

The influence of solubility on the structure of the cavity bottom during droplet merging in the impact mode

Yu. D. Chashechkin, A. Yu. Ilinykh

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

chakin@ipmnet.ru ilinykh@ipmnet.ru

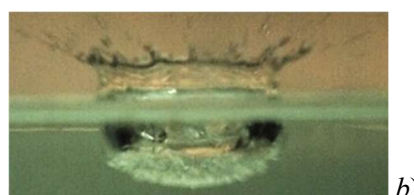
Abstract

The multipoint lighting was used to visualize the flow pattern created by a freely falling drop in a fluid at rest. The initial stage of merging a drop of potassium permanganate solution with water, drop of water with a solution of ammonium thiocyanate, and spreading a drop of aniline and crude oil in a pool of water was studied. The main attention was paid to the analysis of the flow pattern near the bottom of the cavity in the impact mode, when the kinetic energy of the drop significantly exceeds its potential surface energy. An "intermediate layer" is formed under the bottom of the cavity upon contact of the mixing liquids. This layer is a product of dissolution of thin fibers of the droplet substance invading the target fluid. Poorly soluble aniline partially pushes through the bottom of the cavity. Crude oil does not penetrate through the surface of the liquid at the initial stage of flow in this mode. The values of traditional dimensionless parameters that are Reynolds, Froude, Weber, Bond, Ohnesorge numbers, and additional ones that are the ratios of energy components and their densities, as well as relative densities and surface tension coefficients of contacting media values are presented.

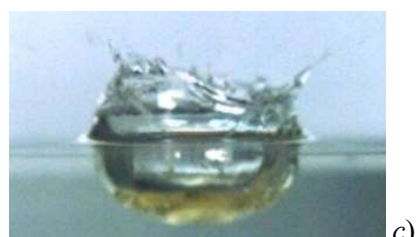
Keywords: drop, miscible and immiscible fluids, electrolytes, aniline, petroleum, cavern, intermediate layer.



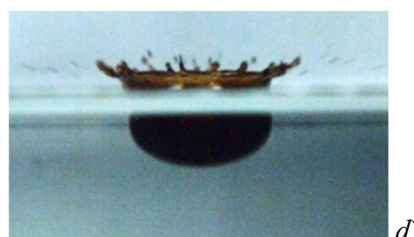
a)



b)



c)



d)

Drop impact flow patterns: a) – drop of potassium permanganate solution in water; b) – drop of in ammonium thiocyanate solution; c) – spreading a drop of aniline in water; d) – crude oil drop in water

УДК 532.5

Влияние растворимости на структуру дна каверны при слиянии капли в импактном режиме

Ю. Д. Чашечкин, А. Ю. Ильиных

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук
(ИПМех РАН), Россия, Москва, 119526, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1*

chakin@ipmnet.ru ilynykh@ipmnet.ru

Аннотация

Методом многоточечной подсветки выполнена визуализация картины течения, создаваемого свободно падающей каплей в покоящейся жидкости. Изучен начальный этап слияния капли раствора перманганата калия с водой, капли воды с раствором роданида аммония, а также растекания капли анилина или нефти в бассейне с водой. Основное внимание уделено анализу картины течения около дна каверны в импактном режиме, когда кинетическая энергия капли заметно превышает ее потенциальную поверхностную энергию. Под дном каверны при контакте смешивающихся жидкостей образуется «промежуточный слой» – продукт растворения тонких волокон вещества капли, вторгающихся в принимающую жидкость. Слабо растворимый анилин частично продавливает дно каверны. Нефть на начальном этапе не проникает сквозь поверхность жидкости в условиях опыта. Проведены значения как традиционных безразмерных параметров – чисел Рейнольдса, Фруда, Вебера, Бонда, Онезорге, так и дополнительных – отношений компонентов энергии и их плотностей, а также относительных плотностей и коэффициентов поверхностного натяжения контактирующих сред.

Ключевые слова: капля, смешивающиеся и несмешивающиеся жидкости, электролиты, анилин, нефть, каверна, промежуточный слой.

1. Введение

Зависимость геометрии течения, формирующегося при слиянии свободно падающей капли с покоящейся принимающей жидкостью, от состава контактирующих сред, замеченная еще в одном из первых систематических исследований капельных течений [1], инициировала последующие более детальные изучения картины переноса вещества [2, 3]. В первых публикациях, когда основное внимание уделялось визуализации образующихся вихревых колец, выбирались смешивающиеся жидкости. Если кинетическая энергия капли $En_k = MU^2/2$ в момент контакта меньше потенциальной поверхностной энергии $En_\sigma = \sigma_d^a S_d$ (здесь M и S_d – масса и площадь поверхности капли, U – скорость в момент контакта, σ_d^a – коэффициент поверхностного натяжения), капля частично растекается по поверхности, а ее основная масса плавно втекает в толщу принимающей жидкости, где формирует линзовидную интрузию. При этом контактная граница жидкость – газ остается непрерывной поверхностью в основных компонентах течения – каверне и венце.

Если плотность интрузии, состоящей, в основном, из жидкости капли, превышает плотность принимающей среды, то влившийся объем постепенно трансформируется в погружающийся кольцевой вихрь [4, 5]. По мере продвижения вихревое ядро теряет однородность, на нем появляются несколько быстро проваливающихся участков, которые трансформируются в зауженные к окончанию петли. Постепенно на нижних краях петель образуются

вихревые кольца, размер которых растет по мере погружения [1, 6]. Далее на вторичных кольцах образуются новые петли. В ходе циклически повторяющихся процессов в жидкости формируется каскад вихрей, четкость элементов которого повышается при увеличении вязкости и плотности втекающей жидкости [7].

Существенно иная последовательность картин течений наблюдается при слиянии смешивающихся жидкостей в импактном режиме, когда кинетическая энергия капли в момент контакта En_k заметно превышает ее потенциальную поверхностную энергию En_σ и отношение $R_{En} = En_k/En_\sigma \gg 1$.

В импактном режиме падающая капля распадается на границе пятна контакта на отдельные тонкие струйки [8]. Быстрые струйки, текущие по поверхности принимающей жидкости, оставляют следы, окрашенные пигментом капли, которые формируют линейчатые и сетчатые структуры на стенках каверны и венца [9]. На кромке венца и тонкой пелены подтекающие струйки образуются зубцы, с вершин которых выступают их продолжения – шипы. С кромок шипов вылетают мелкие капли – брызги. Угловое положение кромки пелены и шипов со временем быстро меняется [10].

Другие тонкие струйки пронизывают дно каверны и создают тонко структурированный промежуточный слой, включающий обе жидкости [11]. Контактная граница фаз уже не может быть представлена непрерывной поверхностью с однородной плотностью вещества.

Со временем процессы молекулярной диффузии на развитой боковой поверхности контакта волокнистых элементов структуры выравнивают градиенты плотности и формируют промежуточный слой, плотность и другие свойства жидкости в котором отличаются от параметров первоначально контактирующих сред [11, 12].

Еще более сложная упорядоченная картина распределение вещества капли наблюдается при слиянии составных капель, в которых ядро окрашенной жидкости, смешивающейся с принимающей средой, окружено масляной оболочкой [13]. Эволюция картины перераспределения вещества капли воды в глубоком слое масла – формирование сплошной пелены, появление войдов, границы которых прорисовывают тонкие волокна, которые распадаются на отдельные капельки, прослежена в [14]. Отдельные фотографии картины распределения нефти и масла на поверхности воды на поздних стадиях эволюции течения приведены в [2].

В большинстве экспериментальных исследований анализируется эволюция картины течения при слиянии свободно падающей капли в импактном режиме на сравнительно больших временах [15], значительно превышающих длительность процесса полного слияния капли (порядка десятка миллисекунд с учетом погружения дна каверны). Научный и практический интерес представляет визуализация течения на начальном этапе слияния капли различных жидкостей, когда проявляется нестационарность процесса слияния смешивающихся жидкостей и наблюдается азимутальная неоднородность скорости перемещения границы области контакта [16]. В данной работе впервые выполнена визуализация начального этапа процесса слияния с водой свободно падающих капель различных жидкостей, как смешивающихся, так и несмешивающихся, в диапазоне параметров, соответствующем импактному режиму течения при слиянии смешивающихся жидкостей, когда капля распадается на волокна, располагающиеся на контактной границе и проникающие в толщу принимающей жидкости.

