

# Evolution of the Spreading Pattern of a Freely Falling Petroleum Drop in Water in the Impact Flow Regime

Yu. D. Chashechkin, A. Yu. Ilinykh

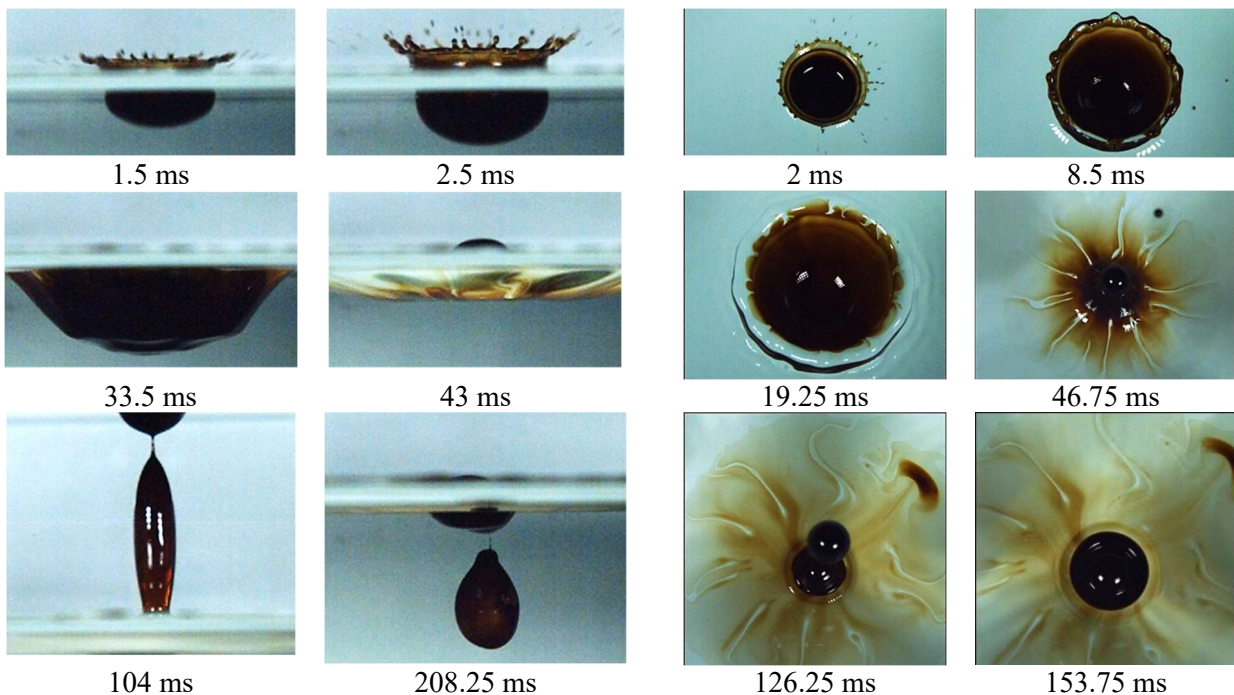
*Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, 119526, Russia*

yulidch@gmail.com, ilinykh@ipmnet.ru

## Abstract

High-speed video recording was used to trace in detail the initial stage of the flow pattern evolution during the spreading of a freely falling oil drop in a cuvette containing tap water. The experiments were conducted in impact mode, when the drop's kinetic energy (DKE) exceeds its surface potential energy (SPE). At the initial stage of spreading, the drop, deforming the free surface, forms an energy-laden layer in the contact area, comprising both contacting fluids. The boundary of the contact area disintegrates into individual trickles of water containing petroleum drops. Fine sprays emerge from the tips of the trickles. The sprays emission process occurs cyclically, with each new group of droplets emerging at an increasingly greater angle to the horizon. Over time, the droplet diameters increase, and their velocity decreases. Examination of the enlarged images reveals that the droplets forming the "oil mist" contain both oil and water. The inflowing oil spreads across the cavity surface and collects in a splash, from the apex of which a new drop containing both oil and water is ejected. The bridge connecting the droplet to the remainder of the splash contains small oil droplets encased in water. The sinking splash and the returning droplet form new cavities of rapidly changing shape. During the intermediate stage of evolution, an oil drop separates from the cavity bottom, gradually coming to a stop, and then resurfaces. The boundary of the oil film spreading over the fluid surface is broken by thin fractures into separate sectors. The positions of the fracture lines are determined by depressions at the boundary of the oil-water spreading region on the surface of the crown. The changes in the dimensions of the cavity and crown are traced during the initial stage of the flow pattern evolution.

Keywords: droplet, splash, spreading, immiscible fluids, petroleum, cavern, intermediate layer.



Evolution of petroleum drop impact (side view)

Evolution of petroleum drop impact (top view)

УДК 532.5

# Эволюция картины растекания свободно падающей капли нефти в воде в импактном режиме течения

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*

yulidch@gmail.com, ilynykh@ipmnet.ru

## Аннотация

Методами высокоскоростной видеорегистрации детально прослежен начальный этап эволюции картины течения при растекании свободно падающей капли нефти в кювете с водопроводной водой. Опыты выполнены в импактном режиме, когда кинетическая энергия капли (КЭК) превосходит ее потенциальную поверхностную энергию (ППЭ). На начальном этапе слияния капля, деформирующая свободную поверхность, образует в области контакта сред энергетически нагруженный слой, включающий обе контактирующие жидкости. Граница области контакта сред распадается на отдельные струйки воды с капельками нефти. С вершин струек вылетают мелкие брызги. Процесс вылета брызг идет циклически, каждая новая группа вылетает под все большим углом к горизонту. Со временем диаметры капелек растут, скорости их движения уменьшаются. Рассмотрение увеличенных изображений показывает, что капельки, формирующие «нефтяной туман», содержат и нефть, и воду. Втекающая нефть распределяется по поверхности каверны и собирается во всплеске, с вершины которого выбрасывается новая капля, содержащая и нефть, и воду. Перемычка, связывающая каплю с остатком всплеска, включает мелкие капельки нефти в водяной струйке. Погружающийся всплеск и возвращающаяся капля образуют новые каверны быстро меняющейся формы. На промежуточной стадии эволюции от дна каверны отделяется нефтяная капля, которая постепенно останавливается и всплывает. Граница растекающейся по поверхности жидкости нефтяной пленки разрывается тонкими трещинами на отдельные сектора. Положение линий разрыва определяют впадины на границе области растекания нефти с водой на поверхности венца. Прослежено изменение размеров каверны и венца на начальном этапе эволюции картины течения.

Ключевые слова: капля, всплеск, растекание, несмешивающиеся жидкости, нефть, каверна, промежуточный слой.

## 1. Введение

Взаимодействие капель природной нефти с водой – одной из наиболее извлекаемых жидкостей с самой распространенной жидкостью на Земле, происходит в широком диапазоне масштабов – от тысяч километров (при авариях на скважинах при морской добыче, транспортировке судами или перекачке трубопроводами [1]) до миллиметров (при падении единичных мелких капелек в водную среду при заправке или работе машин и инструментов). Изучение закономерностей растекания нефти, топлив и масел на ее основе при крупных, мелких и даже капельных разливах, необходимое для оценки размеров областей возможного распространения, снижения экологической опасности и других негативных последствий в силу высокой мобильности и химической активности составляющих веществ, для развития механики жидкостей и разработки новых технологий, началось еще в конце XIX века [2]. Нефть некоторых сортов легко растекается и покрывает тонкой пленкой большие площади. При

этом возникает опасность попадания ее паров и мелких капель в воздушную среду и образование пожароопасного «нефтяного тумана», в частности, капелек, образующихся при падении капель воды на нефтяную пленку [3]. Капли нефти высокой плотности образуют компактные бляшки на поверхности воды. Оценки влияния добычи нефти, методов гидроразрыва пласта, применяемых химических веществ, состава пластовой воды на качество поверхностных вод приводятся в обзоре [4].

Большое внимание уделяется изучению растворения и перераспределения воды, падающей как в толстый слой дизельного топлива [5] и другие несмешивающиеся жидкости, в частности, силиконовые масла [6], так и на тонкую пленку [7]. Зависимость картины течения, образующегося при падении капли масла различного размера от толщины слоя масла на поверхности воды, изучена в [8]. Глубина каверны зависит от толщины слоя. В жидкости с толстым слоем масла растекание происходит так же, как и в однородной среде. Отмеченные закономерности отражают влияние динамики второй контактной поверхности, зависящей от глубины слоя масла на воде, на общую картину течения. Также построена зависимость высоты всплеска от эффективного числа Вебера. Зависимость структуры картины течения, глубины и диаметра каверны от вязкости силиконового масла, капли которого падали в воду, прослежена в широком диапазоне значений коэффициента кинематической вязкости (1, 10, 100, 1000 сСт) для двух значений числа Вебера – 50, 100 [9].

Образование мелких капелек – брызг, вылетающих с вершин шипов на кромке венца при слиянии капли воды с маслом, и более крупных капель с вершины центрального всплеска, изучено в [10]. Мелкие брызги вылетают циклически вследствие нестационарности скорости продвижения границы пятна контакта сред, ранее замеченной при анализе картины слияния капли воды с тонким слоем раствора поваренной соли в воде [11]. Распад капли на отдельные волокна на границе пятна контакта при сливании смешивающихся жидкостей визуализирован в [12].

Исследования взаимодействия капель воды, несмешивающихся с принимающей жидкостью, проводятся и при комнатных [9], и при высоких температурах принимающего масла [13, 14]. Вылетающие капельки водо-масляной суспензии формируют легко вспыхивающий «масляный туман», возгорание которого приводит к пожарам и в промышленных, и домашних условиях [15].

Черно-белые фотографии картин течений, образующихся при падении свободно падающей капли воды в тонкий слой масла и результаты измерений размеров основных компонентов течений – каверны, венца, центрального всплеска анализируются в [7], цветные изображения, иллюстрирующие картину растекания капли подкрашенной воды в прозрачном подсолнечном масле, приведены в [16]. Фотографии картин растекания капли нефти на запыленной поверхности воды представлены в [17]. Сложная фрагментированная картина распределения вещества составной капли визуализирована в [18]. Силы, действующие на каплю воды в слое нефти в электростатическом поле рассчитаны и экспериментально определены в [19].

Влияние растворимости жидкости капли в принимающей среде существенно влияет на геометрию границы области растекания капли. 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 в воде сохраняет сплошность продолжительное время [20]. Цель данной работы – визуализация картины течения в кювете, формируемого свободно падающей каплей природной нефти в покоящейся несмешивающейся жидкости – водопроводной воде.

## 2. Параметризация

В качестве научной основы методики проведения опытов выбрана система фундаментальных уравнений (СФУ) движения диссипативных гетерогенных жидкостей, впервые приведенная в первом издании 1944 г. трактата [21], позднее многократно воспроизведенная в

учебниках и монографиях. В наиболее полной постановке СФУ замыкается уравнениями состояния для потенциала Гиббса – основного параметра среды и его производной – плотности [22, 23].

В силу анизотропии строения электронных оболочек атомы и молекулы в жидкостях и газах легко объединяются в метастабильные ассоциаты – комплексы, клатраты, кластраты, бонды, войды физической и химической природы [24–27]. Размеры ассоциатов лежат в широких пределах – от нескольких атомарных до микронных, длительность существования – от наносекунд до десятков минут. Оптическим образом пространственной структуры изменчивого распределения термодинамического потенциала в жидкостях и газах является фотосфера Солнца, всегда покрытая отдельными ячейками, «точками» и волокнами с периодом существования около 10 мин [28]. При уничтожении свободной поверхности сливающихся жидкостей и границ ассоциатов ППЭ преобразуется в другие формы – возмущения температуры, давления, концентрации. При этом часть конвертируемой ППЭ – доступная потенциальная поверхностная энергия (ДППЭ) – переходит в кинетическую энергию ускоренно движущихся тонких струек и прослоек [29]. В свою очередь формирование новых контактных поверхностей сопровождается локальным поглощением части полной энергии, переходящей в ППЭ, появлением тонких замедленных струек и прослоек. Математическим образом тонких компонентов течений являются лигаменты – сингулярные компоненты полных решений системы фундаментальных уравнений механики жидкостей [30].

Включение в систему уравнений движения термодинамических потенциалов позволяет анализировать действие различных механизмов переноса энергии: радиационного с тепловым излучением, макроскопических – с потоком, волнами и вихрями, а также микроскопических – диссипативного и конверсионного [29].

