

Ю.Д. Чашечкин, А.Ю. Ильиных  
Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН,  
Россия, Москва ([chakin@ipmnet.ru](mailto:chakin@ipmnet.ru); [ilynykh@ipmnet.ru](mailto:ilynykh@ipmnet.ru))

## ПОГРУЖЕНИЕ СВОБОДНО ПАДАЮЩЕЙ КАПЛИ И ПОСЛЕДУЮЩИЙ ВСПЛЕСК: ТОНКИЕ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЙ

**Аннотация.** Методами макрофотосъемки и высокоскоростной видеосъемки исследована эволюция картины течения, возникающего в процессе погружения свободно падающей капли в глубокую жидкость. В опытах использованы капли пресной или соленой воды, подкрашенной ализариновыми чернилами, этанола, молока, нефти и подсолнечного масла, падающие в чистую или подкрашенную воду. Основное внимание уделено регистрации картины растекания окрашенной капли по деформированной поверхности и поступления вещества в толщу принимающей жидкости. Впервые установлено, что на поверхности каверны и венца вещество капли концентрируется в тонких волокнах, образующих ряд структурных уровней. В верхнем ряду венца наблюдаются вертикальные волокна, большинство которых примыкает к основаниям зубцов. В каверне распределение волокон усложняется и в ее центре линейчатый узор сменяется сетчатым. На дне каверны выражены треугольные, а также четырех- и пятиугольные ячейки. Положение и пространственная ориентация волокон сетки со временем меняются.

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

### Введение

Начиная с первых публикаций [1] и до настоящего времени [2] большое внимание уделяется изучению процесса перераспределения вещества свободно падающей окрашенной капли в вихревое кольцо и, далее, в каскад вихревых колец, связанных отдельными петлями [3, 4]. Качество фотографий, достаточно высокое уже в первых опытах [5], продолжало повышаться по мере совершенствования осветителей и фототехники [6].

Компьютеризация эксперимента и появление цифровых фото- и видеорегистраторов открыли новые возможности в исследовании классической задачи [7]. Новая техника с частотой съемки выше 1 млн кадров/с и выдержкой меньше 100 нс позволила устойчиво выделить новые особенности даже в ранее хорошо изученных процессах, проследить особенности переноса вещества на ранних стадиях контакта падающей капли с жидкостью.

В картине эволюции течений выделены первичная кольцевая пелена с семейством стримеров [8], каверна [9] и венец с краевым шевроном, с вершин зубцов которого выбра-

сываются последовательности мелких капелек – брызги [10]. На более поздних стадиях процесса наблюдаются система кольцевых капиллярных волн [11] и обратные струйки, как сравнительно толстые струи (кумулятивные [12]), так и тонкие – стримеры [13]. В ходе погружения капли излучаются высокочастотные акустические сигналы (короткие пакеты), которые регистрируются и в жидкости, и в воздухе [14].

Повышение разрешающей способности регистрирующей аппаратуры, позволяющее уточнить детали структуры течений, показало, что диск первичной пелены, в зависимости от свойств жидкостей, может быть и плоским, и деформированным [15].

Семейства капиллярных волн наблюдаются не только на поверхности покоящейся жидкости, но и на отдельных структурных компонентах – поверхности выступающего венца и первичной каверны [16], а также и даже на поверхности погружающейся капли [17]. Образование коротких капиллярных волн тесно связано с процессами формирования или отрыва структурных компонент, в частности, эжекцией мелких капелек и их столкновениями с деформированной

поверхностью принимающей жидкости или погружающейся капли.

Диапазон масштабов природных процессов, на свойства которых влияют мелкие брызги, возникающие при столкновениях капель с поверхностью жидкости, достаточно широк и включает как микромасштабные явления – перенос вещества и излучение звука [13, 14], так и глобальные в масштабах Земли.

Вылетающие микрокапли высыхают, образуя кристаллики солей попадают с током воздуха в верхние слои атмосферы, где задерживаются на длительное время и служат центрами конденсации влаги, необходимыми для формирования облачных систем, которые в свою очередь влияют на погоду и климат.

Капли и брызги также участвуют в обмене микробами и вирусами между гидросферой и атмосферой, влияют на распространение массовых инфекций [18]. Изучение тонкой структуры процесса переноса вещества капли представляет и общенаучный, и прикладной интерес.

Цель данной работы – изучение пространственной структуры картины переноса вещества на ранних стадиях процесса, в котором представлены собственно погружающаяся капля, каверна в принимающей жидкости и растущий венец.

Выполнена высокоразрешающая визуализация тонкой структуры течений при контакте смешивающихся (подкрашенная вода – вода, водные растворы этанола и поваренной соли – вода, молоко – подкрашенная вода) и несмешивающихся жидкостей (нефть – вода, подкрашенное подсолнечное масло – вода). Ранее подробные исследования переноса вещества не проводились, основное внимание уделялось изучению общей геометрии течений.