2. Методика эксперимента

Опыты проведены на Стенде для изучения тонкой структуры быстропротекающих процессов (ТБП), входящем в состав Уникальной исследовательской установки УИУ «ГФК ИПМех РАН» [17]. Прослеживалась эволюция картины течения, образующегося при слиянии с водопроводной водой свободно падающей капли разбавленного раствора перманганата калия $KMnO_4$ капли воды с раствором роданида аммония, растекания в воде капли слабо растворимого анилина и несмешивающейся с водой природной нефти. Основные физические параметры веществ сливающихся капель приведены в табл. 1

Одинокaя капля отрывалась в дозаторе от нормального среза сменного пластикового капилляра диаметром 4 мм под действием собственного веса и падала в прозрачный бассейн размером $10 \times 10 \times 7 \text{ см}^3$ или $30 \times 30 \times 5 \text{ см}^3$, заполненный частично дегазированной водопроводной водой.

Таблица 1

Физические параметры рабочих жидкостей

	$T, \text{ }^\circ\text{C}$	$\rho, \text{ г/см}^3$	$\sigma, \text{ г/с}^2$	$\gamma, \text{ см}^3/\text{с}^2$	$\mu, \text{ г/(см}\times\text{с)}$	$\nu, \text{ см}^2/\text{с}$
Раствор KMnO_4 (0.01 %)	20	1.04	74	73	0.01	0.01
Раствор роданида аммония	20	1.043	53	51	0.009	0.009
Анилин	20	1.02	43	42	0.044	0.04
Нефть	20	0.87	30	35	0.07	0.08

Область наблюдения освещали два многоточечных светодиодных осветителя Optronis MultiLED со световым потоком 7700 лм, световолоконный осветитель Schott KL2500LCD и прожектор ReyLab Xenos RH-1000 мощностью 1 кВт. При подготовке эксперимента внимание уделялось организации светового потока, обеспечивающего визуализацию тонкой структуры основных элементов течения – интрузии, каверны, венца, вихрей, волн, распределения вещества капли в принимающей жидкости на всех этапах эволюции течения. В отличие от традиционных методик, в которых используется коллимированный пучок (освещение «на просвет») или равномерно освещенный экран, в данных опытах световые потоки от нескольких источников были направлены на свободную поверхность сверху под различными углами. Угловое положение и координаты установки источников подбирались из условия максимальной четкости изображения изучаемой картины течения.

Цветная картина течения регистрировалась в боковой проекции видеокамерой Optronis CR 300 \times 2. Положение горизонтальной линии визирования выбиралось из условия наибольшей четкости границ компонентов регистрируемой картины. Расстояния от линзы до центра области течения выбиралось в диапазоне от 12 до 40 см. Размеры пикселя в опытах лежали в диапазоне от 10 до 50 мкм. Выдержка подбиралась минимальной при задании уровня пространственного разрешения, размера регистрируемой области и требуемой освещенности. Во всех опытах скорость съемки составляла 4000 кадров/с. Перед каждым опытом проводилась регистрация масштабного маркера.

После настройки аппаратуры натекающая в капилляр жидкость формировала на его срезе единичную каплю, которая отрывалась под действием собственного веса и свободно падала в принимающую жидкость. В полете капля перекрывала световой луч в фотодетекторе и запускала видеокамеру с регулируемой задержкой (временной шаг 1 мкс). Контактная скорость оценивалась по длительности задержки сигнала с фотоприемника и измерениям положения капли на трех последних кадрах видеофильма, предшествующих контакту и началу втекания капли в принимающую жидкость. Более подробно описание установки приводится в [17].

В данной серии опытов в бассейн с частично дегазированной водопроводной водой падали капли электролита с большей, чем у воды плотностью – водного раствора перманганата калия KMnO_4 , а также слабо растворимого анилина и нефти, не смешивающейся с водой. Для контроля влияния инерционных эффектов также регистрировалась картина течения, возникающего при слиянии капель воды с более плотным раствором роданида аммония NH_4SCN . Опыты выполнены при комнатной температуре. Во всех случаях контактная скорость капли была достаточно большой и слияние капли сопровождалось образованием каверны, окруженной венцом с пеленой и шипами, с вершин которых вылетали мелкие капельки, т.е. все опыты выполнены в импактном режиме слияния смешивающихся жидкостей [15] при комнатной температуре рабочих жидкостей.

3. Параметризация

Планирование экспериментов проводилось с учетом результатов анализа системы фундаментальных уравнений механики жидкостей [18]. Рассмотрение уравнений, начальных и граничных условий течений, описывающих образование, свободное падение и слияние капли с принимающей жидкостью, показывает, что в число определяющих размерных параметров входят потенциалы Гиббса капли G_d , воздушной среды G_a и принимающей жидкости G_t . Индексы указывают на среду, которую характеризует данный параметр.

Среды также характеризуются производными потенциала Гиббса – плотностью $\rho_{d,a,t}$, температурой $T_{d,a,t}$, другими физическими величинами – кинематической $\nu_{d,a,t}$ и динамической $\mu_{d,a,t} = (\rho\nu)_{d,a,t}$ вязкостью; полным σ_d^a, σ_t^a и нормализованным на плотность жидкости значением коэффициента поверхностного натяжения, $\gamma_d^a = \sigma_d^a / \rho_d$, $\gamma_t^a = \sigma_t^a / \rho_t$; эквивалентным диаметром D , площадью поверхности S_d , объемом V_d , массой $M = \rho V_d$, импульсом $p_d = MU$ и вертикальной скоростью капли U в момент первичного контакта с принимающей жидкостью.

В число определяющих параметров также входят экстенсивная кинетическая энергия $En_k = MU^2/2$ и потенциальная поверхностная энергия (ППЭ) капли $En_\sigma = \sigma_d^a S_d$, которую формируют анизотропные атомно-молекулярные взаимодействия в окрестности поверхности капли [18]. ППЭ сосредоточена в тонком приповерхностном слое толщиной порядка размера молекулярного кластера $\delta_\sigma \sim 10^{-6}$ см и характеризуется высокой плотностью $W_\sigma = En_\sigma / V_\sigma$, в отличие от кинетической энергии, которая рассредоточена по всему объему капли с плотностью $W_d^k = En_k / V_d$. Величина отношения компонентов энергии капли $R_{En} = En_k / En_\sigma$ может быть и большой, и малой, однако отношение плотностей компонентов энергии $R_W = W_k / W_\sigma \sim \delta_\sigma / D$ всегда малая величина в условиях данных экспериментов.

Набор энергетических параметров также включает потенциальную энергию $En_p = MgD$ в гравитационном поле с ускорением свободного падения g на масштабе D .

При слиянии капли кинетическая энергия передается вместе с поступающей частью массы капли за время порядка $\Delta\tau_k \sim 3 \div 15$ мс в зависимости от скорости капли и характера сложного неравномерного движения контактной поверхности принимающей жидкости. При уничтожении свободной поверхности в области контакта капли и принимающей среды уничтожается ППЭ и сливающейся части капли, и части поверхности принимающей жидкости, покрытой растекающейся каплей. В пятне контакта происходит конверсия уничтожаемых частей ППЭ сливающихся жидкостей в другие формы – возмущения температуры, давления, перераспределение вещества и кинетическую энергию формирующегося тонкого течения. Именно конверсия доступной части ППЭ, которая проходит достаточно быстро за время порядка $\tau_U^\sigma \sim \delta_\sigma / U \sim 10^{-8}$ с, для типичных условий экспериментов с каплями $U \sim 1$ м/с обеспечивает ускорение частиц жидкости и создание тонких быстрых струек, наблюдаемых в импактном режиме слияния капли [19]. При этом в импактном режиме одни тонкие струйки деформируют кольцевую контактную границу области слияния капли и текут по поверхности жидкости, другие протыкают дно каверны [10,11].