Рассмотрение уравнений, начальных 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  $G_t$  [29]. 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  $\sigma_d^a, \sigma_t^a$  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  $S_\sigma$ , 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 капли (КЭК)  $En_k = MU^2/2$  и потенциальная поверхностная энергия (ППЭ)  $En_\sigma = \sigma_d^a S_\sigma$ , которую формируют анизотропные атомно-молекулярные взаимодействия в окрестности поверхности капли. ППЭ сосредоточена в тонком приповерхностном слое толщиной порядка размера молекулярного кластера  $\delta_\sigma \sim 10^{-6}$  см и характеризуется высокой плотностью  $W_d^\sigma = En_\sigma / V_\sigma$ , в отличие от КЭК, которая рассредоточена по всему объему капли с плотностью  $W_d^k = En_k / V_d$ . Величина отношения компонентов энергии капли  $R_{En} = En_d^k / En_d^\sigma$  может быть и большой, и малой, однако отношение плотностей компонентов энергии  $R_W = W_d^k / W_d^\sigma \sim \delta_\sigma / D$  всегда малая величина в условиях экспериментов.

Из анализа системы уравнений и физически обоснованных граничных условий следует, что основная группа собственных линейных масштабов задачи, которая зависит только от свойств среды, объединяет капиллярно-гравитационное отношение  $\delta_g^z = \sqrt{\gamma/g}$ , которое входит в дисперсионное соотношение для коротких волн [21], и диссипативно-капиллярный

масштаб  $\delta_\gamma^v = v^2/\gamma$ . Группа кинематических линейных масштабов, зависящих от скорости капли  $U$ , включает вязкий  $\delta_U^v = \nu/U$ , капиллярный  $\delta_U^\gamma = \gamma/U^2$  и диффузионный  $\delta_U^{kS} = \kappa_S/U$  масштабы длины.

Соответственно, одна группа масштабов времени включает только параметры среды –  $\tau_\gamma^v = v^3/\gamma^2$ ,  $\tau_g^\gamma = \sqrt[4]{\gamma/g^3}$ , другая содержит размер капли –  $\tau_\gamma^D = \sqrt{D^3/\gamma}$ ,  $\tau_\gamma^{vD} = \nu D/\gamma$ , третья зависит от контактной скорости  $\tau_g^U = U/g$ , диаметра капли  $\tau_U^D = D/U$  и толщины оболочки, в которой сосредоточена ППЭ  $\tau_U^\sigma = \delta_\sigma/U$ . Длительности передачи вещества, кинетической  $\tau_U^D = D/U$  и ППЭ капли  $\tau_U^\sigma = \delta_\sigma/U$ , которые определяются диаметром  $D$  и толщиной оболочки  $\delta_\sigma$  капли, заметно отличаются.

Процесс конверсии ППЭ в другие формы при уничтожении свободной поверхности сливающихся жидкостей проходит достаточно быстро за время порядка  $\tau_U^\sigma \sim \delta_\sigma/U \sim 10^{-8}$  с, для типичных условий экспериментов с каплями  $D \sim 0.5$  см,  $U \sim 1$  м/с. ДППЭ трансформируется в кинетическую энергию тонких струек, которые деформируют кольцевую контактную границу области слияния капли и протыкают дно каверны в импактном режиме [31].

Большое число масштабов одной размерности отражают многообразие и сложность одновременно протекающих процессов, включающих освобождение и накопление ППЭ с масштабами порядка супрамолекулярных размеров  $\delta_\sigma \sim 10^{-6}$  см, и общее течение с масштабом порядка нескольких диаметров капли  $D$ . Собственные масштабы регулярных компонентов определяют требования к выбору размеров области и длительности наблюдений. Масштабы лигаментов задают пространственно-временное разрешение инструментов необходимое для фиксации быстро эволюционирующей тонкой структуры течений. Свойства сопутствующих волновых процессов – и поверхностных капиллярных, и акустических волн в данной работе не рассматриваются.

Отношения масштабов одинаковой размерности определяют числа, входящие в семейства традиционных безразмерных параметров: Рейнольдса  $Re = D/\delta_U^v = UD/\nu$ , Фруда  $Fr = En_k/En_p = U^2/gD$ , Бонда  $Bo = D^2/(\delta_g^\gamma)^2 = gD^2/\gamma$ , Онезорге  $Oh = \sqrt{\delta_\gamma^v/D} = \nu/\sqrt{\gamma D}$ , Вебера  $We = D/\delta_U^\gamma = DU^2/\gamma$ . При учете эффектов диффузии пигмента капли в принимающей жидкости используется число Шмидта  $Sc = \nu/\kappa_S$  ( $\kappa_S$  – коэффициент диффузии,  $\delta_U^{kS} = \kappa_S/U$  – диффузионный масштаб длины).

Дополнительные безразмерные параметры процесса слияния капли включают отношения компонентов полной энергии капли КЭК к ППЭ  $R_{En} = En_k/En_\sigma$ . При этом отношение плотностей кинетической и ППЭ капли остается малыми, пропорциональными отношению толщины приповерхностного молекулярного кластера  $\delta_\sigma \sim 10^{-6}$  см к диаметру капли  $R_W = W_d^k/W_d^\sigma \sim \delta_\sigma/D \ll 1$ .

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

$R_\sigma = \frac{\sigma_t - \sigma_d}{\sigma_t + \sigma_d}$  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.

### 3. Методика эксперимента

Опыты выполнены на Стенде регистрации тонкоструктурных быстропротекающих процессов (ТБП УИУ «ГФК ИПМех РАН), состоящем из рабочего бассейна с принимающей жидкостью, дозатора капель, устройства регистрации прохождения капли, регистрирующей фото- или видеоаппаратуры, осветителей, системы управления экспериментом, который входит в комплекс уникальных установок УИУ "ГФК ИПМех РАН" [32]. В воду падала капля минеральной нефти, параметры которой – плотность и коэффициент поверхностного натяжения были определены с помощью тензиометра (плотность  $\rho = 0.87 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ , коэффициент поверхностного натяжения  $\sigma = 30 \text{ г} \cdot \text{с}^{-2}$ , вязкость  $\mu = 0.07 \text{ г} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ ).

Принимающая жидкость – водопроводная вода заполняла прозрачные квадратные кюветы ( $30 \times 30 \times 5 \text{ см}^3$ ,  $10 \times 10 \times 7 \text{ см}^3$ ,  $12 \times 12 \times 1.5 \text{ см}^3$ ). Анализ полученных фото- и видеоматериалов показал, что картина течения с высокой степенью подробностей воспроизводится в различных бассейнах, глубина и площадь сечения которых много больше размеров капли и каверны, образующейся в принимающей жидкости. В процессе движения капля пересекала луч устройства регистрации и с регулируемой задержкой запускала видеокамеру или фотоаппарат. Для масштабирования изображения перед каждым опытом проводилась регистрация изображения сетки или маркера.

Рабочий объем освещался светодиодными источниками Optronis MultiLED, расположение которых определялось требованием максимальной контрастности оптического изображения. Регистрация картины течения проводилась видеокамерой Optronis CR 300x2 (частота съемки 4000 кадров/с, выдержка 1/8000 с). Более подробно методика опытов описана в [31].

### 4. Основные результаты

Выборка отдельных кадров из видеофильма, иллюстрирующего эволюцию картины распределения капли нефти начальным диаметром  $D = 3.1 \text{ мм}$ , которая подлетает к поверхности воды в кювете со скоростью  $U = 2.53 \text{ м/с}$  (измеряется перемещение нижней кромки) в боковой проекции приведена на рис. 1. Условия опыта, в котором кинетическая энергия капли  $En_k$  заметно превосходит ее ППЭ  $En_\sigma$  (отношение  $R_{En} = 48 \gg 1$ ) могут быть отнесены к импактному режиму, в котором при слиянии смешивающихся жидкостей наблюдается деформация свободной поверхности, распад объединения приповерхностных слоев соприкасающихся жидкостей в пятне контакта на отдельные замедленные и ускоренные струйки, с вершин которых вылетают отдельные капельки. В данных опытах на первом кадре (рис. 1,  $t = 0.5 \text{ мс}$ ) выделяется растущая плотно окрашенная каверна диаметром  $d_c = 4.21 \text{ мм}$  и глубиной  $h_c = 0.58 \text{ мм}$  с выпуклым дном (при слиянии смешивающихся жидкостей, например, раствора перманганата калия с водой, на ранней стадии дно каверны более плоское [31]), над которой располагается остаток капли диаметром  $d_d = 2.21 \text{ мм}$ . Мелкие капельки вылетают настильно, их треки на данном кадре не различимы.

Все базовые компоненты – каверна классической цилиндрической формы со сферическим дном, растущей венец с развернутым внешним краем, с вершин шипов на зубцах шеврона которого вылетают капельки представлена на рис. 1, при  $t = 1.5 \text{ мс}$ . В увеличенном изображении можно видеть группы штрихов – размазанных изображений небольших объемов жидкости, вылетающих с вершины шипа – окончания тонкой струйки, содержащей обе жидкости – и воду, и нефть. Штрихи располагаются под различными углами к горизонту (по мере приближения к центру течения углы наклона штрихов к горизонту, отражающих положение излучающего шипа на кромке зубца каверны) увеличиваются и составляют справа  $\theta_r = 23^\circ \div 42^\circ$  и слева  $\theta_l = 26^\circ \div 42^\circ$ . Штрихи, в начале имеющие вытянутую форму, постепенно стягиваются в сферическую капельку. Их поперечный размер близок к диаметру летящей капли. Длина штриха определяется формой отрывающегося окончания шипа, а также изменением его положения за время выдержки, которое составляет 1/5000 с.

При большом увеличении можно видеть, что вылетающий объем состоит из воды, в которой располагается маленькие капельки нефти (увеличенное изображение брызг – вылетающих объемов, справа и слева представлено на врезке под рис. 1). Дискретное азимутальное расположение штрихов свидетельствует, что только небольшое число первоначальных струек развивается, утолщается и может выбросить жидкий объем. Периодичность расположения штрихов в радиальном направлении указывает на неравномерность движения границы области контакта сливающихся жидкостей и цикличность процесса их формирования, как и в случае растекания капли смешивающейся жидкости [31]). Эволюция пространственного распределения брызг более детально прослеживается на приводимом ниже рис. 1.

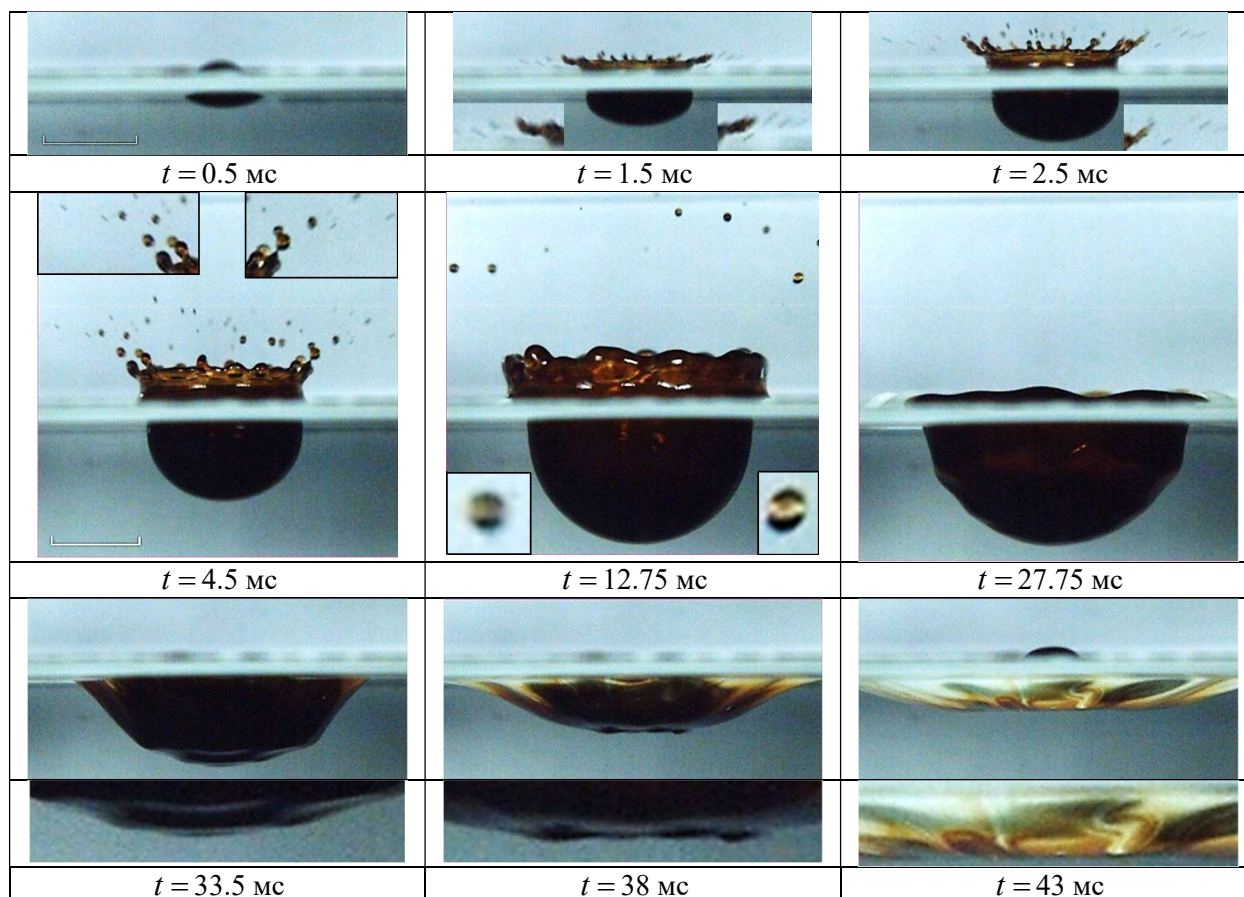


Рис. 1. Начальный этап эволюции картины течения, образованного каплей нефти, упавшей в кювету с водопроводной водой ( $D = 3.1$  мм,  $U = 2.53$  м/с,  $Re_d = 975$ ,  $Fr_d = 211$ ,  $We_d = 575$ ,  $Bo = 2.73$ ,  $Oh_d = 0.0246$ ,  $R_\rho = 0.007$ ,  $R_\sigma = 0.42$ ,  $R_{En} = 48$ ,  $R_W = 0.0023$ )