### Система уравнений гидродинамики

Изучение течений жидкости со свободной поверхностью и планирование экспериментов традиционно проводится на основе уравнений неразрывности и Навье-Стокса в приближении вязкой однородной несжимаемой среды. Акустическими эффектами, в частности, излучением звука, в традиционном рассмотрении пренебрегается.

Система уравнений гидродинамики для плотности  $\rho$ , скорости жидкости  $\mathbf{v}$ , давления  $P$ , кинематической (динамической) вязкости  $\nu = \mu/\rho$ , в плоском гравитационном поле с ускорением свободного падения  $\mathbf{g}$  используется в форме [19]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \rho \mathbf{v} = 0, \quad \operatorname{div} \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \nabla) \rho \mathbf{v} = -\nabla P + \rho \mathbf{g} + \mu \Delta \mathbf{v}$$

На поверхности раздела двух вязких несмешивающихся жидкостей 1 и 2 или жидкости и газа

$$z = \zeta(x, y, t) \quad (2)$$

выполняются динамические условия взаимной компенсации всех действующих на поверхность сил

$$\left( P_1 - P_2 - \sigma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \right) \nabla_i \zeta -$$

$$- \left( \sigma_1^{ij} - \sigma_2^{ij} \right) \nabla_j \zeta = 0 \quad (3)$$

и кинематические граничные условия равенства скорости жидкости на границе и скорости самой границы

$$\mathbf{v} \cdot \nabla (z - \zeta) = \frac{\partial \zeta}{\partial t}, \quad \mathbf{v} \times \nabla (z - \zeta) = 0, \quad (4)$$

где  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения,  $\sigma_{1,2}^{ij}$  – тензоры вязких напряжений сред 1, 2,  $R_1, R_2$  – радиусы кривизны.

В силу сложности быстро меняющейся геометрии задача, описывающая погружение капли в жидкость, обычно анализируется численными методами в приближении вязкой [20] или идеальной жидкости [21]. Трудности вызывает расчет тонких деталей деформации свободных поверхностей принимающей жидкости и вторгающейся капли, распределения скоростей переноса вещества падающей капли в принимающей жидкости.

Вычисления проводятся в приближении осесимметричности течения, применимость которого нуждается в экспериментальной проверке. Система (1) в неявной форме предполагает, что поля всех физических переменных задачи – плотности, скорости, энергии, концентрации вещества (кра-

сителя) капли распределяются подобным образом.

Одна из целей проводимого эксперимента – проверка выполнения распространенных предположений в реальном физическом эксперименте с окрашенными каплями, падающими в покоящуюся глубокую жидкость.

**Определяющие размерные и безразмерные параметры задачи** Структуры течений, возникающих при слиянии свободно падающей капли с принимающей жидкостью, зависят от физических свойств контактирующих сред, которые характеризуются термодинамическими и кинетическими параметрами, а также условиями опытов. В число влияющих физических величин входят следующие: плотности (воздуха  $\rho_a$ , жидкостей капли  $\rho_d$  и принимающей (мишени)  $\rho_t$ , далее  $\rho_{a,d,t}$ ), кинематические  $\nu_{a,d,t}$  и динамические  $\mu_{a,d,t}$  вязкости, полные  $\sigma_d^a$ ,  $\sigma_t^a$  и нормированные на плотность сред  $\gamma_d^a = \sigma_d^a / \rho_d$ ,  $\gamma_t^a = \sigma_t^a / \rho_t$  см<sup>3</sup>/с<sup>2</sup> коэффициенты поверхностного натяжения, коэффициенты диффузии вещества капли  $\kappa_t^d$  и маркирующей примеси  $\kappa_t^{md}$  в принимающей жидкости, а также температуры (считается равной для всех сред  $T_d = T_t = T_a$ ). Значения параметров жидкостей, использованных в экспериментах, приведены в табл. 1.

Условия опытов задают диаметр  $D$  и скорость  $U$  капли в момент первичного контакта. Капля в данных опытах свободно падала с высоты  $H$  в однородном поле силы тяжести с ускорением  $g$ .

В качестве основы математического (аналитического и численного) и экспериментального моделирования процессов столкновения капли с жидкостью используются как полная система балансных уравнений, включающая уравнения неразрывности, переноса импульса, энергии и вещества [19], которая здесь для краткости не приводятся, так и упрощенные модели, частично учитывающие эффекты диссипации и поверхностного натяжения [22], и даже приближение идеальной жидкости [23].

Поскольку расчет процессов погружения капли с учетом физически обоснованных граничных условий представляет большие трудности, для определения требований к методике эксперимента целесообразно провести масштабный пространственно-временной анализ системы уравнений задачи.

Физические параметры задачи определяют наборы масштабов времени и длины, которые подразделяются на несколько групп. В одной из них масштабы задаются только физическими характеристиками сред, в других – зависят от размера или скорости капли.