Комбинации определяющих параметров задают «числа» – традиционные безразмерные соотношения, которые используются при описании условий расчетов и экспериментов. Набор базовых параметров капельных течений обычно включает следующие числа: Рейнольдса $Re = UD/\nu$, Фруда $Fr = En_k / En_p = U^2 / gD$, Бонда $Bo = gD^2 / \gamma$, Онезорге $Oh = \nu / \sqrt{\gamma D}$, Вебера $We = DU^2 / \gamma$ (ν – кинематическая вязкость). Классификация режимов течения проводится на основании дополнительного безразмерного отношения компонентов полной энергии капли $R_{En} = En_k / En_\sigma$.

Различия физических свойств контактирующих сред дополнительно характеризуются безразмерными отношениями, составленными по аналогии с числом Атвуда – относительной разностью плотностей $R_\rho = \frac{\rho_t - \rho_d}{\rho_t + \rho_d}$, коэффициентов поверхностного натяжения

$$R_\sigma = \frac{\sigma_t - \sigma_d}{\sigma_t + \sigma_d} \text{ и динамических вязкостей } R_\mu = \frac{\mu_t - \mu_d}{\mu_t + \mu_d}.$$

Безразмерные отношения позволяют оценивать вклад процессов различной природы в общую картину течений и сопоставлять условия независимых экспериментов.

Большое число безразмерных отношений отражает многообразие и сложность одновременно протекающих процессов, включающих и конверсию – освобождение и накопление ППЭ, протекающую в областях с масштабами порядка супрамолекулярных размеров $\delta_\sigma \sim 10^{-6}$ см, и общее течение с масштабом порядка нескольких диаметров капли D . Собственные масштабы определяют требования к выбору размеров области наблюдения, пространственно-временному разрешению инструментов, длительности регистрации быстро эволюционирующей картины течений.

В данных опытах основное внимание впервые уделяется определению влияния растворимости контактирующих веществ на пространственную структуру течения, порождаемого в покоящейся принимающей жидкости свободно падающей каплей. При достаточно большой контактной скорости капли при $R_{En} \gg 1$ в импактном режиме при слиянии смешивающихся жидкостей наблюдается распад капли на волокна [15]. Во всех опытах данной серии отдельные капли различных веществ свободно падали в воду. Проводилась цветная видеорегистрация начальной стадии картины формирования течения с целью определения формы и анализа эволюции структуры дна первичной каверны.

4. Визуализация картины течения при слиянии капли раствора перманганата калия с водой

Выборка кадров из видеогаммы картины слияния свободно падающей капли разбавленного раствора перманганата калия с водой, иллюстрирующая особенности начального этапа картины течения, приведена на рис. 1. Важно отметить, что плотность раствора $KMnO_4$ превышает плотность воды и плотностное отношение $R_\rho = \frac{\rho_t - \rho_d}{\rho_t + \rho_d} = -0.02 < 0$, характеризу-

ющее влияние инерционных эффектов, принимает отрицательное значение.

В течение первых $\Delta t = 250$ мкс капля распадается в пятне контакта на отдельные волокна, как и в случае слияния с тонким слоем жидкости, документированным в [19] и с глубокой жидкостью [9]. Часть струек, оставляющих волокна на стенках каверны, венца, пронзает плену и образует выступающие тонкие шипы, с вершин которых вылетают последовательности мелких капель.

Часть волокон пронзает дно каверны и формирует тонкий промежуточный слой, в котором тонкие струйки, содержащие вещество капли, разделены прослойками принимающей жидкости (рис. 1, $t = 0.25$ мс). Вся сложная система тонких течений непрерывно перестраивается: каверна углубляется, основания волокон движутся вместе с дном каверны, а их вершины вторгаются в толщу принимающей жидкости, что приводит к увеличению толщины волокнистого слоя – основы будущего промежуточного слоя. Одновременно растет высота венца, толщина шипов, выступающих с кромки пленки и диаметр капелек, вылетающих с их вершин. Более детально картина эволюции вершины венца, струек, шипов и капель приведена в [9].

По мере углубления каверны изменяется форма нижней части течения. При $t = 0.5$ мс к плоскому дну каверны диаметром $d_c = 5.5$ мм и глубиной $h_c = 0.48$ мм примыкает волокнистый слой высотой $h_l = 0.5$ мм и диаметром $d_l = 3.64$ мм. По мере погружения капли дно каверны начинает скругляться, диаметр основания увеличивается, размеры более плотно

окрашенного подстилающего слоя (ПС) также увеличиваются, и при $t = 0.75$ мс составляют $h_l = 0.6$ мм и $d_l = 3.92$ мм. При этом неоднородности нижней поверхности слоя, иллюстрирующие вершины утолщающихся волокон, сглаживаются.

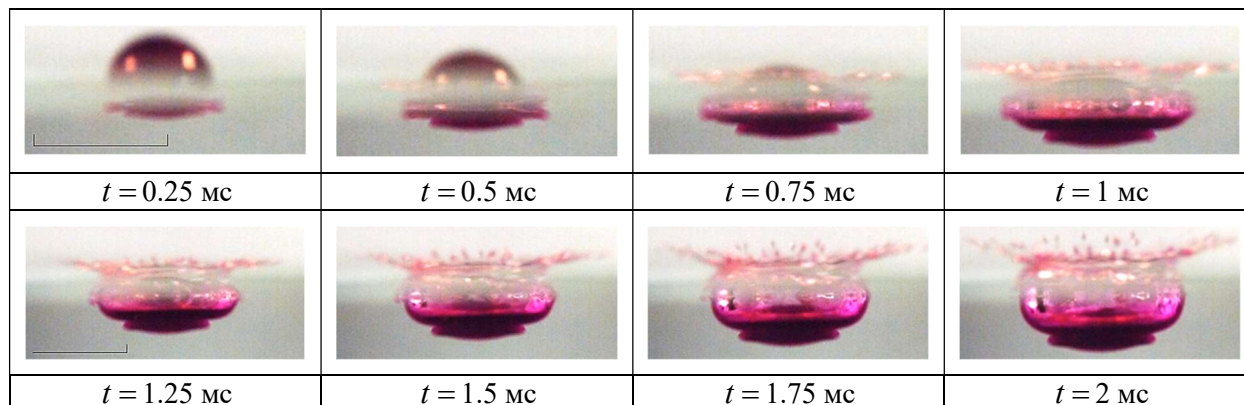


Рис. 1. Эволюция течения при погружении капли разбавленного раствора KMnO_4 в водопроводную воду ($D = 4.2$ мм, $U = 3.1$ м/с, $En_\sigma = 4.2$ мкДж, $En_k = 200$ мкДж, $Re = 13300$, $Fr = 234$, $We = 553$, $Bo = 2.4$, $Oh = 0.0018$, $R_{En} = En_k / En_\sigma = 46$, $R_W = 1.65 \times 10^{-3}$, $R_p = -0.02$)

Контраст между размерами окрашенной нижней части каверны и ПС становится еще более заметным при $t = 1$ мс ($d_c = 7.22$ мм, $d_l = 4.33$ мм, $h_c = 1$ мм, $h_l = 0.67$ мм). Вертикальные следы на стенках каверны – изображения волокон, содержащих вещество капли, более наглядно представлены в [15]. В верхней части рисунка видны выступающие над венцом шипы. Постепенно каверна принимает бочкообразную форму. Дальнейшая эволюция каверны, венца, шипов и брызг согласуется с неоднократно наблюдаемой картиной течения [2, 9, 10], с существенным отличием в неоднородности окраски и распределения вещества капли по высоте каверны – ее нижняя часть окрашена более ярко, чем верхняя. При этом к дну каверны примыкает промежуточный слой, размеры которого монотонно меняются.