По мере эволюции течения растет каверна (диаметр  $d_c = 7.2$  мм, глубина  $h_c = 2.68$  мм при  $t = 2.5$  мс), в форме которой выражены боковой цилиндрический и нижний сферический участок радиусом кривизны  $R_c = 4.84$  мм, а также венец диаметром  $d_{cr} = 7.38$  мм и высотой  $h_{cr} = 1.44$  мм, на верхней кромке которого располагаются более толстые шипы, оканчивающиеся сфероидальными отрывающимися объемами воды, в которых располагаются капельки нефти. Следы мелких капелек нефти здесь можно разглядеть и в ранее вылетевших брызгах справа и слева от каверны. Угол наклона шипов к горизонту со временем плавно увеличивается. Пелена на вершине венца стягивается в утолщенную кромку, под которой начинают формироваться капиллярные волны.

Темп углубления каверны и возвышения венца начинает плавно спадать, и при  $t = 4.5$  мс их размеры составляют  $h_c = 4.04$  и  $h_{cr} = 2$  мм. Относительная вытянутость вылетающих капелек постепенно уменьшается, отношение их длины к диаметру составляет 1.32.

В изображении брызг четко выделяются более и менее плотно окрашенные участки, указывающие на существование мелких капелек нефти в вылетающей жидкости.

Размеры каверны (диаметр и глубина) достигают максимального значения  $d_c = 12.35$  и  $h_c = 6.55$  мм при  $t = 12.75$  мс, верхняя кромка венца сглаживается. Образование брызг прекратилось, группа брызг диаметром  $0.5 < d_{sp} < 0.6$  мм, имеющих форму, близкую к сферической, располагаются на расстояниях  $4.2 < \Delta r_{sp} < 4.4$  мм от верхней кромки венца. В изображении брызг выделены темные части и прозрачная сердцевина. В увеличенном изображении летящей капельки на вставке к рис. при  $t = 12.75$  мс выделены два окрашенных участка на полюсах и мелкая капелька в центре.

Капиллярные волны, сбегающие вниз от постепенно сглаживающейся верхней кромки венца, деформируют контур начинающей стягиваться каверны. В изображении выделяются два гребня и три впадины, размеры которых позволяют определить длины капиллярных волн  $\lambda_c = 2.76, 2.37, 1.8$  мм, уменьшающиеся к дну каверны. На краях венца справа и слева при  $t = 27.75$  мс четко выражено водяное кольцо, охватывающее контур с нефтяной пленкой.

Стягивающаяся к свободной поверхности каверна принимает коническую форму диаметром  $d_c = 16$  мм и высотой  $h_c = 5.15$  мм в верхней части при  $t = 33.5$  мс. Форма нижней части каверны высотой  $\Delta h_c = 0.92$  мм искажена трехмерными короткими капиллярными волнами длиной  $\lambda_c = 1.12, 2.1$  мм. В контуре каверны появляются просветленные участки, указывающие на неравномерность распределения нефти по поверхности жидкости.

Каверна постепенно трансформируется в депрессию с внешней конической частью и уплощенным дном, форма которого иллюстрируется увеличенным изображением на вставке снизу. На периферии верхней части каверны прослеживаются обширные области с утонченной нефтяной пленкой. На дне каверны нефть собирается в кольцо с утолщениями, отделенная от каверны просветленным слоем. В центре течения при  $t = 38$  мс прослеживается оголовок растущего всплеска, отделенный участком тонкой круговой линии радиусом с центром над поверхностью жидкости. В картине неоднородного распределения нефти по стенкам каверны выражены заостренные радиальные элементы.

Поверхностные течения постепенно стягивают нефтяную пленку в растущий всплеск, вершина которого появляется над поверхностью жидкости при  $t = 43$  мс. Толщина нефтяной пленки в конической депрессии с плоским дном диаметром  $d_{cd} = 22.8$  мм и глубиной  $h_{cd} = 1.6$  мм неравномерно меняется, более того, в ней появляются отдельные практически прозрачные изогнутые трещины. Дно конической депрессии становится плоским.

Эволюцию картины распределения брызг, вылетающих с окончаний шипов на вершине каверны, иллюстрируют первые кадры на рис. 1 и более подробно – выборка кадров, приведенная на рис. 2.

Первые штрихи начинают регистрироваться при  $t = 1$  мс (рис. 2). Слева от каверны угол их наклона к горизонту составляет  $\theta_l = 20^\circ$ , справа –  $\theta_r = 31^\circ$ . Длина вытянутых штрихов составляет  $l_{sp} = 0.42$  мм, диаметр  $d_{sp} = 0.09$  мм. Величина отношения  $l/d = 4.7$  показывает, что первоначально отделяется именно вершина шипа, которая со временем стягивается в сферическую капельку, как и при трансформации отделившейся перемычки при отрыве капли от маточной жидкости [34].

Для получения более контрастного изображения мелких капель при подготовке иллюстраций для рис. 2 была проведена инверсия цветов в изображении и повышена контрастность.

В картине течения на рис. 2 при  $t = 1.25$  мс слева и справа от венца располагаются по 4 штриха длиной  $0.34 < l_{sp} < 0.72$  мм. Сравнение расположения штрихов при  $t = 1.0$  и  $1.25$  мс позволило определить величину смещения штрихов на  $\Delta l = 0.59$  и  $0.65$  мм слева и справа, а также и скорости их перемещения, которые составляют  $u_{sp} = 2.36$  и  $2.6$  м/с, соответственно. Здесь скорости перемещения штрихов согласуются с контактной скоростью капли  $U = 2.53$  м/с (при слиянии капли воды с водой скорости первичных брызг достигают  $u_{sp} = 20$  м/с, за

время  $\Delta t = 0.5$  мс после контакта скорость капелек снижается до  $u_{sp} \sim 2.4 \dots 3.4$  м/с). Расстояние между последовательно вылетающими штрихами  $\Delta l_{sp} \sim 0.6$  мм, что при скорости эжекции жидкости с вершин шипов  $u_{sp} = 2.36$  и  $2.6$  м/с соответствует время  $\Delta t_{sp} = 0.25$  мс, что дает оценку частоты осцилляций линии контакта сливающихся жидкостей, которая определяет время задержки вылета капелек, в  $f_{cl} = 25$  кГц.

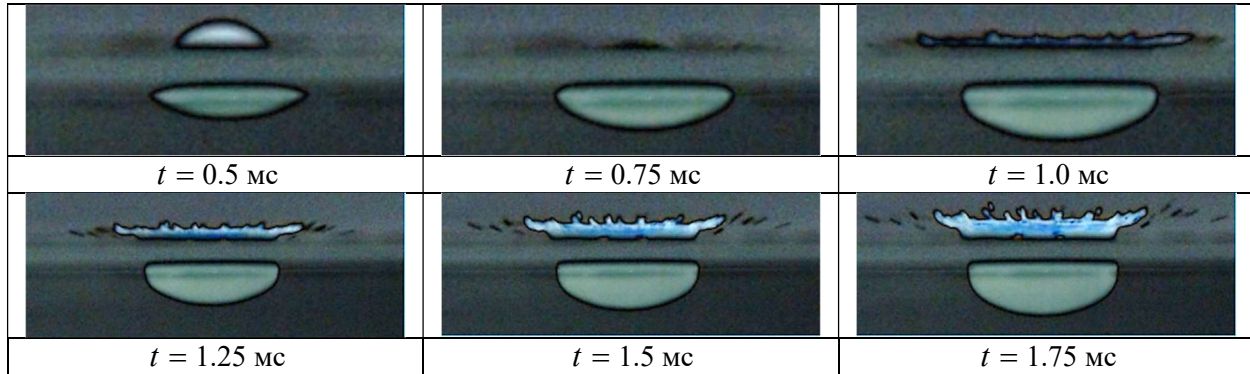


Рис. 2. Начальная фаза эволюции брызг, вылетающих с вершин шипов венца при погружении капли нефти в воду в импактном режиме

Углы наклона штрихов в левой части рисунка при  $t = 1.25$  мс последовательно увеличиваются  $\theta_l = 19^\circ, 22^\circ, 30^\circ$  и  $30^\circ$ , а их длины последовательно сокращаются  $l_{sp} = 0.75, 0.53, 0.48$  и  $0.3$  мм. Справа оторвавшиеся вершины шипов, образующие штрихи, располагаются под углами (отсчет против часовой стрелки)  $\theta_r = 16^\circ, 27^\circ, 27^\circ$  и  $37^\circ$ , а их длины практически не меняются  $l_{sp} = 0.68, 0.63, 0.65$  и  $0.62$  мм. Азимутальная анизотропия длин и углов наклона штрихов объясняется отличием формы осциллирующей капли от сферической и положением ее продольной оси, которая не совпадает с вертикалью.

За время между приводимыми кадрами  $\Delta t = 0.25$  мс штрихи слева сместились на  $\Delta l_l = 0.89, 0.6, 0.57, 0.55$  мм скорости их движения  $u_{sp} = 3.57, 2.42, 2.29, 2.2$  м/с, угловые положения последовательно увеличились и составляют  $\theta_l = 22^\circ, 22^\circ, 32^\circ, 25^\circ$ . Смещение штрихов справа от венца составляет  $\Delta l_r = 0.97, 0.81, 0.71, 0.6, 0.3$  мм, которым соответствуют скорости  $u_{sp} = 3.87, 3.25, 2.84, 2.4, 1.2$  м/с. Углы наклона штрихов к горизонту также выросли и составляют  $\theta_r = 21^\circ, 29^\circ, 32^\circ, 39^\circ$ .

За следующие  $\Delta t = 0.25$  мс к моменту  $t = 1.75$  мс штрихи слева сместились на  $\Delta l_l = 0.82, 0.8, 0.59, 0.5$  мм (скорости  $u_{sp} = 3.27, 3.22, 2.4, 2$  м/с), углы их наклона к горизонту последовательно увеличились  $\theta_l = 21^\circ, 25^\circ, 40^\circ, 23^\circ$ . Справа штрихи сместились на  $\Delta l_r = 0.94, 0.85, 0.79, 0.65, 0.61$  мм (скорости  $u_{sp} = 3.76, 3.4, 3.18, 2.6, 2.46$  м/с), их угловые положения составляют  $\theta_r = 22^\circ, 28^\circ, 33^\circ, 37^\circ$ . У задней кромки венца отрываются две капельки диаметром  $d_{sp} = 0.29$  и  $0.33$  мм, горизонтальные компоненты проекции скорости их вылета составляют  $u_{sp} = 1.8$  и  $2$  м/с, соответственно.

Дальнейшую эволюцию картины течения иллюстрирует серия выборок из видеофильма, начальные кадры которого показаны на рис. 1, представленная на рис. 3. Верхняя часть сплошного всплеска, достигшего высоты  $h_{sp} = 11.6$  мм при  $t = 62.75$  мс продолжает свое движение вверх и отделяется от цилиндрического тела, переходящего в конический пьедестал. Отрывающаяся капля остается связанной со стекающим в жидкость всплеском тонкой водяной струйкой – перемычкой, в которой располагаются отдельные мелкие капельки нефти различного размера и их группы при  $t = 104$  мс, как можно видеть на увеличенных изображениях перемычки, приведенной на вставках.