Первая группа линейных масштабов включает капиллярно-гравитационный параметр  $\delta_g^\gamma = \sqrt{\gamma/g}$ , входящий в дисперсионное уравнение коротких поверхностных волн [19], и диссипативно-капиллярные масштабы  $\delta_\gamma^v = \nu^2 / \gamma$ ,  $\delta_\gamma^k = \kappa^2 / \gamma$ . В литературе встречаются и другие масштабы, типа  $\delta_g^v = \sqrt[3]{\nu^2/g}$  [24], которые могут рассматриваться как производные приведенных базовых масштабов, в частности  $\delta_g^v = \sqrt[3]{\delta_\gamma^v (\delta_g^\gamma)^2}$

Вторая группа линейных масштабов, которые зависят от скорости капли, включает кинематический  $\delta_g^U = U_d^2/g$ , а также тонкие капиллярный  $\delta_U^\gamma = \gamma/U_d^2$  и прандтлевы  $\delta_U^v = \nu/U_d$  и  $\delta_U^k = \kappa/U_d$  масштабы (значения приведены в табл. 2).

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

В маловязких средах значения масштабов, приведенные в таблицах 2, 3, существенно различаются. В частности, для воды наибольший и наименьший масштабы длины равны  $\delta_{\min} = \delta_g^v = 1.4 \cdot 10^{-6}$  см и

$\delta_{\max} = \delta_g^\gamma = 0.27$  см, соответственно, а временные масштабы –  $\tau_{\min} = \tau_\gamma^\nu = 1.9 \cdot 10^{-10}$  с и  $\tau_{\max} = \tau_\nu^D = 17.6$  с.

В целом большие диапазоны изменчивости значений однородных параметров (масштабов времени, длины, скорости, плотности энергии, приведенные в табл. 2, 3) указывают на внутреннюю сложность изучаемого процесса.

Значения характерных масштабов учитывались при разработке методики эксперимента: в выборе размеров поля наблюдения, которое должно быть достаточно большим и содержать все изучаемые компоненты изучаемого течения, пространственного и временного разрешения регистрирующей аппаратуры.

Отношения базовых линейных и временных масштабов формируют характерные скорости  $U_\nu^\gamma = \gamma / \nu$  (значения приведены в табл. 2) и  $U_\kappa^\gamma = \gamma / \kappa$ , которые используются для параметризации процессов в ряде работ [25].

Отношения характерных масштабов образуют набор безразмерных комбинаций, включающий традиционные числа: Рейнольдса (характеризующие движение капли  $Re_d = UD/\nu_d$  и течения в толще принимающей жидкости  $Re_t = U_t L_t / \nu_t$ , диссипативное (диффузионное)  $Re_t = U_t L_t / \kappa_t$  с характерными масштабами скорости  $U_t$  и длины  $L_t$ ), Фруда  $Fr_d = U^2 / gD$ , Вебера  $We_d = U^2 D / \gamma_d$ , Бонда  $Bo = D^2 / (\delta_g^\gamma)^2 = gD^2 / \gamma_d^a$ , Онезорге  $Oh = \sqrt{\delta_\gamma^\nu / D} = \nu / \sqrt{\gamma D}$ , и так называемое капиллярное отношение  $Ca_U^\nu = U / U_\nu^\gamma$ ,  $Ca_U^\kappa = U / U_\kappa^\gamma$ . Влияние некоторых параметров анализировалось еще в пионерских работах [5], однако степень изученности всей совокупности отношений остается недостаточно изученной.

В целом необходимо отметить, что типичные значения безразмерных параметров задачи для условий данных опытов, приведенные в табл. 4, существенно отличаются от единицы (за исключением числа Бонда),

что затрудняет интерпретацию результатов в традиционных безразмерных отношениях.

Различия в составах вещества капли и принимающей жидкости позволяют характеризовать протекающие процессы еще одной группой комбинаций, включающей следующие безразмерные отношения [15]: - относительную разность плотностей контактирующих сред  $R_\rho = \frac{\rho_t - \rho_d}{\rho_t + \rho_d}$  (число Атвуда), - коэффициентов поверхностного натяжения  $R_\sigma = \frac{\sigma_t - \sigma_d}{\sigma_t + \sigma_d}$ , - динамических вязкостей  $R_\mu = \frac{\mu_t - \mu_d}{\mu_t + \mu_d}$ . Значения относительных коэффициентов приведены в табл. 5.

В данных опытах регистрировалась начальная фаза контакта и погружения капли воды, а также чернил, молока, окрашенного подсолнечного масла или нефти в воду.

Капли диаметром  $D_d = 0.3 \div 0.5$  см свободно падали в воздухе с высоты  $h = 40 \div 80$  см, скорость в момент контакта с гладкой поверхностью принимающей жидкости составляла  $U = 2 \div 3$  м/с (что соответствует режиму формирования выраженной обратной струи [12]). Капля массой  $M = \frac{\pi}{6} \rho D^3$  с площадью свободной поверхности  $S_d = \pi D^2$  падала вертикально,  $\mathbf{U} = (0, 0, U)$ .

Помимо плотности, фундаментальными параметрами процесса являются импульс  $\mathbf{p} = M\mathbf{U}$ , кинетическая  $E_k = \frac{MU^2}{2}$  и доступная потенциальная поверхностная энергия  $E_\sigma = \sigma S_d$  падающей капли.