Темп монотонного роста диаметра каверны постепенно спадает вплоть до линейного расширения на более поздних временах. Глубина каверны в стадии роста монотонно увеличивается (точность измерений геометрии течений окрашенной жидкости здесь несколько ниже, чем при слиянии прозрачных сред вследствие частичного затенения границы каверны). Диаметр промежуточного слоя в начале формирования растет быстрее, чем на границе области наблюдения, высота промежуточного слоя достигает $h_l = 0.84$ мм при $t = 1.5$ мс и далее несколько уменьшается вследствие его растекания по все более выраженной границе растущей каверны.

Неоднородность картины распределения вещества капли под дном каверны, которую иллюстрирует фотограмма яркости изображения, приведена на рис. 2, а, б. Контрасты распределения яркости постепенно сглаживаются по мере формирования промежуточного слоя с собственными значениями плотности среды и концентрации пигмента. Слой оконтурен четкими границами.

Изменение концентрации красителя качественно иллюстрирует картина распределения яркости изображения, снятого вдоль кривой, изображенной на рис. 2, а при $t = 0.5$ мс. Спектральный анализ позволяет выделить масштабы $\lambda = 0.86, 0.57, 0.31, 0.23$ мм, которые можно считать характеристиками толщин волокон и прослоек между ними. Нечеткость изображения объясняется быстрым движением элементов картины течения – тонких волокон, размыванием их границ вследствие относительно большой выдержки, интегрированием изображения вдоль луча зрения, абберациями оптической системы. Представляет интерес дальнейшая доработка методики для повышения разрешающей способности инструментов и четкости изображения.

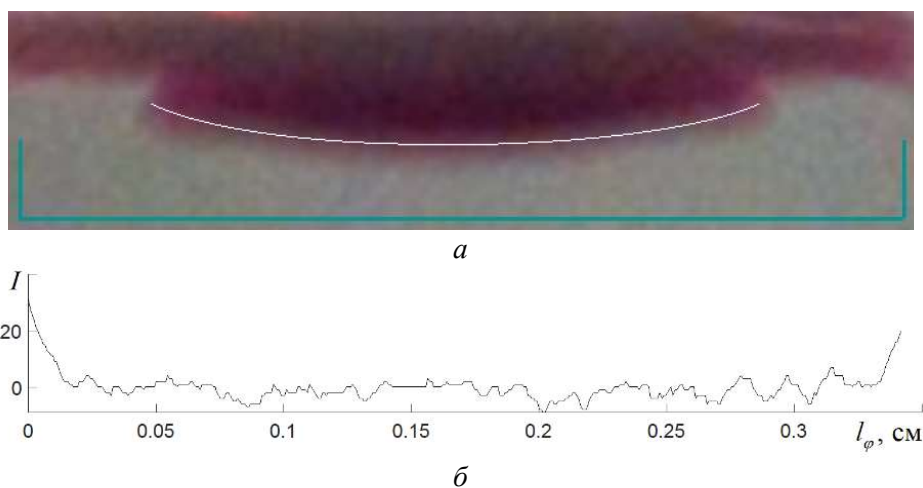


Рис. 2. Фотометрия вдоль границы интрузии, образованной погружением капли водного раствора перманганата калия в воду при $t = 0.5$ мс – отсчет от момента первичного контакта. Масштабы $\lambda = 0.86, 0.57, 0.31, 0.23$ мм

В таблице 2 приведены значения размеров структурных компонентов, иллюстрирующие эволюция размеров ранее замеченного промежуточного слоя [12].

Таблица 2

Размеры каверны и промежуточного слоя при погружении капли раствора KMnO_4 в воду

t , мс	0.25	0.5	0.75	1.0	1.25	1.5	1.75	2.0
d_c , мм	3.52	5.5	6.6	7.22	7.5	8.09	8.5	8.78
h_c , мм	0.23	0.48	0.73	1.0	1.32	1.52	1.83	2.08
d_l , мм	3.08	3.64	3.92	4.33	4.7	5.04	5.4	5.77
h_l , мм	0.38	0.5	0.6	0.67	0.71	0.84	0.83	0.82

И диаметр, и высота каверны несколько неравномерно растут со временем, особенно активное увеличение диаметра наблюдается в интервале $1.25 < t < 1.75$ мс. В этом интервале отмечается небольшое уменьшение толщины промежуточного слоя, обусловленное его растяжением вдоль дна быстро расширяющейся каверны.

5. Эволюция картины течения на начальном этапе растекания капли воды в растворе роданида аммония

Для оценки влияния инерциальных эффектов, обусловленных различиями плотности контактирующих жидкостей, в следующей серии опытов капли воды плотностью $\rho_d = 0.998$ г·см⁻³ падали в раствор роданида аммония NH_4SCN , плотностью $\rho_l = 1.043$ г·см⁻³. При этом плотностное соотношение меняет знак и становится равным $R_\rho = 0.023$. Выборки из видеogramмы начального этапа картины слияния капли воды приведены на рис. 3.

Как и в предыдущем опыте, первыми в картине течения появляются волокна под плоским дном каверны при $t = 0.25$ мс. По мере углубления первоначально плоское дно каверны начинает скругляться, как и нижняя кромка волокнистого слоя $t = 0.5$ мс.

Все традиционные элементы течения: остаток капли, выступающий над поверхностью жидкости, растущий венец, окруженный пеленой с системой шипов и капельными струями, цилиндрическая каверна со скругленным основанием, представлены при $t = 0.75$ мс. Растущая каверна в интервале $1.0 < t < 2.0$ мс сохраняет цилиндрическую форму и не деформируется в бочкообразную при $R_\rho < 0$, как на рис. 1. При этом дно каверны оказывается более выпуклым. Промежуточный слой покрывает все дно каверны, а не только его часть, как на рис. 1.

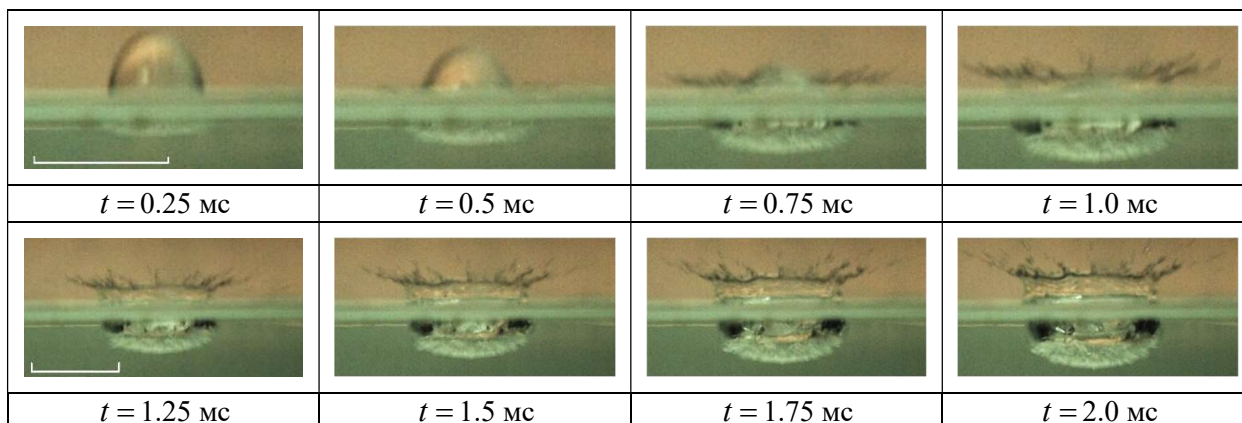


Рис. 3. Эволюция картины растекания капли воды в 20 % водном растворе роданида аммония ($D=4.3$ мм, $U=3.1$ м/с, $En_\sigma=3.9$ мкДж, $En_k=186$ мкДж, $Re=13000$, $Fr=234$, $We=572$, $Bo=2.45$, $Oh=0.0018$, $R_{En}=En_k/En_\sigma=48$, $R_W=1.66 \times 10^{-3}$, $R_\rho=0.023$, $R_\sigma=-0.14$, $R_\mu=-0.05$)

Распределение интенсивности света вдоль выделенной линии, проходящей по волокнистому слою, представлено на рис. 4 для двух моментов времени $t=0.5$ и 1.0 мс. В спектре вариаций интенсивности на рис. 4а выражены масштабы $\lambda=1.2, 0.6, 0.46, 0.33$ мм, а на рис. 4, б при $t=1.0$ мс выражен масштаб $\lambda=1$ мм. Здесь сглаживание и размывание волокон воды в растворе роданида аммония идет более быстро, чем при расплывании волокон перманганата калия в воде.