Форма спадающего всплеска резко изменяется – его верхняя часть, контактирующая с перемычкой, обостряется, а нижняя, примыкающая к погружающемуся пьедесталу – утончается. Максимальный диаметр всплеска на высоте  $h_s^m = 5$  мм составляет  $d_{sp} = 2.37$  мм. Такое

изменение формы свидетельствует о сильном влиянии капиллярных эффектов, сохраняющих тонкую струйку, связывающую отрывающуюся каплю и всплеск. Они вызывают быстрое движение части свободной поверхности, которую продавливают погружающийся пьедестал. Его внешняя часть формирует кольцевую впадину, окружающую центральную часть всплеска. Дно впадины, боковую проекцию которого можно видеть в форме тонкой темной линии в центре депрессии, погружается быстрее основания всплеска в ее центре, и приводит к истончению основания всплеска. Аналогичная эволюция картины течения наблюдается и при погружении всплеска при слиянии капли разбавленных чернил с водой [33].

После разрыва перемычки вершина всплеска быстро стекает и образует сферический оголовок диаметром  $d_{sp} = 3.06$  мм на цилиндрическом теле диаметром  $d_{sp}^b = 2.2$  мм ( $t = 114$  мс) и высотой  $h_{sp} = 2.2$  мм. Оторвавшаяся от всплеска капля диаметром  $d_2 = 4.18$  мм начинает падать, ее нижняя кромка опустилась на расстояние  $\Delta h_{d_2} = 1.8$  мм за  $\Delta t = 30$  мс. Под всплеском виден оголовок второй каверны, формируемой погружающимся цилиндрическим телом всплеска.

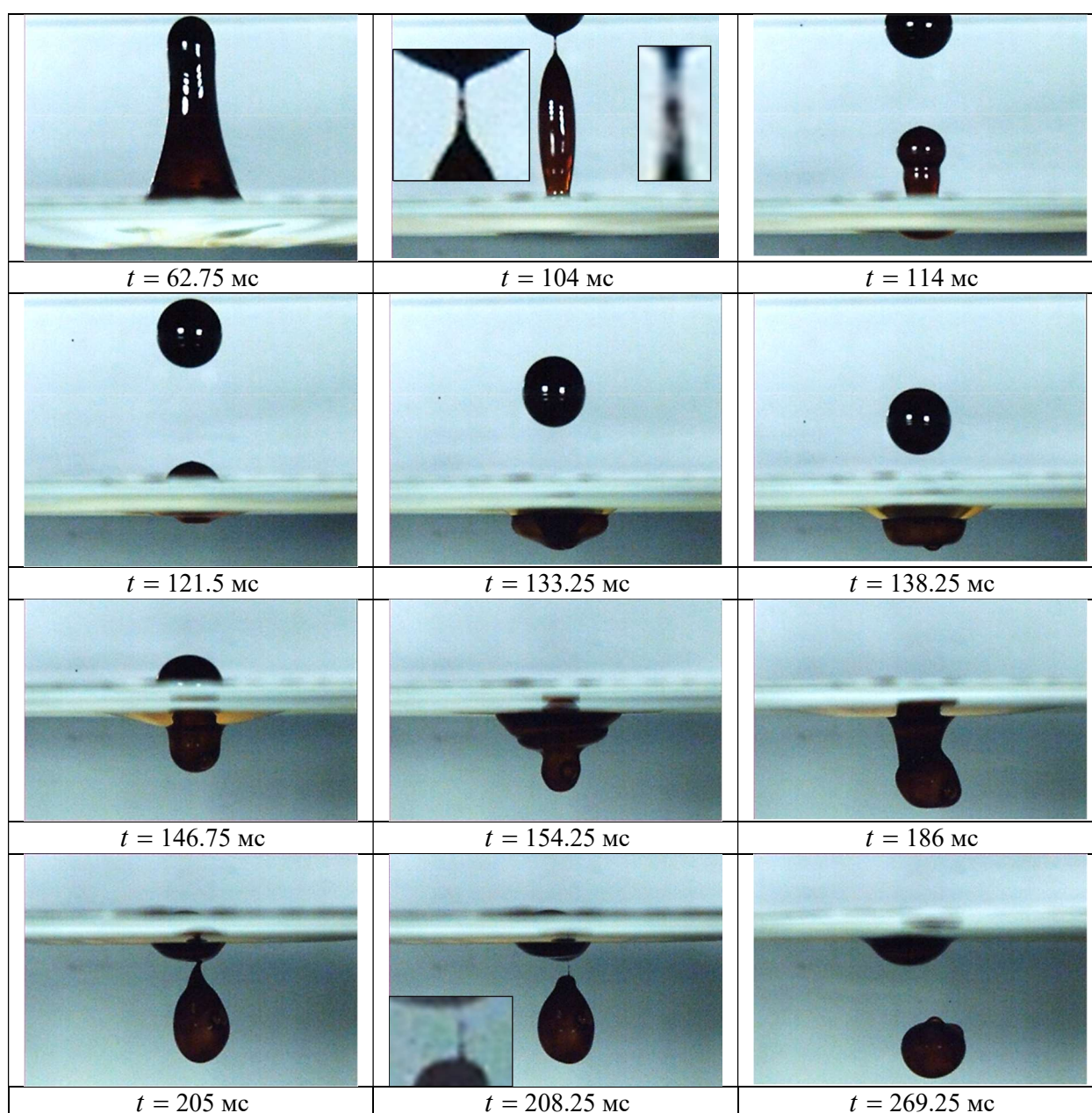


Рис. 3. Эволюция картины течения, образованного каплей нефти, упавшей в кювету с водопроводной водой (продолжение серии, представленной на рис. 1)

Падающая капля вытягивается по вертикали, при  $t = 121.5$  мс ее вертикальный  $d_2^{\parallel}$  и горизонтальный  $d_2^{\perp}$  размеры равны  $d_2^{\parallel} = 4.3$  мм и  $d_2^{\perp} = 4$  мм, соответственно. При погружении сферической вершины всплеска ширина второй каверны резко увеличивается  $d_2^c = 6.32$  мм, глубина увеличивается незначительно  $h_2^c = 0.68$  мм. Одновременно увеличивается толщина и диаметр  $d_p$  пятна нефти на свободной поверхности.

Темп роста размеров второй каверны резко возрастает при прождении вершины всплеска через свободную поверхность и при  $t = 133.25$  мс,  $d_2^c = 6$  мм,  $h_2^c = 2.57$  мм. Углубление в центре каверны – сохраняющийся след более узкой каверны, сформировавшейся при погружении цилиндрического тела всплеска. Просветленные треугольники около свободной поверхности – след формирующейся новой конической депрессии. Размеры все еще вытянутой по вертикали падающей капли равны  $d_2^{\parallel} = 4.4$  мм и  $d_2^{\perp} = 3.88$  мм.

Форма каверны постепенно усложняется. Высота быстро втягивающегося выступа на дне каверны равная  $h_2^{cb} = 0.52$  мм на предыдущем кадре уменьшается до  $h_2^{cb} = 0.28$  мм при  $t = 138.25$  мс. Сверху к остатку второй каверны высотой  $h_2^c = 1.54$  мм примыкает коническое заглубление с диаметром основания  $d_2^{cu} = 5.23$  мм и высотой  $h_2^{cu} = 0.97$  мм, окруженное растущей депрессией с тонким слоем нефти на поверхности, создающим просветленное изображение на периферии каверны. Падающая капля постепенно скругляется, ее размеры здесь равны  $d_2^{\parallel} = 4.17$  мм и  $d_2^{\perp} = 4$  мм.

Погружающаяся капля образует новую интрузию цилиндрической формы диаметром  $d_2^{ii} = 2.71$  мм и проталкивает ранее сформировавшийся объем с большим диаметром  $d_2^i = 3.21$  мм и высотой  $h_2^i = 2.77$  мм, форма которого заметно упрощается, в толщу принимающей жидкости при  $t = 146.75$  мс. Над поверхностью воды остается часть вторичной капли диаметром  $d_2^{\perp} = 4.09$  мм. Диаметр верхней части конической депрессии равен  $d_{cd} = 11.3$  мм, а высота  $h_{cd} = 0.98$  мм.

Вливающаяся капля резко меняет геометрию нефтяной интрузии, верхняя часть которой принимает коническую форму диаметром  $d_2^{ii} = 7.73$  мм и высотой  $h_2^i = 2.28$  мм. К интрузии снизу примыкает сфероидальный объем диаметром  $d_2^s = 2.45$  мм и высотой  $h_2^s = 2.1$  мм, отделенный формирующейся перетяжкой от основного тела вторжения при  $t = 154.25$  мс.

Эффекты плавучести и остаточные течения резко меняют общую геометрию нефтяной интрузии, в которой при  $t = 186$  мс можно выделить верхнюю коническую часть высотой  $h_2^i = 3$  мм и диаметром основания  $d_2^{ii} = 4.2$  мм и нижнюю скругленную диаметром  $d_2^s = 3.9$  мм.

Постепенно под действием плавучести верхняя часть интрузии подтягивается к свободной поверхности, а нижняя диаметром  $d_2^s = 3.5$  мм и общей высотой сложной формы  $h_2^s = 6.2$  мм под действием остаточных течений и сохраняющегося импульса продолжает погружаться. Ее коническая вершина остается связанной тонкой струйкой с верхней частью, дно которой принимает сглаженную асимметричную форму при  $t = 205$  мс.

Вершина всплывающей верхней части интрузии выступает над свободной поверхностью при  $t = 208.25$  мс, а нижняя диаметром  $d_2^s = 3.5$  мм и высотой  $h_2^s = 5.46$  мм продолжает скругляться. Обе части разделенной интрузии остаются связанными тонкой водо-нефтяной струйкой – перемычкой длиной  $l_b = 0.58$  мм и диаметром  $d_b = 0.09$  мм, в которой при большом увеличении можно увидеть отдельные капельки нефти.

После разрыва перемычки контуры и верхней, и оторвавшейся нижней части интрузии диаметром  $d_2^s = 4$  мм и высотой  $h_2^s = 3.85$  мм сглаживаются. При этом вершина отделившейся части диаметром  $d_2^s = 4.8$  мм остается более плоской, на ней сохраняется остаток конического выступа, контактирующего с перемычкой. Она некоторое время продолжает погружаться, останавливается и начинает медленно всплывать под действием плавучести.

Общую структуру течения иллюстрирует выборка из видеофильма эволюции свободной поверхности, линия визирования расположена под углом  $\vartheta = 80^\circ$  к горизонту (рис. 4). Центр картины течения при  $t = 0.25$  мс занимает сливающаяся капля диаметром  $D = 3.4$  мм,

окруженная водо-нефтяной пленкой диаметром  $d_v = 5.7$  мм, в которой выделены тонкие радиальные струйки. Из кромки пленки выступают тонкие струйки, темный цвет которых свидетельствует о присутствии в них нефти. Размытый контур кромки капли свидетельствует о распаде поверхности на тончайшие струйки, высокое число которых образует в пленке внутренний более плотно окрашенный слой толщиной  $\delta_v = 0.25$  мм. В увеличенном изображении пленки, приведенном под видеокадром, можно видеть тонкие неоднородности радиальной направленности, свидетельствующие о сложности процессов распада области контакта жидкостей. Граница области контакта окружена водяной пленкой, покрытой масляным оболочками и пронизана тонкими струйками. На волокна распадается и капля смешивающейся жидкости, например, электролита, сливающаяся с водой в импактном режиме [11, 31].