Поверхностная энергия, обусловленная анизотропией действия атомно-молекулярных сил на контактных границах, считается равномерно распределенной в тонком слое толщиной порядка размера молекулярного кластера  $\delta_\sigma = 10^{-6}$  см [26].

Сравнение энергетических параметров изучаемых процессов, приведенных в табл. 6, показывает, что в условиях проводимых опытов основную долю (более 97%) состав-

ляет кинетическая энергия движения. Однако плотность доступной потенциальной поверхностной энергии существенно выше в силу ее концентрации в тонком слое.

Характер передачи энергии капли в области слияния существенно отличается в начальные моменты соприкосновения длительностью порядка  $\tau \sim 10^{-9}$  с, когда начинает уничтожаться свободная поверхность по всей площади пятна контакта падающей капли и принимающей жидкости, и на более поздних стадиях процесса слияния продолжительностью  $\tau \sim 10^{-3}$  с [17], когда идет основная фаза процесса слияния жидкостей, а доступная потенциальная поверхностная энергия поступает только в узкое кольцо контакта приповерхностного слоя капли с принимающей жидкостью.

Одной из целей работы является визуализация картины течения в момент первичного контакта и последующей эволюции ее структуры.

#### Экспериментальная установка

Опыты выполнены на стенде ТБП, входящем в состав комплекса «УСУ ГФК ИПМех РАН», схематическое изображение которого приведено на рис. 1. Принимающая жидкость помещается в бассейн 1 глубиной  $h_f$  (в опытах использовались стеклянные бассейны размерами  $30 \times 30 \times 5$  см или квадратные чашки Петри размером  $12 \times 12 \times 1.5$  см), над которым на высоте  $H$  устанавливался дозатор капель 8.

Область наблюдения, защищенная рассеивающими и отражающими свет экранами 7, освещалась светильниками 6 ReyLab Xenos RH-1000 мощностью 1 кВт и светодиодами Optronis MultiLED 5 со световым потоком 7700 лм. Экраны позволяли увеличить освещенность и защитить область контакта капли с жидкостью от действия внешних факторов (нагрева и воздушных потоков).

Регистрация картины течений проводилась видеокамерой Optronis CR3000x2 или фотоаппаратом Canon EOS350D 2 с объективом Canon EFS 18-55 мм, который размещался на штативе с 5 степенями свободы.

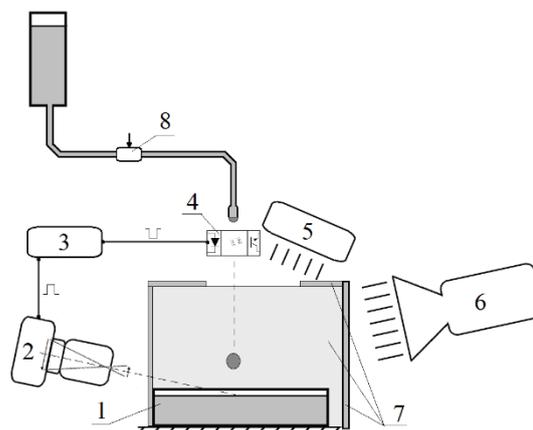


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки: 1 – бассейн, 2 – регистрирующая аппаратура, 3 – блок управления, 4 – прерыватель, 5, 6 – осветители, 7 – защитные стенки, 8 – дозатор.

Для увеличения изображения использовались реверсивное кольцо JJC RR-EOS диаметром 58 мм и макрокольцо Canon толщиной 12 мм, позволившие разрешать элементы с линейными размерами порядка 10 мкм. Линия визирования составляла  $0^\circ$ ;  $20 - 25^\circ$  к горизонту при съемке сбоку и  $70 - 75^\circ$  при съемке сверху, расстояние до области падения капли – 7 - 8 см. Для разрешения воспроизводимых тонкоструктурных компонент устанавливалась минимальная длительность выдержки  $1/4000$  с.

Сигнал на включение фотоаппарата в выбранной стадии контакта с регулируемой задержкой выдавал оригинальный блок управления 3, который запускался при пересечении падающей каплей сфокусированного лазерного луча прерывателя 4.

Блок управления реализован на микроконтроллере с кварцевым резонатором (резонансная частота 16 МГц), точностью настройки  $\pm 50$  Гц. Диапазон регулируемых задержек сигнала – от 1 мкс до 10 с. Выбор времени задержки позволял проследить детали картины течения с небольшим временным сдвигом ( $\sim 100$  мкс) в широком диапазоне высот падения капли.

Геометрические характеристики картины течения определялись фотометрическими методами, для масштабирования регистрировалась эталонная сетка с шагом 10 мм. Обработка данных проводилась в специальных программах в среде Matlab.

Результаты опытов приведены в пяти разделах. В первом внимание уделено описанию геометрии традиционно изучаемых компонент течений.

