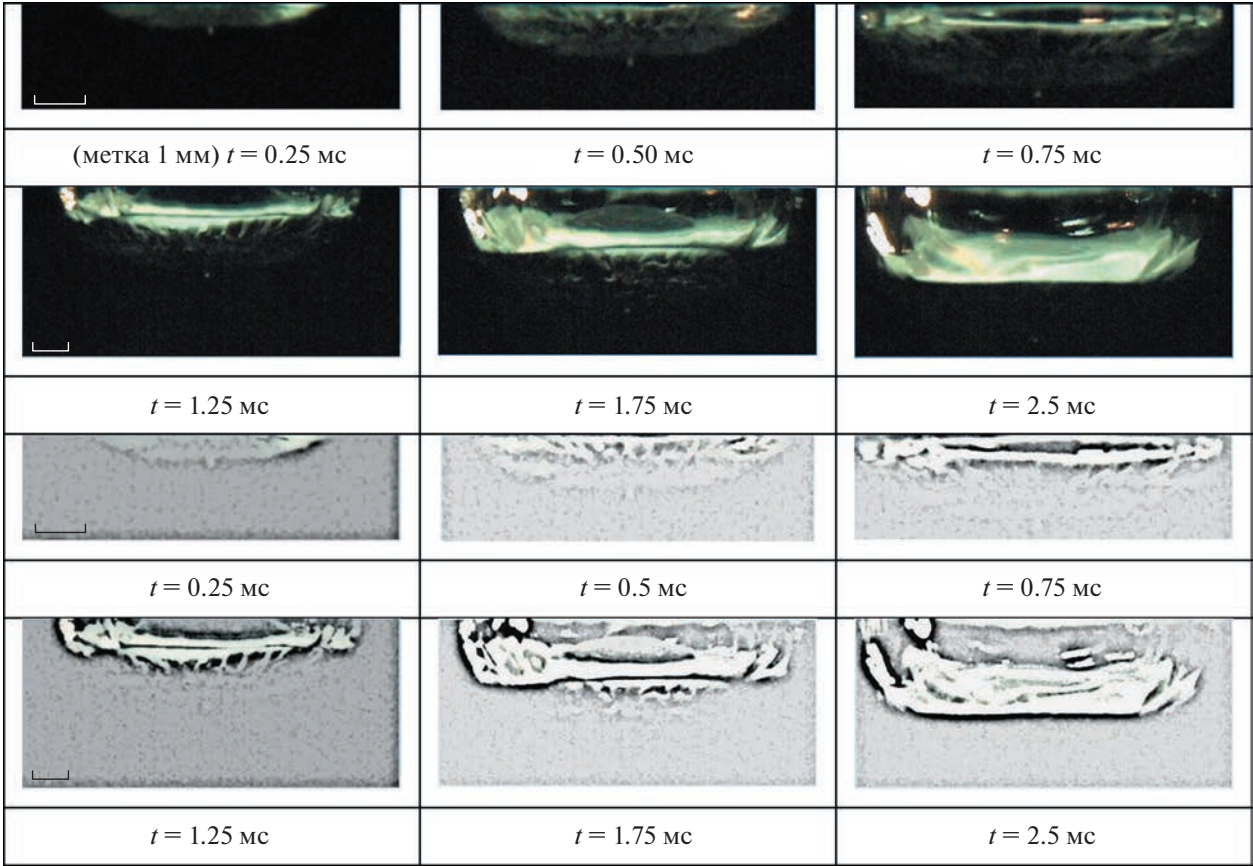


Рис. 4. Эволюция течения в начальной стадии слияния капли водного раствора гидрокарбоната натрия с водой ($D = 0.42$ см, $U = 3.1$ м/с, $Re = 11\,300$, $We = 650$, $Fr = 234$, $Bo = 2.8$, $Oh = 0.0023$, $E_k = 194$ мкДж, $E_\sigma = 3.6$ мкДж, $E_R = 54$, $W_R = 1.9 \times 10^{-3}$, $R_\rho = -0.03$, скорость съемки 4000 к/с, экспозиция 1/20 000 с, разрешение 26 мкм/пикс, кадр 512×512).