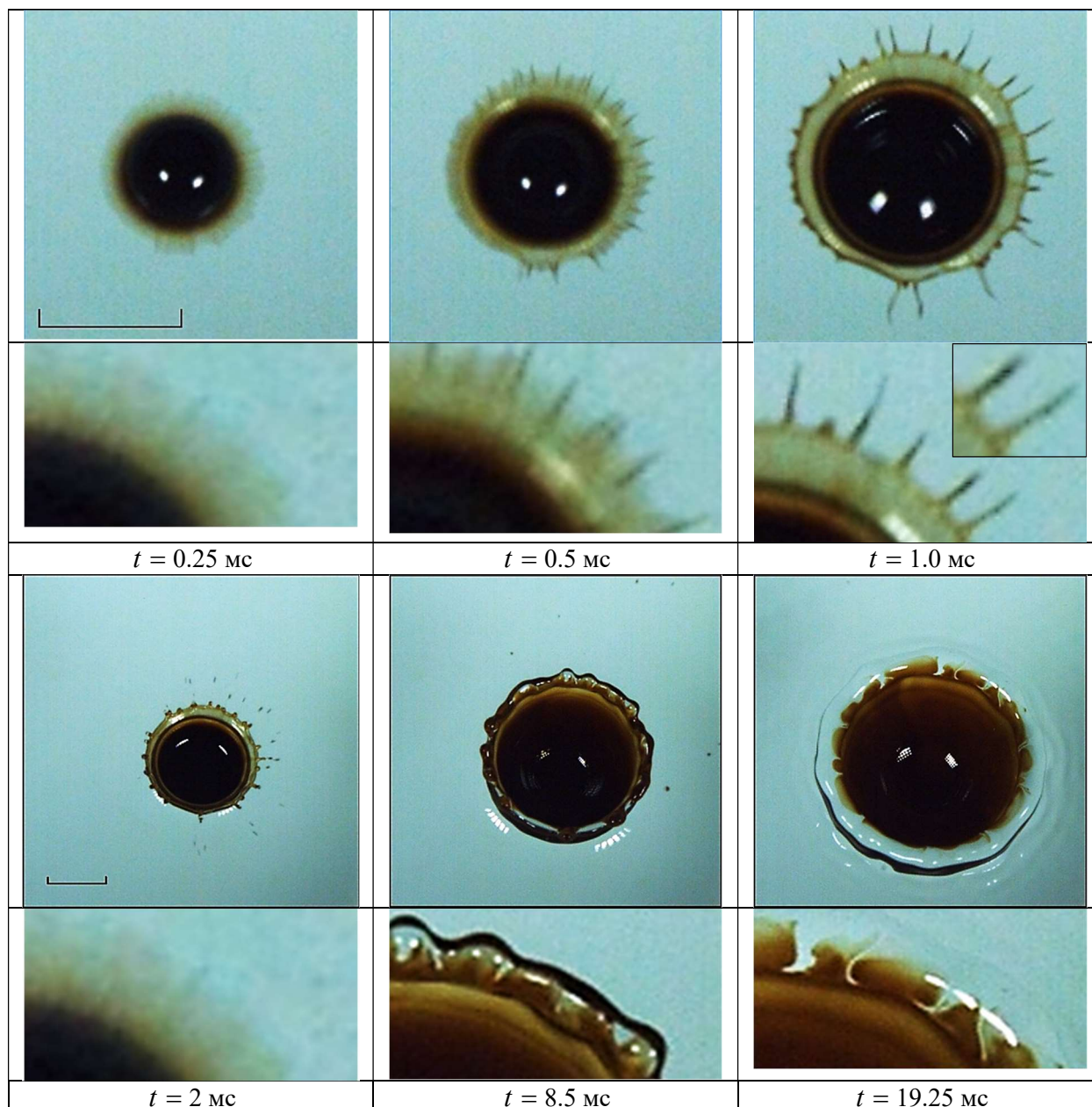


Рис. 4. Эволюция картины течения, образованного каплей нефти, упавшей в кювету с водопроводной водой (импактный режим, вид сверху под углом  $\vartheta = 80^\circ$  к горизонту,  $D = 3.1$  мм,  $U = 2.53$  м/с,  $Re_d = 975$ ,  $Fr_d = 211$ ,  $We_d = 575$ ,  $Bo = 2.73$ ,  $Oh_d = 0.0246$ ,  $R_\rho = 0.007$ ,  $R_\sigma = 0.42$ ,  $R_{En} = 48$ ,  $R_W = 0.0023$ )

Со временем диаметр внешней комки пелены, как и длина шипов, увеличивается, и при  $t = 0.5$  мс он составляет  $d_v = 7.15$  мм. Внутри пелены располагается более светлое кольцо внешним диаметром  $d_{cr} = 6.2$  мм и толщиной  $\delta_{cr} = 0.29$  мм с собственной системой тонких радиальных волокон. Некоторые шипы внешнего кольца не имеют продолжения в системе более тонких шипов внутреннего кольца, что указывает на дискретность и прерывистость процесса движения границы пятна слияния и образования тонких струек. В центре течения в формирующейся каверне располагается остаток сливающейся капли. В увеличенном изображении верхней части кадра, приведенном под ним, во внешних шипах выделяются мелкие капельки нефти.

По мере погружения и растекания капли в растущей области распределения нефти при  $t = 1.0$  мс идентифицируется пелена диаметром  $d_v = 8.34$  мм с редкими шипами длиной до  $\delta_{sp} = 1.24$  мм. Наружная темная кромка пелены, которая начинает стягиваться под действием капиллярности, становится все более плотно окрашенной нефтью. В шипах на увеличенном изображении правого верхнего участка пелены просматриваются отдельные капельки нефти.

Блики очерчивают кромку капли на дне растущей каверны при  $t = 2$  мс на рис. 4. Неравномерность окраски боковой поверхности здесь позволяет различать более темную стенку каверны, коричневатую стенку венца, плотно окрашенную кромку венца, к которой примыкает полупрозрачная пелена. На внешней кромке пелены располагаются отдельные шипы – окончания тонких струек. Прозрачные окончания шипов в левой части кадра показывают, что и на данной стадии струйки содержат обе контактирующие жидкости. Асимметрия освещения позволяет визуализировать капли, располагающиеся на кольцевых линиях только справа от венца. Пространственная согласованность положения капель указывает на синхронность их вылета по крайней мере на соседних шипах, указывающую на неравномерность продвижения контактной линии и скорости течения в ядрах струек.

По мере роста высоты растет и толщина венца, все большую часть которого составляет вода, составляющая заметную часть остатка зубцов при  $t = 8.5$  мс на рис. 4. Отдельные сравнительно крупные капельки включают и нефть, и воду. Во впадинах между зубцами появляются прозрачные изогнутые «трещины» в нефтяной пленке.

Окраска венца при  $t = 19.25$  мс на рис. 4 показывает, что нефть сохранилась только на его внутренней поверхности (темная полоса переменной толщины на нижней границе венца в области формирования капиллярных волн – тень нефтяной пленки на его внутренней поверхности). Изогнутые трещины разрывают на отдельные языки наружный край пленки на сглаженной вершине погружающегося венца. Как можно видеть на увеличенном изображении части венца толщина нефтяной пленки изменяется неравномерно. Ее резко очерченный полупрозрачный внешний край контактирует с основным слоем, толщина которого увеличивается при смещении к центру течения. Внимательное рассмотрение показывает, что максимальная длина полупрозрачного слоя наблюдается около трещин. На расстоянии  $\Delta l_r = 1.3$  мм от темной линии – остатке кромки венца можно выделить еще одну кольцевую границу, охватывающую венец – след внешней стенки венца, образованной захваченной водой.

После спадания венца и ухода группы кольцевых капиллярных волн, остатки хвоста которой видны в левой части кадра при  $t = 37.25$  мс на рис. 5, нефтяное пятно переменной толщины продолжает растекаться отдельными языками, внешняя кромка которых ограничена окружностью диаметром  $d_v = 21.7$  мм. Внутренние окончания трещин (slits) ограничены окружностью диаметром  $d_{sv} = 12.15$  мм. Одни трещины расщепляются и образуют кривую «двузубую вилку», другие оказываются связанными плавным скруглением, третьи остаются нерасщепленными. В правом верхнем уголке виден приближающийся сателлит – остаток стянутой в капельку перемычки, соединившей отрывающуюся каплю нефти с материнской жидкостью (более подробно его динамика прослежена при отрыве капли воды в [34]).

Постепенно депрессия начинает выпучиваться и при  $t = 46.75$  мс (рис. 5) в центре течения формируется растущий всплеск с гладким сферическим оголовком диаметром  $d_{sp} = 3.38$

мм. Нефтяная пленка растекается, ее внешний диаметр составляет  $d_v = 24.4$  мм. При этом центральное плотное нефтяное пятно стягивается с диаметра  $d_p = 16.2$  мм до  $d_p = 13.1$  мм. Диаметр окружности, огибающей внутреннее окончание системы трещин, составляет  $d_{sv} = 8$  мм. На фоне нефтяной пленки в правом углу виден подлетающий нефтяной сателлит. Цилиндрическое тело всплеска «теряется» на фоне контрастных компонентов течения – плотно окрашенной капли и центра нефтяного пятна. Наклонные участки пьедестала визуализируют блики в центре течения.

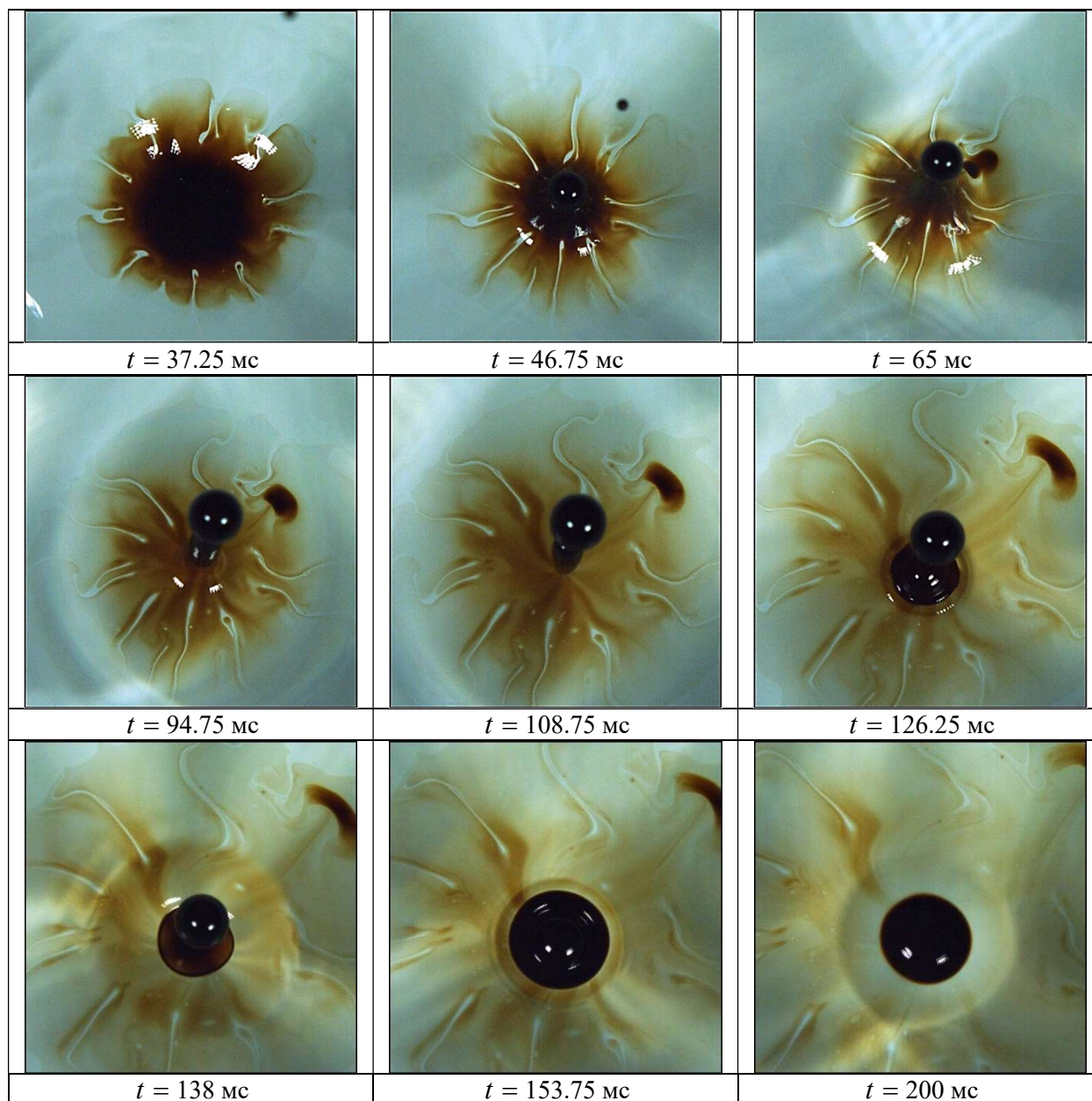


Рис. 5. Эволюция картины течения, образованного каплей нефти, упавшей в кювету с водопроводной водой (импактный режим, вид сверху под углом  $\vartheta = 80^\circ$  к горизонту, продолжение фильма, представленного на рис.4): растекание нефтяного пятна, формирование и распад всплеска

По мере роста высоты всплеска нефтяное пятно на поверхности растекается, и при  $t = 65$  мс его внешний диаметр увеличивается до  $d_v = 28.5$  мм, центральное нефтяное пятно стягивается до  $d_p = 12.2$  мм, внутренние концы трещин длиной до  $l_{sp} = 8$  мм заключены в круге диаметром  $d_{sv} = 4.6$  мм. Сателлит столкнулся с наклонной боковой поверхностью пьедестала

всплеска, частично отскочил, частично слился и образовал локальное движущееся возмущение, оставляющее тонкий след справа от вершины всплеска.