Во втором визуализированы ранее неизвестные процессы столкновения вылетающих брызг с поверхностью капли, сопровождающиеся генерацией коротких капиллярных волн.

В третьем разделе приведены фотографии каверны с тонкими струями, выносящими вещество капли в толщу жидкости и выборки из видеофильма, иллюстрирующие формирование линейчатой картины распределения вещества по поверхности каверны и венца.

Геометрия линейчатых картин течений, наблюдающихся при слиянии различных окрашенных капель с водой, проанализирована в четвертом разделе.

Картины распределения несмешивающихся жидкостей (нефти и окрашенного растительного масла) по чистой или запыленной поверхности воды приведены в пятом разделе.

Далее обсуждается физическая модель формирования линейчатых структур в области падения капли, динамика и энергетика процессов слияния с учетом различия термодинамических свойств в толще и на свободной поверхности жидкости.

### **Эволюция картины течения**

Основные структурные элементы, характеризующие процесс погружения свободно падающей капли в глубокий слой принимающей жидкости, иллюстрирует серия фотографий, приведенная на рис. 2 (длина метки на всех фотографиях – 1 см). В процессе погружения тыльная часть поверхности капли остается гладкой, в то время как неглубокая каверна и формирующийся венец имеют сложную форму. На поверхности венца, окружающего каверну, выражены гладкие впадины и заостренные гребни, к которым примыкает тонкая пелена с отдель-

ными струйками – стримерами (рис. 2, *а*, зарегистрировано 20 стримеров). С вершин стримеров последовательно выбрасываются мелкие капельки (брызги).

В основном, пелена и стримеры развернуты наружу. Однако на рис. 2, *а* в направлении на "1 час" от центра капли можно видеть искривленную обратную струйку, контактирующую с поверхностью погружающейся капли. На фотографии картины течения в направлении на "6 часов" можно видеть мелкую капельку диаметром 0.015 см. Изучение условий формирования брызг, летящих от венца к поверхности капли, проводилась в [17, 27].

На дне каверны выражены две кольцевые линии: одна из них – внутренняя (линия контакта капли с дном каверны) – гладкая. Внешняя линия – граница перехода каверны в венец – пространственно неоднородная.

По мере погружения капли и роста высоты венца, число зубцов на шевроне заметно уменьшается (на рис. 2, *б* – 12 зубцов). С вершин зубцов выступают короткие стримеры слабоконической формы, с которых периодически выбрасываются отдельные капельки. Синхронный характер вылета капель с различных стримеров указывает на существование волнового процесса на взволнованной поверхности шеврона.

От шеврона сбегает капиллярные волны, которые постепенно покрывают все внутренние поверхности венца и каверны. Пространственно-временная структура волн на венце исследована в [16]. Здесь следы капиллярных волн видны в правой верхней части картины на границе между цилиндрической стенкой и полусферическим дном каверны.

Расширяющийся венец формирует группу отходящих кольцевых капиллярных волн, для визуализации которых необходимо изменить адаптированную для макросъемки методику опытов, как и в [11].