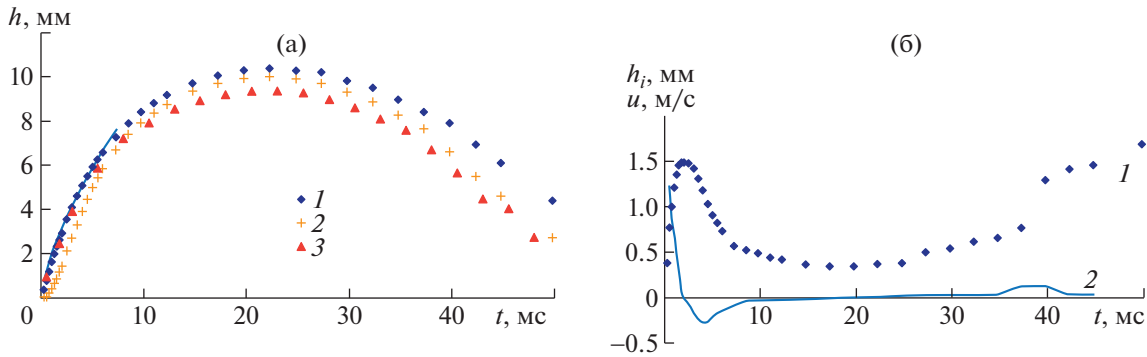


Рис. 5. Зависимости размеров компонентов течений от времени: *а* — полная глубина возмущения, кривые 1, 2 — при слиянии капли раствора гидрокарбоната натрия с водой, 3 — капли воды с раствором роданида аммония, сплошная кривая — $h(t) = 2t^{2/3}$, *б* — толщина промежуточного слоя и скорость его нижней кромки.

добные кривые на начальном участке аппроксимируются функцией $h(t) = 2t^{2/3}$, $h = [\text{мм}]$, $t = [\text{мс}]$.
При прочих равных условиях глубина каверны растет с увеличением плотности капли. Различие в значениях глубин областей возмущения увеличивается со временем и достигает $\Delta h = 2.4$ мм при $t = 43$ мс.

Объединенный график зависимости толщины и скорости продвижения нижней кромки промежуточного слоя от времени приведен на рис. 5б. В начальной фазе быстрого роста слоя скорость опускания его дна достигает $u_b = 1.2$ м/с при $t = 0.25$ мс. Далее наступает фаза деградации структуры, обусловленная прекращением роста воло-

кон и увеличением площади поверхности каверны. С началом схлопывания каверны при $t = 22.3$ мс начинают расти петли, длина которых немонотонно меняется со временем [15–17].

В проведенных опытах волокна, пронизывающие дно растущей каверны, образуются и при погружении капли легкой жидкости в тяжелую ($R_p = 0.03$), и тяжелой жидкости в легкую ($R_p = -0.03$), и при малой разности плотностей ($R_p = -0.01$). Образование волокон связано с изменением собственной микроструктуры воды и водных растворов [18, 19], сопровождающимся быстрым преобразованием внутренней энергии, ускоряющим формирование тонких струек. Поскольку эффективность капельных технологий во многих отраслях промышленности зависит от площади поверхности контакта жидкостей, преимущества получают физические условия образования волокон и петель максимальной длины.