Фаза стягивания центрального пятна сменяется его активным радиальным растеканием и при  $t = 94.75$  мс его размер составляет  $d_v = 16$  мм. Тело растущего всплеска принимает цилиндрическую форму, диаметр капли на его вершине увеличивается и составляет  $d_{sp} = 4.8$  мм. Трудно различимые светлые и темные дуги вокруг основания всплеска визуализируют расходящиеся по дну депрессии кольцевые капиллярные волны. Сателлит трансформировался в тонкую структуру, переднюю и заднюю кромки которой образуют дуги окружностей (внутренняя радиусом  $R_{in} = 1.5$  мм, внешняя  $R_{ou} = 3.3$  мм и расстоянием между ними  $\Delta R_{sv} = 2$  мм). Длина центральной дуги в аксиальном направлении  $l_{sv} = 3.7$  мм.

Диаметр окружности, оконтуривающей окончание трещин, увеличился и составляет  $d_{sv} = 13.6$  мм при  $t = 108.75$  мс. Погружающийся пьедестал всплеска продавливает дно депрессии, которое опускается быстрее, чем тело всплеска, что приводит к заметному утончению его основания на данном изображении. Диаметр капли на его вершине составляет  $d_{sp} = 5$  мм. Быстро затухающие кольцевые капиллярные волны уже не визуализируются. При этом в пятне идут процессы, меняющие толщину пленки, и в изображении появляются более темные радиальные волокна, окруженные просветленными областями, располагающимися между трещинами.

Мелкая плоская интрузия – остаток сателлита, скользит по поверхности жидкости и оставляет тонкий темный след, оконтуренный более светлыми завитками. При этом интрузия деформирует трещину на нефтяной пленке сверху и практически не влияет на форму трещины снизу. Внутренний радиус скользящей интрузии пятна  $R_{in} = 1.95$  мм, внешний  $R_{ou} = 3.65$  мм с расстоянием между ними  $\Delta R_{sv} = 2$  мм, длина дуги в аксиальном направлении сателлита  $l_{sv} = 5.07$  мм.

Достигнув максимальной высоты, всплеск с каплей диаметром  $d_{sp} = 4.81$  мм начинает погружаться и образует конус с нижним диаметром  $d_{sc} = 6.04$  мм на, окруженный кольцом толщиной  $\delta_c = 0.8$  мм при  $t = 126.25$  мс. Симметризация контура пятна указывает на уменьшение влияния поверхностных течений и отраженных капиллярных волн. Диаметр внешнего контура  $d_v = 35$  мм, а окружности, ограничивающей окончания трещин, здесь составляет  $d_{sv} = 16.4$  мм. Растущий контраст полос радиальной направленности указывает на протекание сложных физико-химических процессов на поверхности раздела жидких фаз, способствующих нарастанию неоднородности толщины нефтяной пленки. След слившегося сателлита сохраняет геометрию части кольца, с кромок которого срываются тонкие струйки, образующие окрашенные завитки. Толщина нефтяной пленки заметно уменьшается на краях полосы.

Нефть погружающегося всплеска частично поступает в толщу жидкости (см. рис. 5  $t = 138$  мс) частично растекается по поверхности и образует охватывающее всплеск кольцо диаметром  $d_{sc} = 6.8$  мм в центре выраженной депрессии диаметром  $d_r = 18.3$  мм при  $t = 140$  мс. Диаметр капли на вершине всплеска равен  $d_{sp} = 4.76$  мм. При этом острый край депрессии практически совпадает с границей области распространения трещин. Оголовок следа упавшего сателлита с яркой центральной линией достигает правого края кадра. Завитки, сходящие с его кромок, постепенно уширяются и просветляются. К кромке депрессии примыкают слабые капиллярные волны длиной  $\lambda = 1.88$  и  $2.56$  мм, по условиям освещения, особенно выраженные в окрестности левой верхней диагонали кадра.

Погружение всплеска формирует каверну, в которую начинает погружаться падающая капля, кромку которой отделяет от нефтяного кольца шириной  $\delta_{1r} = 1$  мм тонкая светлая кольцевая прослойка диаметром  $d_l = 6$  мм при  $t = 153.75$  мс. Второе более слабо окрашенное кольцо толщиной  $\delta_{2r} = 1.23$  мм и внешним диаметром  $d_{l2} = 11.2$  мм окружают область слияния. Неравномерность распределения толщины пленки становится еще более выраженной, чем на предыдущем кадре.

Распределение яркости изображения при  $t = 200$  мс позволяет выделить центральное нефтяное пятно диаметром  $d_p = 8.06$  мм, окруженное кольцевой депрессией диаметром  $d_{lr} = 15.6$  мм внутри растекающейся нефтяной пленки, в которой сохраняются вершины разрывов, располагающиеся на окружности диаметром  $d_{sv} = 23.8$  мм и более плотно окрашенные радиально растекающиеся языки.

Важное свойство трещин – сохранение ширины разрыва на фоне значительного увеличения длины, иллюстрируют графики аксиального распределения освещенности  $I$  по окружности, располагающейся в середине системы трещин соответственно. На ранней стадии формирования языков и разделяющих их разрывов в фазе начала спадания венца иллюстрирует выборка из видеограммы при  $t = 19.25$  мс (рис. 6, *a*). На картине распределения освещенности рис. 6, *б* вдоль окружности диаметром  $d_{te} = 16.4$  мм ( $l_\varphi = 0$  на левом конце горизонтального диаметра изображения) на общем темном фоне нефтяных языков выделяются тонкие светлые линии толщиной  $0.4 < \delta_{sp} < 0.6$  мм. На графике пространственного спектра  $S(\lambda)$  кривой  $I(l_\varphi)$  выделяются пики на масштабах  $\delta_l = 6.7, 3.8, 2.7, 2.0, 1.5, 1.3$  мм.

За время  $\Delta t = 18$  мс, разделяющее изображения на рис. 6, *a* и *з*, диаметр базовой окружности изменился до  $d_{te} = 16.6$  мм. Соответственно, увеличилась и ширина языков на рис. 6, *з*.

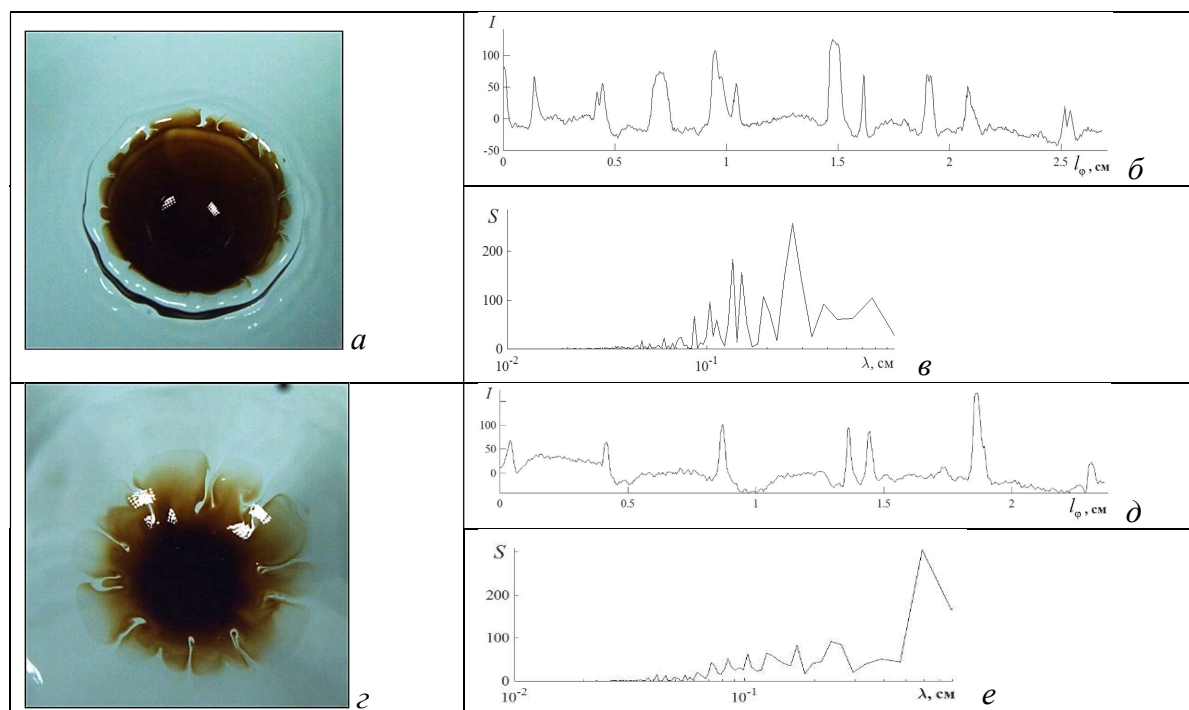


Рис. 6. Анализ пространственной структуры картин распределения нефти: *a, з* – выборки из видеофильма при  $t = 19.25$  и  $37.25$  мс; *б, д* – фотометрия интенсивности света  $I$  вдоль окружности  $l_\varphi$ , проходящей через центры языков; *в, е* – пространственные спектры интенсивности  $I$

Однако ширина трещин, определенная на полувысоте, на рис. 6, *д* и спектральных максимумов на рис. 6, *е* осталась практически неизменной, что указывает на сильное влияние физических параметров контактирующих жидкостей – воды и природной нефти на тонкую структуру течения.

Сравнение размеров основных компонентов течения каверн и венца, возникающих при растекании капли воды и капли нефти в воде при близких условиях опытов, приведенных на рис. 7, показывает качественное подобие картины эволюции общей структуры течений.

Изменение диаметра каверны капли воды в воде рис. 7, кривая  $I$  аппроксимируется показательной зависимостью  $d_c(t) = 4.9t^{0.4} + 3$  при  $t < 30$  мс, после чего каверна несколько стягивается в фазе перестройки в депрессию, диаметр которой начинает расти линейно со временем при  $t = 38$  мс. Далее каверна сменяется плавно стягивающейся к поверхности

депрессией, которая остается после выхода из области наблюдения пакета коротких капиллярных волн (линейный участок  $d_c(t) = 0.708t$  на интервале  $t > 40$  мс).

Зависимость диаметра каверны капли нефти от времени на начальном участке при  $t < 20$  мс также интерполируется зависимостью с меньшим значением коэффициента  $d_c(t) = 3.3t^{0.4} + 3$ . На интервале  $20 < t < 30$  мс в фазе перестройки каверны в депрессию и выхода пакета капиллярных волн из области наблюдения, диаметр каверны вначале несколько уменьшается, а затем начинает линейно увеличиваться, даже несколько более круто, чем диаметр депрессии в воде.

На начальном участке глубина каверны капли воды в воде линейно растет со временем, затем темп несколько спадает и на интервале  $t < 20$  мс аппроксимируется степенной зависимостью  $h_c(t) = 2.5t^{0.5}$  (кривая 3). Глубина такой каверны, которая стягивается к свободной поверхности под действием эффектов плавучести и поверхностного натяжения, начинает уменьшаться при  $t > 25$  мс. Темп уменьшения спадает при  $t > 40$  мс, когда каверна перестраивается в депрессию.

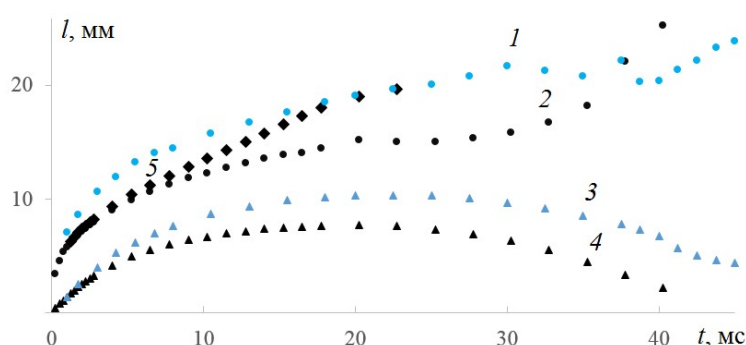


Рис. 7. Эволюция размеров течений при погружении в воду капли воды (1, 3 – диаметр и глубина каверны) и капли нефти (2, 4 – диаметр и глубина каверны, 5 – диаметр венца)

Темп изменения глубины нижней кромки области вторжения нефти в воду при  $t < 4$  мс практически неотличим от закономерности изменения глубины каверны в воде. При  $t > 5$  мс изменение глубины положения нефтяной интрузии аппроксимируется закономерностью  $h_c(t) = 2.5t^{0.5}$  на интервале  $5 < t < 20$  мс (кривая 4). Максимальная глубина погружения  $h_c = 7.7$  мм нефти достигается при  $t = 20$  мс.