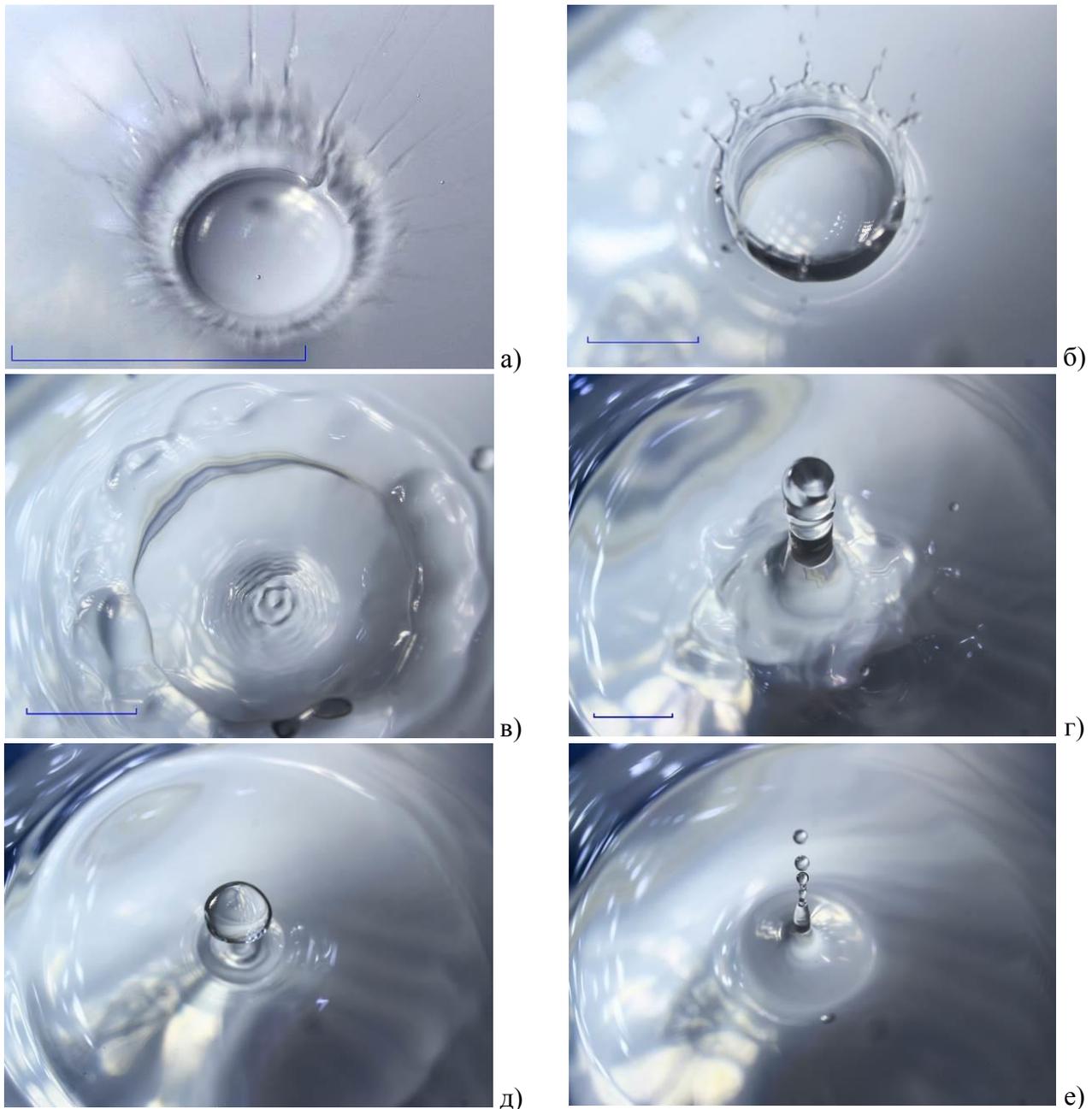


Рисунок 2 – Основные фазы процесса погружения капли чистой воды в воду ( $h_i = 7$  см,  $H = 80$  см,  $D = 0.42$  см): *а* – капля на дне каверны с венцом и стримерами, *б* – венец с зубчатым шевроном, *в* – каверна с капиллярными волнами, *г* – кумулятивная струя на пьедестале, *д* – вторичная капля, падающая в остаток каверны погружившейся кумулятивной струи, *е* – тонкая возвратная струйка (центральный стример). Длина метки на рис. 2, *а*, *б*, *в*, *г* составляет 1 см. Линия визирования составляет  $75^\circ$  к горизонту.

Постепенно под действием сил тяжести и поверхностного натяжения венец опадает. При этом диаметр каверны продолжает расти, поверхность ее стенки в верхней части выглаживается.

Форма каверны быстро эволюционирует: впадина в ее центре сменяется конической выпуклостью, поверхность которой по-

крыта семейством кольцевых капиллярных волн (рис. 2, *в*).

Фазовые поверхности волн неоднородны по угловой переменной. Внешняя поверхность венца также приобретает сложную форму, на остатках шеврона образуются локальные впадины, располагающиеся как на его внешней, так и на внутренней части.

Постепенно каверна расширяется и выглаживается, а конический выступ в ее центре трансформируется в толстую обратную (кумулятивную) струю. В струе выражен сферический оголовок, цилиндрическая часть (темная поверхность на рис. 2, *з*) и коническое основание. Здесь четко очерчена кольцевая линия диаметром 12.2 мм, отделяющая основание струи от ложбины – остатка каверны.

Цилиндрический участок кумулятивной струи имеет диаметр 5.58 мм. Над ним располагается отрывающийся сферический оголовок диаметром 7.16 мм.

Боковая поверхность конического основания струи покрыта "волоконными структурами" (например, в направлении на "3 часа"). Шероховатость поверхности указывает на сложность динамики мелкомаштабных течений жидкости.

Оптические свойства кольцевых неоднородностей на боковой поверхности струи, в том числе на границе между цилиндрической и конической частями и их продолжений в толщу жидкости, подобны плоским зеркальным поверхностям ("сколам").

Над ложбиной в направлении на "2 часа" видна ранее выброшенная с венца небольшая капелька, которая возвращается к поверхности жидкости.

Опадающая кумулятивная струя втягивается в толщу жидкости с образованием конической впадины, окруженной системой кольцевых капиллярных волн (рис. 2, *д*).

Большая капля диаметром 8.7 мм, возвращающаяся на взволнованную поверхность, порождает еще более сложное течение с выраженной вторичной впадиной, на границе которой образуются газовые полости. Отрыв газового пузыря сопровождается генерацией интенсивных акустических пакетов, свойства которых исследовались в [13, 28].

Схлопывающаяся вторичная каверна порождает тонкий центральный стример диаметром 2.1 мм, с вершины которого выбрасывается последовательность мелких капелек диаметрами 1.6, 1.95, 1.87 мм. Стример находится в центре кольцевой ложбины

с внешним кольцевым ребром. Расширяющееся ребро порождает еще одну центральную систему кольцевых капиллярных волн с замкнутыми фазовыми поверхностями (рис. 2, *е*).