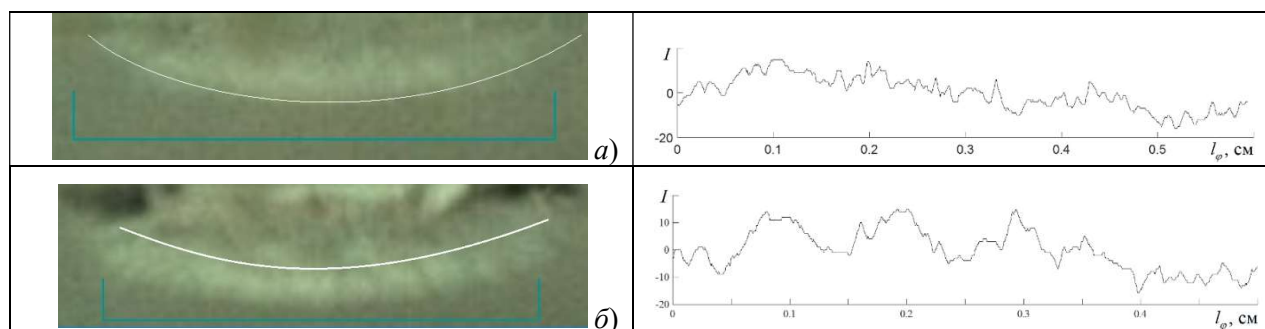


Рис. 4. Фотометрия вдоль границы интрузии, образованной погружением капли воды в 20 % раствор роданида аммония при $t=0.5$ и 1 мс – отсчет от момента первичного контакта. Масштабы пространственного спектра: а) $t=0.5$ мс, $\lambda=1.2, 0.6, 0.46, 0.33$ мм; б) $t=1$ мс, $\lambda=1$ мм

Размеры каверны, диаметр и толщина волокнистого слоя, представленные в таблице 3, далее монотонно растут, радиусы кривизны центра дна каверны и основания слоя монотонно уменьшаются. Дальнейшая эволюция течения в целом проходит в той же последовательности, что и на рис. 1. Единственное заметное различие – волокна, здесь они более четко выраженные на всем этапе эволюции, покрывают все дно каверны, а не только ее центральную часть (см. рис. 1).

Таблица 3

Размеры каверны и промежуточного слоя при погружении капли воды в раствор роданида аммония

t , мс	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75	2
d_c , мм	-	-	5.3	5.85	6.9	7.96	8.4	8.65
h_c , мм	-	-	0.37	0.54	0.8	1.05	1.2	1.44
d_l , мм	4.24	6.2	6.9	7.38	7.93	8.81	9.12	9.17
h_l , мм	0.5	0.77	0.81	0.9	1.08	1.18	1.35	1.48

Как следует из представленных данных, при слиянии более легкой жидкости с тяжелой диаметр каверны монотонно увеличивается, однако темп его изменения со временем спадает быстрее при слиянии тяжелой жидкости с легкой.

Глубина каверны со временем растет, как и ширина промежуточного слоя, который охватывает ее и снизу, и сбоку. Постепенно увеличивается и высота промежуточного слоя. Тонкая изрезанность промежуточного слоя здесь размывается медленнее, чем при погружении капли раствора перманганата калия в воду.

6. Картина распределения вещества капли на начальном этапе растекания капли анилина в воде

Изучению закономерностей слияния капель смешивающихся веществ посвящено большое число экспериментальных и численных исследований. Существенно меньшее внимание уделено изучению растекания плохо растворимых и практически несмешивающихся жидкостей. В данных опытах в качестве объекта исследований выбрана капля анилина, вещества, растворимость которого в воде не превышает 3 %.

Выборки из видеogramмы, иллюстрирующей картину течения при слиянии капли анилина с водой, представлены на рис. 5. В течение короткого времени с момента первичного контакта $t < 0.25$ мс капля деформирует поверхность принимающей жидкости. Выступающая из слоя жидкости коническая пелена с отдельными волокнами на внешней кромке появляется при $t = 0.5$ мс. Дно каверны остается плоским, стенки – скругленными. Граница жидкости резкая. Отдельные выраженные волокна и основа венца появляются при $t = 0.75$ мс. При этом дно и стенки каверны оказываются частично покрытыми слоем анилина. Качество изображения не позволяет точно определить, распределяется ли анилин отдельными скругленными глобулами или вытянутыми волокнами, как в случае смешивающихся жидкостей. Из вершин зубцов на кромке пелены на вершине стягивающегося венца, содержащего обе контактирующие жидкости, выступают редкие шипы, имеющие коническую форму.

Неровность верхней поверхности венца наблюдалась ранее и в опытах с другими жидкостями, ее появление связывается с отклонением от осевой симметрии формы головной части капли, совершающей в полете рэлеевские осцилляции, иногда высокой моды. В ходе дальнейшей эволюции при $t > 1.25$ мс анилин постепенно стекает ко дну каверны и все более равномерно распределяется вдоль ее поверхности. Промежуточный слой анилина толщиной $h_l = 1$ мм, дно каверны, свободная поверхность жидкости, венец высотой $h_w = 0.38$ мм с гладкой верхней кромкой высотой $h_e = 1.84$ мм, пелена на вершине венца с отдельными зубцами и редкими шипами, с вершин которых выбрасываются капли, выражены при $t = 1.5$ мс.

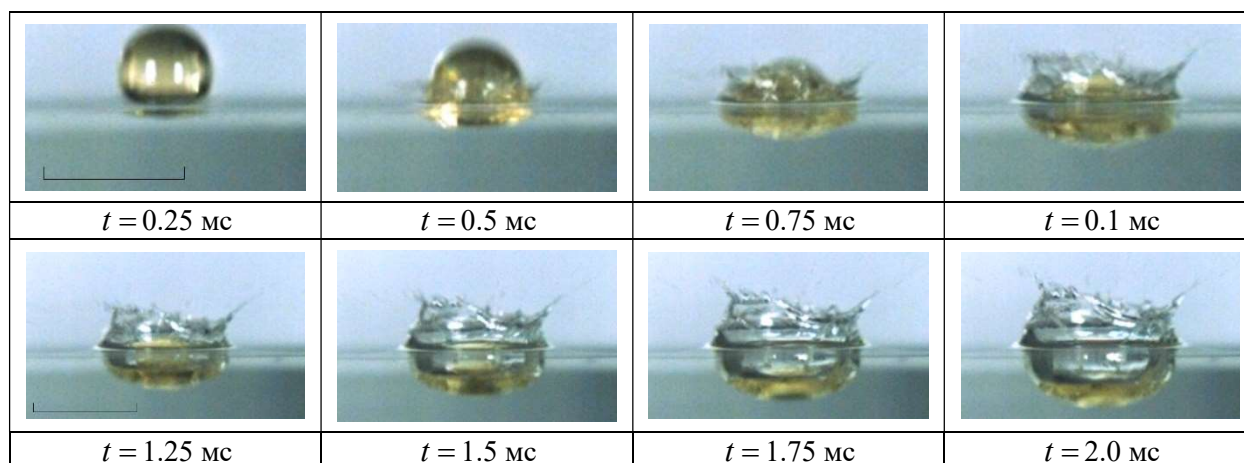


Рис. 5. Эволюция картины течения при погружении капли анилина в воду ($D = 3.5$ мм, $U = 3.1$ м/с, $En_\sigma = 1.65$ мкДж, $En_k = 96$ мкДж, $Re = 2400$, $Fr = 245$, $We = 700$, $Bo = 2.85$, $Oh = 0.011$, $R_{En} = En_k / En_\sigma = 58$, $R_W = 2.49 \times 10^{-3}$, $R_\rho = -0.01$, $R_\sigma = 0.26$, $R_\mu = -0.63$)

Сферическое основание остатка капли отчетливо просматривается и при $t = 1.75$ мс, где в картине течения также выражен слой анилина, свободная поверхность с капиллярным поднятием жидкости, венец и более многочисленные шипы на ее вершине. Тонкая структура течения начинает сглаживаться при $t = 2.0$ мс.