Временная эволюция зависимости диаметра венца, которую показывает кривая 5, на начальном этапе при  $t < 5$  мс совпадает с шириной каверны. Далее венец начинает активно растекаться, и его диаметр растет со временем линейно.

Сравнение временных закономерностей показывает, что на начальном этапе эволюции течения определяющую роль играют инерциальные свойства жидкости. Эффекты поверхностного натяжения заметно проявляются при  $t > 30$  мс.

## 5. Обсуждение результатов

Необходимо отметить, выбор научных фотографий, иллюстрирующий растекание упавшей в воду капли нефти, довольно ограниченный, несмотря на обилие случаев формирования такого вида течений в природных и промышленных условиях. Рассмотрение серии фотографий, приведенных в [20], показывает, что на начальном этапе втекания быстро падающей капли нефти, когда ее кинетическая энергия заметно превышает потенциальную поверхностную энергию, поверхность области вторжения остается гладкой (дно каверны при слиянии смешивающихся жидкостей перколировано многочисленными волокнами [11, 20]). Гладкость поверхности погруженного нефтяного объема сохраняется и на последующих

этапах эволюции течения. Нижняя граница объема нефти, втекающей в воду, сохраняет выпуклость на начальном этапе. Постепенно окрашенная область принимает цилиндрическую форму со сферическим оголовком.

Из сравнения видеок кадров, представленных выше на рис. 5, 6, и фотографий картины растекания капли нефти, приведенных в [17], следует, что важные особенности картины течения сильно зависят от состояния чистоты поверхности, которая на открытой воде быстро покрывается пылью. На свежеприготовленной поверхности с малой концентрацией пыли, капля нефти растекается в тонком слое (см. рис. 5, 6). На запыленной она образует компактное пятно (рис. 8).

Рассмотрение увеличенного изображения картины слияния капли на рис. 8 показывает, что пылинки на поверхности химически и электрически активной жидкости собираются в длинные изогнутые волокна, образующие нерегулярные полосчатые и ретикулярные структуры – «рваные сетки» [17]. Прочность волокон обеспечивает сохранение элементов структур при увеличении свободной поверхности при возвышении венца, в основном состоящего из воды, покрытой изнутри слоем нефти, позволяющим визуализировать его составную структуру и прозрачную водяную оболочку.

Внешняя кромка нефтяного слоя, которая разрывается языками, вторгающимися в зубцы на краю венца, также позволяет визуализировать его внешнюю водяную оболочку. Толщина наружного слоя венца неравномерно увеличивается к основанию вследствие вязкого и инерциального вовлечения приповерхностного слоя принимающей жидкости с собственными термодинамическими характеристиками. Форму внешней поверхности венца, которую покрывает тень раскрытой верхней кромки, помогают проследить продолжения волокон пылинок на прилегающей поверхности жидкости. Особенно четко они выделяются в центре увеличенного изображения фотографии на рис. 8, *a*.

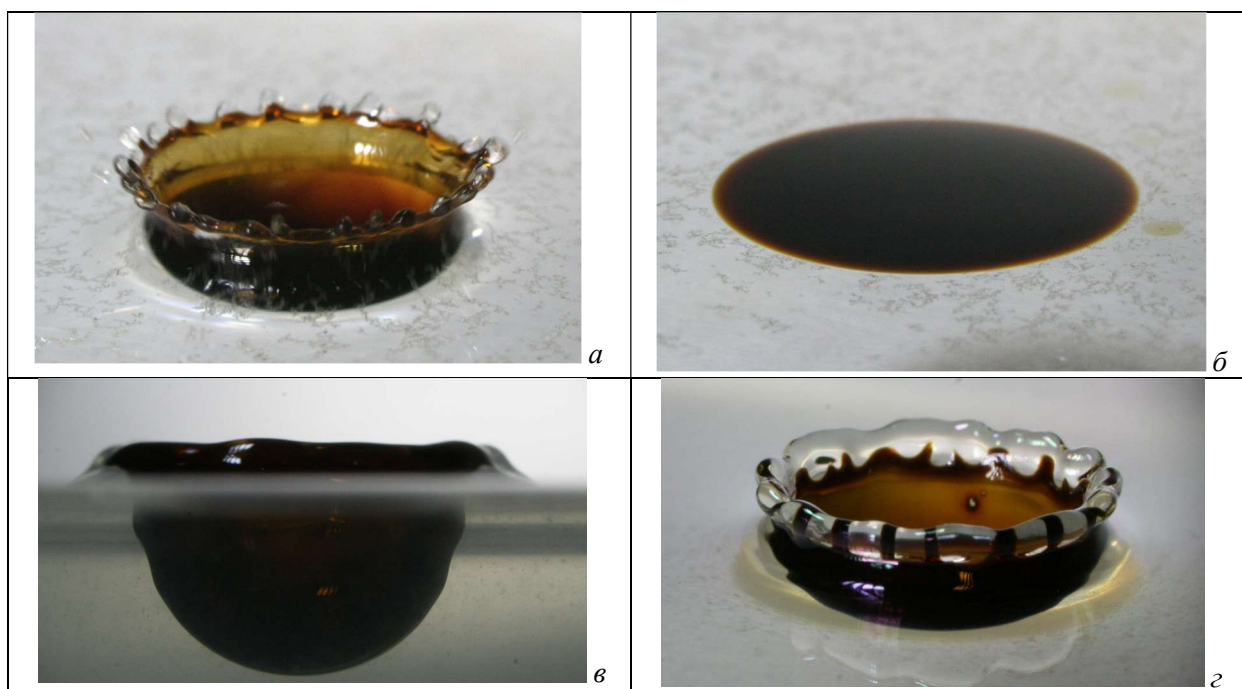


Рис. 8. Фотографии картины течения при растекании капли нефти в воде с запыленной поверхностью ( $D = 0.31$  см,  $U = 3.0$  м/с): *a*, *б* – развитый венец и остаточное пятно поверхности (фотографии заимствованы из [17]); *в* – спадающий венец в боковой проекции; *г* – спадающей венец, вид сверху (на рис. 8, *a*, *б*, *в* наклон линии визирования составляет  $20^\circ$  к горизонту)

Вытянутые капельки – оторвавшиеся окончания шипов – тонких струек с вершин зубцов, в основном состоят из воды, как и вершины скругляющихся зубцов, которые нефть покрывает тонким слоем изнутри (рис. 8, *a*). Толщина слоя нефти на стенках венца бочко-

образной формы с раскрывающейся вершиной, неравномерна. Отдельные более темные тонкие волокна визуализируют тонкие струйки нефти, текущие по его поверхности, которые выделяются и на сужающейся нижней части (ей соответствует тонкая более темная кольцевая полоска), и на раскрывающейся верхней более прозрачной части. Следы струек на стенке каверны более размыты.

Одновременно необходимо отметить сложность интерпретации оптических изображений течения прозрачных жидкостей, обусловленных эффектами интегрирования отклонений и яркости лучей света, затенением части изображений и эффектами полного внутреннего отражения, скрывающими часть полной сложной картины течения. Маскирующие оптические эффекты особенно отчетливо проявляются на фотографии картины течения через свободную поверхность, приведенные на рис. 8, *г*. Тень от языков нефти, отчетливо видимых на внутренней поверхности изображения верхней части зубцов венца, создает образ периодических полосчатых структур с ровными боковыми границами в нижней части изображения. Темные тени на вершинах зубцов в правой и левой частях изображения венца, которые можно было бы трактовать как присутствие изолированных капель нефти, на самом деле – вводящие в заблуждения миражи. Желтоватая окраска тени расходящейся вершины венца с нефтяной пленкой на внутренней поверхности искажает образ границы внешнего водяного слоя, который прорисовывают продолжения волокон пыли на рис. 8, *в*.

Четкие границы слоя нефти и на остатке венца, и в толще принимающей жидкости – следствие отсутствия тонких структур течений, характерных для течений смешивающихся жидкостей [11, 31], указывают на необходимость тщательного анализа влияния различия термодинамических потенциалов сред, играющих важную роль в процессах формирования границ течений, на динамику эволюции тонкой структуры течения.

## 6. Заключение

Совершенствование осветительной аппаратуры, инструментов видеорегистрации, компьютерных программ обработки данных расширяет технические возможности проведения капельных экспериментов на Стенде для изучения тонкой структуры быстропротекающих процессов (ТБП), входящем в состав Уникальной исследовательской установки УИУ «ГФК ИПМех РАН», и позволяет, в дополнение к регистрации геометрии свободной поверхности при формировании каверны, венца, пелены, брызг, изучать картину переноса вещества капли на поверхности и в толще прозрачной принимающей жидкости. В данных опытах впервые изучена эволюция картины распределения вещества капли природной нефти в покоящейся принимающей жидкости – в кювете, наполненной водопроводной водой. Опыты выполнены в импактном режиме течения, когда кинетическая энергия капли заметно превышает ее потенциальную поверхностную энергию.

При слиянии капля, смешивающаяся с принимающей жидкостью, в импактном режиме распадается на отдельные тонкие струйки, протыкающие дно каверны, бегущие по поверхности жидкости и распадающиеся на мелкие брызги. Волокнистые структуры наблюдаются и на последующих этапах эволюции течений.

Капля нефти, упавшая в воду, на начальном этапе растекания деформирует свободную поверхность и образует в области контакта сред энергетически нагруженный слой, включающий обе контактирующие жидкости. Граница области контакта сред распадается на отдельные струйки воды с капельками нефти. С вершин струек циклически вылетают мелкие брызги, каждая новая группа вылетает под все большим углом к горизонту. Рассмотрение увеличенных изображений показывает, что капельки, формирующие «нефтяной туман», содержат и нефть, и воду. Втекающая нефть образует растущее пятно на поверхности воды и формирует каверну. В центре стягивающейся каверны со временем образуется всплеск, с вершины которого выбрасывается новая капля, содержащая и нефть, и воду. Перемычка, связывающая вылетающую каплю с остатком всплеска, включает мелкие капельки нефти в водяной оболочке. Погружающийся всплеск и возвращающаяся капля образуют новые каверны

быстро меняющейся формы. Граница растекающейся по поверхности жидкости нефтяной пленки разрывается тонкими трещинами на отдельные сектора. Положение линий разрыва определяют впадины на границе области растекания нефти с водой на поверхности венца. Прослежена геометрия некоторых структурных компонентов течения.

## Благодарности и ссылка на гранты

Эксперименты проведены на Стенде ТБП в составе УИУ “ГФК ИПМех РАН”. Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Госзадания, номер государственной регистрации 124012500442-3.

## Литература

1. Крупнейшие разливы нефти в истории. Site: <https://nangs.org/news/world/11-krupneyshih-razlivov-nefti-v-istorii>
2. 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.
3. Murphy D. W., Li C., d’Albignac V., Morra D., Katz J. Splash behavior and oily marine aerosol production by raindrops impacting oil slicks // J. Fluid Mech. 2015. Vol. 780. Pp. 536–577.
4. Luswetia E., Kandab E.K., Obandoa J., Makokhaa M. Effects of oil exploration on surface water quality – a review // Water Practice & Technology. 2022. Vol. 17, iss. 10. P. 2171. DOI: 10.2166/wpt.2022.104
5. Chen R. H., Lai C.-M. Collision outcome of a water drop on the surface of a deep diesel fuel pool // Proc. Inst. Mech. Engrs., Part C: J. Mech. Engng. Sci. 2011. Vol. 225, iss. 7. Pp. 1–11. DOI: 10.1177/0954406211403066
6. Fujimatsu T., Fujita H., Hirota M., Okada O. Interfacial deformation between an impacting water drop and a silicone-oil surface // J. Colloid and Interface Science. 2003. Vol. 264. pp. 212–220. DOI: 10.1016/S0021-9797(03)00402-8
7. Che Z., Matar O.K. Impact of droplets on immiscible liquid films // Soft Matter. 2018. Vol. 14, iss. 9. Pp. 1540–1551. DOI: 10.1039/c7sm02089a
8. 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
9. Lhuissier H., Sun C., Prosperetti A., Lohse D. Drop fragmentation at impact onto a bath of an immiscible liquid // Phys. Rev. Lett. 2013. Vol. 110. pp. 264503. DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.264503
10. 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
11. Чашечкин Ю. Д., Ильиных А. Ю. Распад капли на отдельные волокна на границе области контакта с принимающей жидкостью // Доклады РАН. Физика. 2021. Т. 497. № 1. С. 31–35. DOI: 10.31857/S2686740021020139
12. Manzello S. L., Yang J. C., Cleary T. G. On the interaction of a liquid droplet with a pool of hot cooking oil // Fire Safety J. 2003. Vol. 38. Pp. 651–659. DOI: 10.1016/S0379-7112(03)00048-1
13. Xu M., Zhang J., Wu C., et al. Collision dynamics of a single water droplet impinging on a high-temperature pool of oil // Acta Mech. 2018. Vol. 229. Pp. 1567–1577. <https://doi.org/10.1007/s00707-017-2071-5>
14. Lan M. J., Wang X. S., Zhu P., Chen P. P. Experimental study on the dynamic process of a water drop with additives impact upon hot liquid fuel surfaces // Energy Proc. 2015. Vol. 66. Pp. 173–176.
15. Ильиных А. Ю., Чашечкин Ю. Д. Гидродинамика погружающейся капли: несмешивающиеся жидкости // Изв. РАН. МЖГ. 2020. Т. 55. № 2. С. 169–176.