В дальнейшем все возмущения плавно затухают, поверхность жидкости выравнивается, из области наблюдения убегают группы кольцевых капиллярных волн.

### **Капиллярные волны на поверхности погружающейся капли**

Фотографии тонких деталей картины течения в фазе погружения капли приведены на рис. 3. При падении капли воды в воду в стадии полупогружения отчетливо видна тонкая зубчатая пелена с стримерами на заднем плане, отдельные стримеры и летящие брызги в боковой части изображения, неровный растущий венец – на переднем плане. На поверхности капли видны два возмущения (на "4 и 7 часов" от центра изображения), вызванные попаданием мелких капелек (брызг).

Как показывает опыт [17, 27], траектории разлета брызг находятся в широком угловом диапазоне, который определяется свойствами жидкостей, динамикой движения контакта и угловым положением сливающихся поверхностей. Распределение поверхностных сил в области уничтожения свободных поверхностей зависят от отношения коэффициентов поверхностного натяжения контактирующих сред. Часть вылетающих брызг достигает поверхности погружающейся капли если значения относительного коэффициента поверхностного натяжения контактирующих сред  $R_{\sigma}$  меньше или равны нулю (рис. 3, *а*).

В процессе столкновения быстро летящей капельки с искривленной поверхностью погружающейся капли, формируется группа коротких капиллярных волн. Форма фронта волны, которая определяется величиной и направлением скорости капельки относительно принимающей поверхности, однозначно определяет направление траектории движения источника.

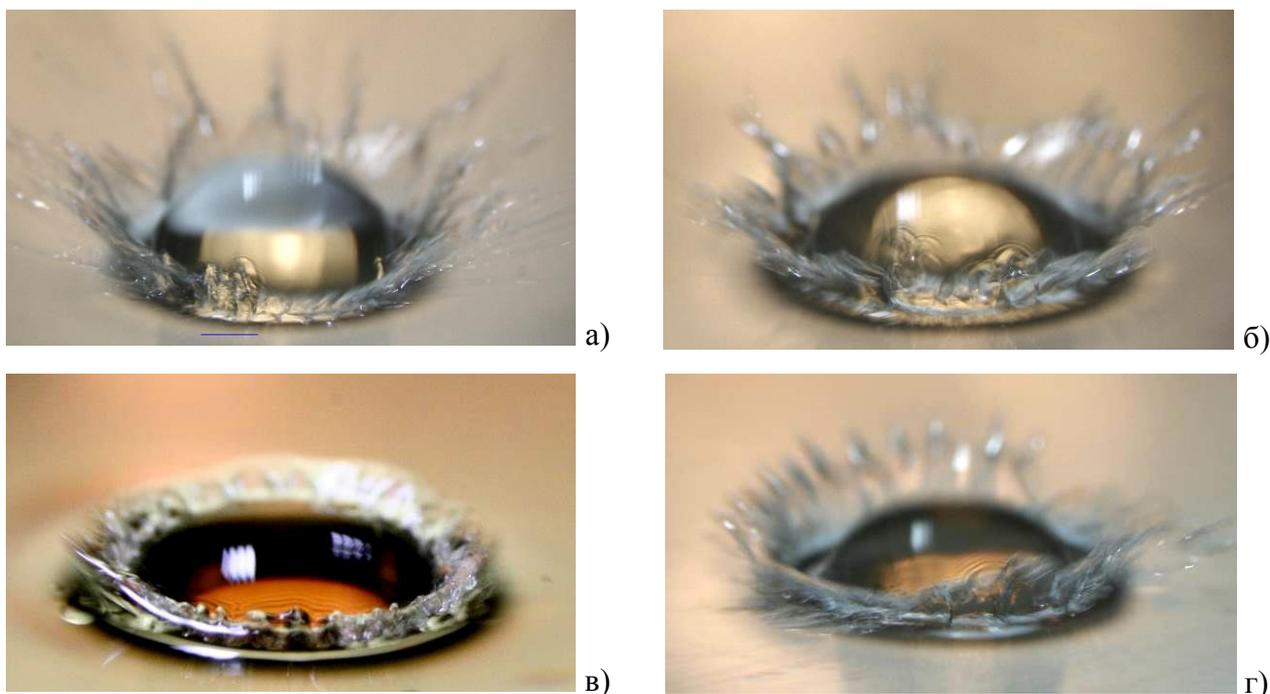


Рисунок 3 – Капиллярные волны на поверхности погружающейся капли ( $H = 48$  см,  $h_l = 4.5$  см): а) – пресной воды в воду ( $D = 0.42$  см,  $R_\sigma = 0$ ), б) – насыщенного водного раствора поваренной соли в воду ( $D = 0.46$  см,  $R_\sigma = -0.014$ ), в) – пресной воды в подсолнечное масло ( $D = 0.42$  см,  $R_\sigma = -0.38$ ), г) – пресной воды в чашку Петри с раствором этанола ( $h_l = 1.5$  см,  $R_\sigma = -0.46$ ). Линия визирования составляет  $25^\circ$  к горизонту.