Картина распределения анилина под каверной постепенно теряет однородность, в ней появляются более и менее плотно окрашенные участки, свидетельствующие о распаде единой структуры на отдельные капли. Размеры основных элементов картины течения приведены в таблице 4 (d_c, d_l – диаметры каверны и промежуточного волокнисто слоя, h_c – глубина каверны, h_l – толщина промежуточного слоя у дна каверны, h_w, h_e – высота венца и пелены).

Все геометрические параметры течения: диаметр и высота каверны, венца, ширина промежуточного слоя d_l монотонно растут со временем на первичном этапе эволюции течений. Высота слоя анилина на венце достигает максимума $h_e = 2.4$ мм при $t = 1.5$ мс и далее убывает.

Таблица 4

Размеры каверны, промежуточного слоя и венца при погружении капли анилина в воду

t , мс	0.25	0.5	0.75	1.0	1.25	1.5	1.75	2.0
d_c , мм	-	-	-	5.71	6.53	7	7.34	7.88
h_c , мм	-	-	-	0.39	0.7	1	1.35	1.57
d_l , мм	3.77	4.78	5.82	6.6	7.3	7.85	8.3	8.8
h_l , мм	0.26	0.57	0.86	0.94	1	1.04	1.09	1.3
h_w , мм	-	-	-	0.38	0.87	1.17	1.23	1.33
h_e , мм	-	0.88	1.5	1.84	1.9	2.4	2.12	1.94

Распределения интенсивности освещенности в слое анилина под поверхностью каверны в промежуточном слое при $t = 0.75$ и 1 мс, в которых уже выражены округлые неоднородности – свидетельства формирования капелек анилина в воде, приведены на рис. 6.

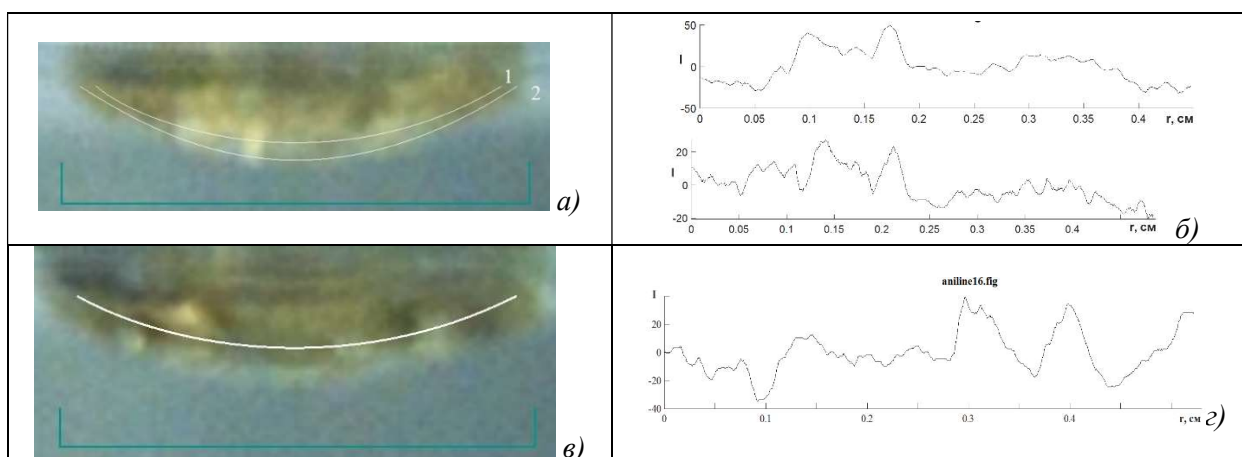


Рис. 6. Фотометрия границы интрузии, образованной погружением капли анилина в воду при $t = 0.75$ и 1 мс – отсчет от момента первичного контакта

Неоднородности с масштабами $\lambda = 0.9, 0.4, 0.34$ мм по линии 1 и $\lambda = 0.7$ мм по линии 2 выражены в спектре флуктуаций, представленных при $t = 0.75$ мс (рис. 6, б). Со временем масштабы неоднородностей несколько увеличиваются и при $t = 1$ мс они составляют $\lambda = 0.87, 0.65, 0.52, 0.44$ мм. В ходе дальнейшей эволюции течений под каверной формируются отдельные сгустки анилина.

7. Визуализация картины растекания свободно падающей капли нефти в воде

Особый интерес представляет изучение картины растекания в воде капли наиболее активно транспортируемого продукта – сырой нефти. Данная серия опытов проведена в диапазоне параметров, в котором кинетическая энергия капли превышает потенциальную поверхностную энергию и при слиянии смешивающихся жидкостей соответствует импактному режиму течения. Картины растекания вещества капли смешивающейся с принимающей жидкостью в импактном режиме представлены на рис. 1 и 3. Существенным элементом структуры течения здесь являются тонкие струйки, образующиеся в пятне контакта сливающихся жидкостей. При слиянии несмешивающихся жидкостей не наблюдается распад капли на тонкие струйки. Выборка из видеогаммы картины растекания свободно падающей капли нефти в воде в диапазоне комнатных температур представлена на рис. 7.

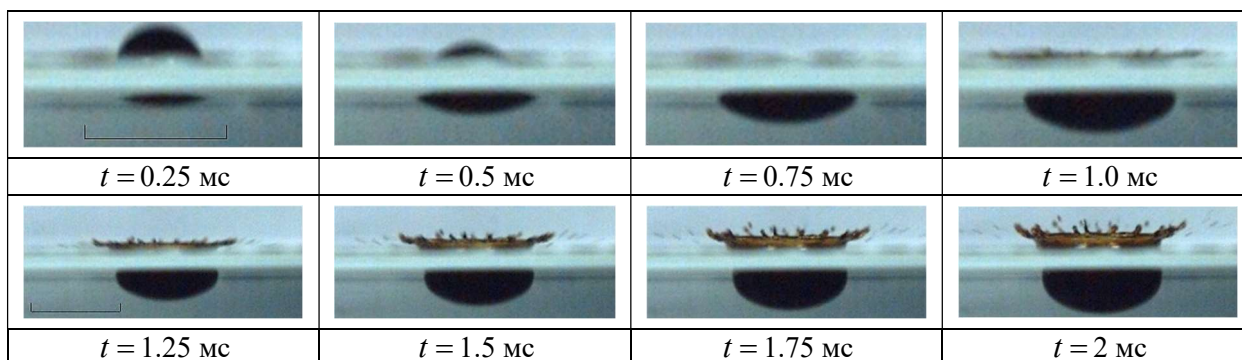


Рис. 7. Эволюция картины течения при погружении капли нефти в воду ($D=2.8$ мм, $U=3$ м/с, $En_\sigma=0.74$ мкДж, $En_k=45$ мкДж, $Re=1050$, $Fr=328$, $We=730$, $Bo=2.23$, $Oh=0.026$, $R_{En}=En_k/En_\sigma=61$, $R_W=3.26\times 10^{-3}$, $R_\rho=0.07$, $R_\sigma=0.42$, $R_\mu=-0.75$)

Здесь нижняя поверхность области втекания остается гладкой на всех этапах растекания капли. Нижняя граница пятна нефти, втекающей в воду, сохраняет выпуклость на начальном этапе, радиус кривизны в центре области слияния составляет $r_s=4.07$ мм. Собственно пятно растекается, его диаметр составляет $d_s=2.81$ мм, а высота $h_s=1.72$ мм (рис. 7, $t=0.25$ мс). Окрашенная область втекания принимает цилиндрическую форму, радиус кривизны в центре $r_s=3.76$ мм (рис. 7, $t=0.5$ мс). В таблице 5 приведены данные, иллюстрирующие эволюцию геометрии пятна – диаметр d_s , высота h_s и радиуса кривизны в центре дна r_s .