16. Чашечкин Ю. Д., Ильиных А. Ю. Растекание капли воды в слое масла // Доклады РАН. Физика. 2020. Т. 490. С. 87–94. DOI:10.1134/S1028335820020020
17. Чашечкин Ю. Д., Ильиных А. Ю. Погружение свободно падающей капли и последующий всплеск: тонкие структуры течений // ПЭОС. 2016. Т. 19. Вып. 2. С. 2–30.
18. Чашечкин Ю. Д., Ильиных А. Ю., Хайирбеков Ш. Начальный этап слияния составной капли в импактном режиме // Изв. РАН. МЖГ. 2024. № 2. С. 35–51. DOI: 10.31857/S1024708424020045
19. Chies M., Melheim J.A., Pedersen A., Ingebrigtsen S., Berg G. Forces acting on water droplets falling in oil under the influence of an electric field: numerical predictions versus experimental observations // Europ. J. Mechanics - B/Fluids. 2005. Vol. 24, iss. 6. Pp. 717–732. <https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2005.03.005>
20. Чашечкин Ю. Д., Ильиных А. Ю. Влияние растворимости на структуру дна каверны при слиянии капли в импактном режиме // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2025. Т. 26, вып. 2. <http://chemphys.edu.ru/issues/2025-26-2/articles/1175>
21. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука, 1986.
22. Feistel R. Thermodynamic properties of seawater, ice and humid air: TEOS-10, before and beyond // Ocean Sciences. 2018. Vol.14. Pp. 471–502.
23. Harvey A. H., Hrubý J., Meier K. Improved and always improving: reference formulations for thermophysical properties of water // J. of Phys. and Chem. Ref. Data. 2023. Vol. 52. P. 011501. DOI: 10.1063/5.0125524
24. Eisenberg D., Kauzmann W. The Structure and Properties of Water (Oxford Classic Texts in the Physical Sciences). Oxford: Oxford University Press, 2005.
25. Teschke O., de Souza E.F. Water molecule clusters measured at water/air interfaces using atomic force microscopy // Phys. Chem. Chem. Phys. 2005. Vol. 7, iss. 22. Pp. 3856–3865. DOI: <https://doi.org/10.1039/B511257E>
26. Bunkin N. F., Suyazov N. V., Shkirin A. V., Ignat'ev P. S., Indukaev K. V. Study of Nanostructure of highly purified water by measuring scattering matrix elements of laser radiation // Phys. Wave Phenom. 2008. Vol.16. Pp. 243–260. DOI:10.3103/S1541308X08040018
27. Malenkov G. G. Structure and dynamics of surfaces of thin films and water microdroplets // Colloid Journal. 2010. Vol. 72, iss. 5. Pp. 649–659. DOI: 10.1134/S1061933X1005011X
28. Фотографии фотосферы Солнца. Сайт: [https://xras.ru/sun\\_pictures.html](https://xras.ru/sun_pictures.html)
29. Chashechkin Yu. D. Foundations of engineering mathematics applied for fluid flows // Axioms. 2021. Vol.10. P. 286. <https://doi.org/10.3390/axioms10040286>
30. Chashechkin Y. D., Ochirov A. A. Periodic flows in a viscous stratified fluid in a homogeneous gravitational field // Mathematics. 2023. Vol.11. P. 4443. <https://doi.org/10.3390/math11214443>
31. Чашечкин Ю. Д. Закономерности распределения вещества свободно падающей окрашенной капли в прозрачной принимающей жидкости (обзор) // Изв. РАН. МЖГ. 2025. № 1. С. 34–76. DOI: 10.1134/S0015462824604315
32. 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>
33. Чашечкин Ю. Д., Ильиных А. Ю. Разрыв спадающего всплеска – динамического следа слияния свободно падающей капли с покоящейся принимающей жидкостью // Доклады РАН. Физика. 2022. Т. 505. С. 50–58.
34. Чашечкин Ю. Д., Прохоров В. Е. Трансформации перемычки в процессе отрыва капли // ПМТФ. 2016. № 3. С. 16–31. DOI: 10.15372/PMTF20160303
35. Чашечкин Ю. Д., Ильиных А. Ю. Множественные выбросы брызг при ударе капли // Доклады РАН. 2020. Т. 494. С. 42–46. DOI: 10.31857/S2686740020050181

## References

1. The largest oil spills in history. Site: <https://nangs.org/news/world/11-krupneyshih-razlivov-nefti-v-istorii>
2. 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.
3. Murphy D. W., Li C., d'Albignac V., Morra D., Katz J., Splash behavior and oily marine aerosol production by raindrops impacting oil slicks, *J. Fluid Mech.*, 2015, vol. 780, pp. 536–577.
4. Luswetia E., Kandab E.K., Obandoa J., Makokhaa M., Effects of oil exploration on surface water quality– a review, *Water Practice & Technology*, 2022, vol. 17, issue 10, p. 2171.  
DOI: 10.2166/wpt.2022.104
5. Chen R. H., Lai C.-M., Collision outcome of a water drop on the surface of a deep diesel fuel pool, *Proc. Ins. Mech. Eng., Part C: J. Mech. Engng. Sci.*, 2011, vol. 225, issue 7, pp. 1–11.  
DOI: 10.1177/0954406211403066
6. Fujimatsu T., Fujita H., Hirota M., Okada O., Interfacial deformation between an impacting water drop and a silicone-oil surface, *J. Colloid and Interface Science*, 2003, vol. 264, pp. 212–220.  
DOI: 10.1016/S0021-9797(03)00402-8
7. Che Z, Matar O. K., Impact of droplets on immiscible liquid films, *Soft Matter.*, 2018, vol. 14, iss. 9, pp. 1540–1551. DOI: 10.1039/c7sm02089a
8. 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
9. Lhuissier H., Sun C., Prosperetti A., Lohse D., Drop fragmentation at impact onto a bath of an immiscible liquid, *Phys. Rev. Lett.*, 2013, vol. 110, pp. 264503.  
DOI:10.1103/PhysRevLett.110.264503
10. 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
11. 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, issue 4. pp. 101–105.  
DOI: 10.1134/S1028335821040078
12. Manzello S. L., Yang J. C., Cleary T. G., On the interaction of a liquid droplet with a pool of hot cooking oil, *Fire Safety J.*, 2003, vol. 38, pp. 651–659. DOI: 10.1016/S0379-7112(03)00048-1
13. Xu M., Zhang J., Wu C., et al., Collision dynamics of a single water droplet impinging on a high-temperature pool of oil, *Acta Mech.*, 2018, vol. 229, pp. 1567–1577. <https://doi.org/10.1007/s00707-017-2071-5>
14. Lan M. J., Wang X. S., Zhu P., Chen P. P., Experimental study on the dynamic process of a water drop with additives impact upon hot liquid fuel surfaces, *Energy Proc.*, 2015, vol. 66, pp. 173–176.
15. Il'inykh A. Yu., Chashechkin Yu. D., Hydrodynamics of a submerging drop: immiscible liquids, *Fluid Dynamics*, 2020, vol. 55, iss. 2, pp. 162–170. DOI: 10.1134/S1028335820020020
16. Chashechkin Yu. D., Ilinykh A. Yu., Spreading of a Water Drop in an Oil Layer, *Doklady Physics*, 2020, vol. 65, iss. 2, pp. 75–81. DOI: 10.1134/S1028335820020020
17. Chashechkin Yu. D., Il'inyh A. Yu., Submersion of free fallen drop and subsequent splash flow fine structure, *PEOS*, 2016, vol. 19, iss. 2, pp. 2–30 [in Russian, Title and abstract in English].
18. Chashechkin Yu. D., Il'inykh A. Yu., Khairbekov Sh. Kh., The Initial Stage of the Coalescence of a Compound Drop in an Impact Regime, *Fluid Dynamics*, 2024, vol. 59, iss. 2, pp. 202–218.  
DOI: 10.1134/S0015462824600226
19. Chies M., Melheim J.A., Pedersen A., Ingebrigtsen S., Berg G., Forces acting on water droplets falling in oil under the influence of an electric field: numerical predictions versus experimental observations, *Europ. J. Mechanics - B/Fluids*, 2005, vol. 24, iss. 6, pp. 717–732.  
<https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2005.03.005>

20. Chashechkin Yu. D., Ilinykh A. Yu., The influence of solubility on the structure of the cavity bottom during droplet merging in the impact mode, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2025, vol. 26, iss. 2 [in Russian]. DOI: 10.33257/PhChGD.26.2.1175
21. Landau L. D., Lifshitz E. M., *Fluid Mechanics. V.6. Course of Theoretical Physics*, Oxford: Pergamon Press, 1987.
22. Feistel R., Thermodynamic properties of seawater, ice and humid air: TEOS-10, before and beyond, *Ocean Sciences*, 2018, vol.14, pp. 471–502.
23. Harvey A. H., Hrubý J., Meier K., Improved and always improving: reference formulations for thermophysical properties of water, *J. of Phys. and Chem. Ref. Data*, 2023, vol. 52, p. 011501. DOI: 10.1063/5.0125524
24. Eisenberg D., Kauzmann W., *The Structure and Properties of Water (Oxford Classic Texts in the Physical Sciences)*, Oxford: Oxford University Press, 2005.
25. Teschke O., de Souza E. F., Water molecule clusters measured at water/air interfaces using atomic force microscopy, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2005, vol. 7, iss. 22, pp. 3856–3865. DOI: <https://doi.org/10.1039/B511257E>
26. Bunkin N. F., Suyazov N. V., Shkirin A. V., Ignat'ev P. S., Indukaev K. V., Study of Nanostructure of highly purified water by measuring scattering matrix elements of laser radiation, *Phys. Wave Phenom.*, 2008, vol. 16, pp. 243–260. DOI:10.3103/S1541308X08040018
27. Malenkov G. G., Structure and dynamics of surfaces of thin films and water microdroplets, *Colloid Journal*, 2010, vol. 72, iss. 5, pp. 649–659. DOI: 10.1134/S1061933X1005011X
28. Photographs of the solar photosphere. Site: [https://xras.ru/sun\\_pictures.html](https://xras.ru/sun_pictures.html)
29. Chashechkin Yu. D., Foundations of engineering mathematics applied for fluid flows, *Axioms*, 2021, vol. 10, pp. 286. <https://doi.org/10.3390/axioms10040286>
30. Chashechkin Yu.D., Ochirov A. A., Periodic flows in a viscous stratified fluid in a homogeneous gravitational field, *Mathematics*, 2023, vol. 11, p. 4443. <https://doi.org/10.3390/math11214443>
31. Chashechkin Yu. D., The laws of the matter distribution in a colored free-falling drop in a transparent target fluid (Review), *Fluid Dynamics*, 2024, vol. 59, iss. 6, pp. 1693–1734. DOI: 10.1134/S0015462824604315
32. 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>
33. Chashechkin Yu. D., Ilinykh A. Yu., Rupture of a Subsiding Splash: A Dynamic Trace of the Merger of a Freely Falling Drop with a Receiving Fluid at Rest, *Doklady Physics*, 2022, vol. 67, iss. 6, pp. 201–208. DOI: 10.1134/S1028335822060039
34. Chashechkin Yu. D., Prokhorov V. E., Transformation of the bridge during separation of a droplet, *J. Applied Mechanics and Technical Physics*, 2016, vol. 57, iss 3, pp. 402–415. DOI: 10.15372/PMTF20160303
35. Chashechkin Yu. D., Ilinykh A. Yu., Multiple emissions of splashes upon drop impact, *Doklady Physics*, 2020, vol. 65, iss. 10, pp. 384–388. DOI: 10.1134/S1028335820100067

Статья поступила в редакцию 11 февраля 2026 г.