БЛАГОДАРНОСТИ

Эксперименты проведены на стендах УИУ “ГФК ИПМех РАН”.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 19-19-00598).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Worthington A.M.* On impact with a liquid surface // *Proc. of the Royal Society of London*. 1882. V. 34. Issue 217–230.
https://books.google.it/ao/books?id=44vy9MMSc-Q0C&source=gbs_navlinks_s
2. *Engel O.G.* Crater depth in fluid impacts // *J. Appl. Phys.* 1966. V. 37. P. 388–394.
<https://doi.org/10.1063/1.1708605>
3. *Brutin D.* Drop impingement on a deep liquid surface: study of a crater’s sinking dynamics // *C. R. Mecanique*. 2003. V. 331. P. 61–66.
[https://doi.org/10.1016/S1631-0721\(02\)00014-1](https://doi.org/10.1016/S1631-0721(02)00014-1)
4. *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. Phys. Rev. E* 82 (3, Pt.2), 036319.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.82.036319>
5. *Fink J., Gault D., Greeley R.* The Effect of Viscosity on Impact Cratering and Possible Application to the Icy Satellites of Saturn and Jupiter // *J. Geophys. Res.: Solid Earth*. 1984. V. 89 (B1). P. 417–423.
6. *Berberovic E., van Hinsberg N.P., Jakirlic S., Roisman I.V., Tropea C.* Drop impact onto a liquid layer of finite thickness: dynamics of the cavity evolution // *Phys. Rev.* 2009. V. E79. 036306. P. 1–15.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.79.036306>
7. *Zhang Y.J., Liu P.Q., Qu Q.L., Hu T.X.* Energy conversion during the crown evolution of the drop impact upon films // *Intern. J. Multiph. Flow*. 2019. V. 115. P. 40–61.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2019.03.023>
8. *Cai Y.K.* Phenomena of a liquid drop falling to a liquid surface // *Experiments in Fluids*. 1989. V. 37. P. 388–394.
<https://doi.org/10.1063/1.857581>
9. *Ersoy N.E., Eslamiana M.* Capillary surface wave formation and mixing of miscible liquids during droplet impact onto a liquid film // *Phys. Fluids*. 2019. V. 31. 012107.
<https://doi.org/10.1063/1.5064640>
10. *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.
<https://doi.org/10.31857/S2686740021020139>
11. *Li E.Q., Thoraval M.-J., Marston J.O., Thoroddsen S.T.* Early azimuthal instability during drop impact // *J. Fluid Mech.* 2018. V. 848. P. 821–835.
<https://doi.org/10.1017/jfm.2018.383>
12. *Chashechkin Y.D.* Foundations of engineering mathematics applied for fluid flows // *Axioms*. 2021. V. 10. 286.
<https://doi.org/10.3390/axioms10040286>
13. *Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю.* Полосчатые структуры в картине распределения вещества капли по поверхности принимающей жидкости // *ДАН*. 2018. Т. 481. № 2. С. 145–150.
<https://doi.org/10.1134/S1028335818070066>
14. *Ильиных А.Ю., Чашечкин Ю.Д.* Гидродинамика погружающейся капли: линейчатые структуры на поверхности венца // *Известия РАН. Механика жидкости и газа*. 2017. № 2. С. 152–165.
<https://doi.org/10.1134/S0015462817020144>
15. *Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю.* Формирование системы наклонных петель в течениях импакта капли // *Доклады. Физика, технические науки*. 2021. Т. 499. С. 39–48.
<https://doi.org/10.31857/S2686740021040052>
16. *Müller S.C.* Observation of Chemical Reactions Induced by Impact of a Droplet // *The micro-world observed by ultra high-speed cameras*. K. Tsuji (ed.). Springer International Publishing. AG 2018. P. 343–354.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-61491-5_16
17. *Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю.* Визуализация областей контакта сред в течениях импакта капли с химическими реакциями // *Доклады РАН. Физика, технические науки*. 2021. Т. 500. С. 39–47.
<https://doi.org/10.31857/S2686740021050023>
18. *Маленков Г.Г.* Структура и динамика жидкой воды // *Журнал структурной химии*. 2006. Т. 47. Приложение. С. S5–S35.
19. *Маленков Г.Г.* Структура и динамика поверхности тонких пленок и микрокапель воды. // *Коллоидный журнал*. 2010. Т. 72. № 5. С. 649–659.
20. *Villermaux E.* Mixing Versus Stirring // *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2019. Vol. 51. С. 245–273.
<https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-010518-040306>
21. *Чашечкин Ю.Д.* Эволюция тонкоструктурного распределения вещества свободно падающей капли в

- сmeшивающихся жидкостях // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 3. С. 67–77.
<https://doi.org/10.1134/S0001433819020026>
22. Чашечкин Ю.Д. Перенос вещества окрашенной капли в слое жидкости с бегущими плоскими гравитационно-капиллярными волнами // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58. № 2. С. 218–289.
<https://doi.org/10.31857/S0002351522020031>
23. Singh A., Kumar P. Droplet impact dynamics onto a deep liquid pool of wavy free surface // Phys. Fluids. 2022. 34. 022107.
<https://doi.org/10.1063/5.008453>
24. van Hinsberg N.P., Charbonneau-Grandmaison M. Single-drop impingement onto a wavy liquid film and description of the asymmetrical cavity dynamics // Phys Rev E. 2015. V. 92. 013004.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.92.013004>
25. УИУ “ГФК ИПМех РАН”:
<http://www.ipmnet.ru/uniquequip/gfk/#equip>.

TRANSFER OF A DROP MATERIAL DURING THE PRIMARY CAVERN FORMATION

Yu. D. Chashechkin^a and A. Yu. Ilyinykh^a

^a *Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

Presented by Academician of the RAS V.F. Zhuravlev

The transfer of a freely falling drop matter in the bulk of a target fluid at rest at the stage of primary cavity formation was traced by high-speed video recording for the first time. In the experiments, drops of water, ink solution (diluted in a ratio of 1:100) or a saturated solution of baking soda with a diameter of $D = 0.43$ cm fell with velocity of $U = 3.1$ m/s into fresh water or a 20% ammonium thiocyanate solution in the splash formation mode. In all experiments, the wall of the growing cavity was penetrated by thin fibers containing drop matter, which form an intermediate fine-structured layer. After the end of the fiber growth stage with a duration of 7–8 ms, the diffusion smoothed the concentration gradients, a liquid shell of intermediate density with a thickness of 1.5 to 0.7 mm was formed around the growing cavity. The shell is separated by a sharp boundary from the target fluid. A new group of inclined fibrous loops was formed in the wake of the collapsing cavity.

Keywords: drop, cavity, fibers, intermediate layer