Таблица 5

Параметры геометрии растекания капли нефти в чистой воде

t , мс	0.25	0.5	0.75	1.0	1.25	1.5	1.75	2.0
d_s , мм	2.81	4.0	4.85	5.36	5.8	6.1	6.44	6.74
h_s , мм	1.72	0.58	0.86	1.16	1.44	1.7	1.94	2.2
r_s , мм	4.07	3.76	3.83	3.8	4.2	4.42	4.6	4.7

Шипы облака брызг и элементы венца начинают появляться над поверхностью жидкости при $t=0.75$ мс и при $t=1.0$ мс становятся четко выраженными. Число шипов прогрессивно падает с увеличением высоты венца и составляет $n_1=21$ при $t=1.25$ мс и $n_2=15$ при $t=2$ мс (средний диаметр шипов увеличивается от 0.15 до 0.26 мм). Высокая плотность окраски нефти не позволяет в боковой проекции идентифицировать образование каверны. Ширина и высота области, содержащей нефть в толще жидкости, монотонно увеличиваются. Дно каверны, в начале плоское, постепенно начинает скругляться. Радиус кривизны

достигает минимального значения при $t = 1.0$ мс. Далее его величина несколько подрастает и стабилизируется.

7. Обсуждение результатов

Традиционно при изучении картины слиянии свободно падающих капель в опытах используются однородные по физическим свойствам жидкости – чистые вещества, растворы красителей, электролиты. Значения определяющих физических параметров в данных опытах, в котором оставался неизменным капилляр дозатора диаметром $d = 4$ мм, приведены в таблице 6. Капли отрывались под действием собственного веса и падали с высоты $H = 50$ см.

Таблица 6

Физические параметры капли в проведенных опытах

Жидкости Параметры	KMnO ₄ -вода	Вода- NH ₄ SCN	Анилин-вода	Нефть-вода
D , мм	4.2	4.3	3.5	2.8
U , м/с	3.1	3.1	2.9	3

Измерения размеров капель, форма которых в области контакта с принимающей жидкостью оказалась близкой к сферической, показывает, что диаметр капель раствора KMnO₄ и анилина практически совпадает с диаметром капилляра. Размеры отрывающейся капли других веществ существенно зависят от плотности и величины коэффициента поверхностного натяжения. Диаметр капли воды несколько больше диаметра капилляра, а капли нефти – заметно меньше. Скорости капель в момент контакта практически совпадают.

Большое число опытов, выполненных со смешивающимися жидкостями, позволили выделить два режима течения: интрузивный, в котором капля, втекая в жидкость, сохраняет сплошность; и импактный, когда капля растекается на отдельные струйки [20]. Границу между режимами при контакте смешивающихся жидкостей определяет условие равенства кинетической и потенциальной поверхностной энергии капли в момент первичного контакта.

Уменьшение растворимости жидкости капли в принимающей среде сопровождается качественным изменением картины течения. В частности, при растекании капли анилина (растворимость меньше 3 %) в промежуточном слое наблюдается образование округлых неоднородностей – предшественников формирования отдельных капелек. Граница области растекания капли нефти сохраняет сплошность более продолжительное время.

Для сравнения в таблице 7 приведены полные наборы традиционных безразмерных параметров и дополнительных безразмерных отношений компонентов энергии, коэффициентов поверхностного натяжения и плотностей жидкостей, характеризующих капельные течения.

Различия в значениях числа Рейнольдса капель воды и роданида аммония обусловлены влиянием вязкости, которая несколько меньше у электролита. Резкое уменьшение числа Рейнольдса для капли анилина объясняется большим значением вязкости, а капли нефти – малым диаметром и большим значением вязкости. Вариации значений числа Фруда объясняются влиянием диаметра капли. Немонотонное изменение чисел Вебера и Бонда объясняется антагонистическим влиянием значения диаметра и коэффициента поверхностного натяжения. На вариации значения числа Онезорге основное влияние оказывает вязкость.

Отношение компонентов энергии R_{En} , которое во всех случаях существенно превышает критическое значение $R_{En} \sim 1$, как и отношение плотностей энергии, максимально для капель анилина. Сравнение картин течения при слиянии капель, приведенных на рис. 1, 3, 5, 7 показывает, что на распределение вещества капли в принимающей жидкости сильное влияние оказывают и термодинамические [21], и химические параметры сред. Особенности структуры течения при контакте химически взаимодействующих сред нуждаются в более глубоком изучении.

Таблица 7

Полные наборы традиционных безразмерных параметров

Жидкости Параметры	КМnO ₄ -вода	Вода- NH ₄ SCN	Анилин-вода	Нефть-вода
D , мм	4.2	4.3	3.5	2.8
U , м/с	3.1	3.1	2.9	3
Re	13000	13300	2400	1050
Fr	234	228	245	328
We	553	570	700	730
Bo	2.4	2.5	2.85	2.23
Oh	0.0018	0.0018	0.011	0.026
R_{En}	46	48	58	61
$R_W \times 10^3$	1.65	1.66	2.49	3.26
R_ρ	-0.02	0.023	-0.01	0.07
R_σ	0.007	-0.14	0.26	0.42
R_μ	0.001	-0.05	-0.63	0.75

Слабая зависимость параметров геометрии течения от безразмерных отношений R_ρ , R_σ , R_μ указывает на пренебрежимо малое влияние относительных инерционных и диссипативных свойств жидкостей на тонкую структуру течения на начальном этапе процесса слияния капли в исследованном диапазоне параметров.

8. Заключение

Проведена визуализация картины течения при слиянии свободно падающих капель перманганата калия с водой, воды с раствором роданида аммония, а также растекания капли анилина и нефти в бассейне с водой, в диапазоне заметного превышения кинетической энергии капли на потенциальной поверхностной энергией. В данных условиях капли растворов смешивающихся жидкостей распадаются на отдельные волокна. Однако капли анилина и нефти сохраняют свою сплошность, что указывает на заметное влияние и термодинамических и химических свойств контактирующих веществ на структуру и динамику капельных течений.

Благодарности и ссылка на гранты

Работа выполнена в Лаборатории механики жидкостей ИПМех РАН при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Госзадания, номер госрегистрации: 124012500442-3.

Литература

1. Thomson J.J., Newall H.F. On the formation of vortex rings by drops falling into liquids, and some allied phenomena // Proc. R. Soc. Lond. 1885. Vol. 29. Pp. 417–436.
2. Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю. Погружение свободно падающей капли и последующий всплеск: тонкие структуры течений // Проблемы эволюции открытых систем. 2016. Т. 19. Вып. 2. С. 2–30.
3. Kim D., Lee J., Bose A., Kim I., Lee J. The impact of an oil droplet on an oil layer on water // J. Fluid Mech. 2021. Vol. 906. A5. DOI: 10.1017/jfm.2020.791
4. Okabe J., Inoue S. The Generation of Vortex Rings II // Rep. Res. Inst. Appl. Mech. 1961. Vol. 9. Pp. 147–161.
5. Rodriguez F., Mesler R. The penetration of drop-formed vortex rings into pools of liquid // J. Colloid Interface Sci. 1988. Vol. 121(1). Pp. 121–129. DOI: 10.1016/0021-9797(88)90414-6
6. Степанова Е. В., Чашечкин Ю. Д. Перенос маркера в составном вихре // Изв. РАН. МЖГ. 2010. № 6. С. 12–29.

7. Zhang Y., Mu Z., Wei Y., Jamil H., Yang Y. Evolution of the heavy impacting droplet: via a vortex ring to a bifurcation flower // *Phys. of Fluids*. 2021. Vol. 33. Pp. 113603. DOI: 10.1063/5.0064072
8. Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю. Перенос вещества капли в толщу принимающей жидкости в начальной стадии процесса слияния // *Известия РАН. МЖГ*. 2023. № 1. С. 54–68. DOI: 10.31857/S056852812260031X
9. Chashechkin Yuli D., Ilinykh Andrey Yu. Fine flow structure at the miscible fluids contact domain boundary in the impact mode of free-falling drop coalescence // *Fluids*. 2023. Vol.8(10). Pp. 269. DOI: 10.3390/fluids8100269
10. Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю. Множественные выбросы брызг при ударе капли // *Доклады РАН*. 2020. Т. 494. С. 42–46. DOI: 10.31857/S2686740020050181
11. Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю. Перенос вещества капли при формировании первичной каверны // *Доклады РАН*. 2023. Т. 508. С. 42–52. DOI: 10.31857/S2686740022060062
12. Kuhlman J.M., Hillen N.L. Droplet impact cavity film thickness measurements versus time after drop impact and cavity radius for thin static residual liquid layer thicknesses // *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2016. Vol.77. Pp. 246–256. DOI:10.1016/j.expthermflusci.2016.04.020
13. Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю., Хайирбеков Ш. Начальный этап слияния составной капли в импактном режиме // *Известия РАН. МЖГ*. 2024. № 2. С. 35–51. DOI: 10.31857/S1024708424020045
14. Ильиных А.Ю., Чашечкин Ю.Д. Гидродинамика погружающейся капли: несмешивающиеся жидкости // *Известия РАН. МЖГ*. 2020. Т. 55. № 2. С. 169–176
15. Chashechkin Yu. D., Ilinykh A. Y., Intrusive and impact modes of a falling drop coalescence with a target fluid at rest // *Axioms*. 2023. Vol. 12(4). Pp. 374. DOI:10.3390/axioms12040374
16. Thoraval M.-J., Takehara K., Etoh T. G., Thoroddsen S.T. Drop impact entrapment of bubble rings // *J. Fluid Mech.* 2013. Vol. 724. Pp. 234–258. DOI: 10.1017/jfm.2013.147
17. УИУ “ГФК ИПМех РАН”: Гидрофизический комплекс для моделирования гидродинамических процессов в окружающей среде и их воздействия на подводные технические объекты, а также распространения примесей в океане и атмосфере. Сайт: <http://www.ipmnet.ru/uniquequip/gfk/#equip>
18. Эйзенберг Д., Кауцман В. Структура и свойства воды. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 279 с.
19. Li E. Q., Thoraval M.-J., Marston J. O., Thoroddsen S. T. Early azimuthal instability during drop impact // *J. Fluid Mech.* 2018. Vol. 848. Pp. 821–835. DOI: 10.1017/jfm.2018.383
20. 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, № 1. С. 31–35. DOI: 10.31857/S2686740021020139
21. Chashechkin Yu.D. Foundations of engineering mathematics applied for fluid flows // *Axioms*. 2021. Vol.10. Pp. 286. <https://doi.org/10.3390/axioms10040286>

References

1. Thomson J.J., Newall H.F., On the formation of vortex rings by drops falling into liquids, and some allied phenomena, *Proc. R. Soc. Lond.*, 1885, vol. 29, pp. 417–436.
2. Chashechkin Yu. D., Ilinykh A. Yu., Free-falling droplet immersion and subsequent splash: fine flow structures, *Problems of evolution of open systems*, 2016, vol. 19, no. 2, pp. 2–30.
3. Kim D., Lee J., Bose A., Kim I., Lee J., The impact of an oil droplet on an oil layer on water, *J. Fluid Mech.*, 2021, vol. 906, A5. DOI: 10.1017/jfm.2020.791
4. Okabe J., Inoue S., The Generation of Vortex Rings II, *Rep. Res. Inst. Appl. Mech.*, 1961, vol. 9, pp. 147–161.
5. Rodriguez F., Mesler R., The penetration of drop-formed vortex rings into pools of liquid, *J. Colloid Interface Sci.*, 1988, vol. 121, no. 1, pp. 121–129. DOI: 10.1016/0021-9797(88)90414-6

6. Stepanova E. V., Chashechkin Yu. D., Marker transport in a composite vortex, *Fluid Dyn.*, 2010, vol. 45, no. 6, pp. 843–858. DOI: 10.1134/S0015462810060025
7. Zhang Y., Mu Z., Wei Y., Jamil H., Yang Y., Evolution of the heavy impacting droplet: via a vortex ring to a bifurcation flower, *Phys. of Fluids*, 2021, vol. 33, pp. 113603. DOI: 10.1063/5.0064072
8. Il'inykh A. Yu., Chashechkin Yu. D., Mass transfer from a drop in fall into the fluid thickness in the initial stage of the coalescence process, *Fluid Dyn.*, 2023, vol. 58, no. 1, pp. 31–44. DOI: 10.1134/S0015462822601607
9. Chashechkin Yuli D., Ilinykh Andrey Yu., Fine flow structure at the miscible fluids contact domain boundary in the impact mode of free-falling drop coalescence, *Fluids*, 2023, vol. 8, no. 10, pp. 269. DOI: 10.3390/fluids8100269
10. Chashechkin Yu. D., Ilinykh A. Yu., Multiple emissions of splashes upon drop impact, *Doklady Physics*, 2020, vol. 65, no. 10, pp. 384–388. DOI: 10.1134/S1028335820100067
11. Chashechkin Yu. D., Ilinykh A. Y., Transfer of Drop Material during the Formation of a Primary Cavern, *Doklady Physics*, 2023, vol. 68, no. 1, pp. 1–10. DOI: 10.1134/S1028335822120023
12. Kuhlman J.M., Hillen N.L., Droplet impact cavity film thickness measurements versus time after drop impact and cavity radius for thin static residual liquid layer thicknesses, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 2016, vol. 77, pp. 246–256. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2016.04.020
13. Chashechkin Yu. D., Il'inykh A. Yu., Khaiirbekov Sh. Kh., The initial stage of the coalescence of a compound drop in an impact regime, *Fluid Dyn.* 2024. vol. 59, no. 2, pp. 202–218. DOI: 10.1134/S0015462824600226
14. Il'inykh A. Yu., Chashechkin Yu. D., Hydrodynamics of a submerging drop: immiscible liquids, *Fluid Dyn.*, 2020, vol. 55, no. 2, pp. 162–170. DOI: 10.1134/S1028335820020020
15. Chashechkin Yu. D., Ilinykh A. Y., Intrusive and impact modes of a falling drop coalescence with a target fluid at rest, *Axioms*, 2023, vol. 12, no. 4, pp. 374. DOI: 10.3390/axioms12040374
16. Thoraval M.-J., Takehara K., Etoh T. G., Thoroddsen S. T., Drop impact entrapment of bubble rings, *J. Fluid Mech.*, 2013, vol. 724, pp. 234–258. DOI: 10.1017/jfm.2013.147
17. GFK IPMech RAS: Hydrophysical Complex for Modeling Hydrodynamic Processes in the Environment and their Impact on Underwater Technical Objects, as well as the Spread of Impurities in the Ocean and Atmosphere. <http://www.ipmnet.ru/uniquequip/gfk/#equip>
18. Eisenberg D., Kauzmann W., *The Structure and Properties of Water*, Oxford: Oxford University Press, 2005.
19. Li E. Q., Thoraval M.-J., Marston J. O., Thoroddsen S. T., Early azimuthal instability during drop impact, *J. Fluid Mech.*, 2018, vol. 848, pp. 821–835. DOI: 10.1017/jfm.2018.383
20. Chashechkin Y. D., Ilinykh A. Y., Drop decay into individual fibers at the boundary of the contact area with the target fluid, *Doklady Physics*, 2021, vol. 66, no. 4, pp. 101–105. DOI: 10.1134/S1028335821040078
21. Chashechkin Yu. D., Foundations of engineering mathematics applied for fluid flows, *Axioms*, 2021, vol. 10, pp. 286. <https://doi.org/10.3390/axioms10040286>

Статья поступила в редакцию 7 февраля 2025 г.