Здесь в силу свойств дисперсионного уравнения капиллярных волн [29, 30] в картине течения выражены опережающие возмущения – дуги, которые располагаются перед источником (в отличие от гравитационных волн, которые отстают от источника).

При погружении капли насыщенного водного раствора соли (рис. 3, б, соленость 240‰,  $R_\sigma = -0.014$ ) образуется плотная пелена с зубчатым краем. На вершинах узлов пелены располагаются короткие стримеры. Основная часть стримеров наклонена наружу под углом  $30^\circ$  к поверхности, однако отдельные стримеры (здесь семь) ориентированы внутрь картины течения.

Именно брызги, которые срываются с вершин таких аномально изогнутых стримеров, попадают на поверхность погружающейся капли. Сложность волновой картины течения на поверхности капли указывает, что процесс попадания брызг растянут во времени и происходит в течение всего процесса ее слияния с принимающей жидкостью.

Первичные капиллярные волны распространяются по поверхности капли со скоростями 3-4 м/с, последующие – со скоростями 2.5-3 м/с (рис. 3 б). Стримеры солевой воды более толстые, чем пресной, искривленные, разлетаются в широком угловом диапазоне.

В картине течений при погружении капли воды в подсолнечное масло (рис 3, в,  $R_\sigma = -0.38$ ) отсутствуют окружающие каплю стримеры и брызги.

Капиллярные волны генерируются вдоль всей линии контакта погружающейся капли с принимающей жидкостью. Их длина, полученная из анализа распределения освещенность вдоль направления распространения волн, составляет от 0.008 до 0.012 см, а фазовые скорости, в соответствии с дисперсионным уравнением  $c = \sqrt{2\pi\gamma/\lambda}$  лежат в диапазоне 2 – 2.5 м/с.

На поверхности капли воды, погружающейся в водный раствор этанола (рис. 3, г;  $C = 40\%$ ,  $R_\sigma = -0.46$ ) также наблюдаются короткие капиллярные волны. Здесь картина

течений оказывается более простой: источники капиллярных волн редкие и находятся на большом расстоянии друг от друга, так что группы капиллярных волн почти не взаимодействуют между собой.

Длины капиллярных волн, представленных на рис. 3, *г*, находятся в диапазоне от 0.005 до 0.008 см, а фазовые скорости – от 2.4 до 3 м/с. Всплеск капли воды в этаноле характеризуется высокой плотностью стримеров (сравнимой с картиной всплеска капли воды в воде), широким диапазоном направлений вылета мелких брызг и стримеров.

Использование одинаковых жидкостей позволяет визуализировать тонкие детали геометрии течений – формы стримеров, траектории брызг, виды обратных струек.

Симметрия картины течения дает основания предполагать однородность характера распространения вещества капли по поверхности принимающей жидкости, что в неявной форме используется при разработке схем процесса (в [2, 31] представлены плоские сечения осесимметричного трехмерного течения).

### **Первичное распределения вещества капли в процессе слияния с принимающей жидкостью**

Сложный характер взаимодействия капли с принимающей жидкостью проявляется не только в картине ранее не наблюдаемых капиллярных волн от удара брызг на ее поверхности, но и в форме каверны (капля окрашена раствором чернил). Цилиндрическая форма каверны в верхней части и полусферическая в нижней искажена отдельными мелкими полусферическими выступами (один из которых диаметром 0.43 мм располагается на дне в центре каверны, а другой, диаметром 0.42 мм, сбоку справа, рис. 4, *а*).

В фазе погружения венца максимальный диаметр каверны составляет  $d = 11.7$  мм, глубина  $h = 6.8$  мм, цилиндрические стенки переходят в слабokonические (рис. 4, *б*). Одновременно растут и выступы, присутствующие на рис. 4, *а*.

Опускающиеся с венца капиллярные волны [16] деформируют стенки и дно ка-

верны (рис. 4, *в*), на контуре дна появляются вогнутые участки. Сохраняющие свою форму гребни медленно увеличиваются в размерах. На поздней стадии каверна принимает коническую форму с плоским дном (рис. 4, *г*). Мелкие выступы расплываются и трансформируются в тонкие окрашенные струйки.

Общие свойства пространственной картины распределения поступающего вещества по поверхности принимающей жидкости иллюстрируют выборки из видеogramмы процесса погружения капли воды, окрашенной синими чернилами, в чистую воду (рис. 5).

При первичном контакте из области соприкосновения окрашенной капли с водой вылетает тонкая кольцевая пелена, к внешней кромке которой примыкает семейство тонких радиальных струек (рис. 5, *а*). Рассмотрение при большем увеличении показывает, что некоторые струйки направлены в сторону погружающейся капли, вылетающие с их вершин брызги, формируют короткие капиллярные волны на ее поверхности.

В ходе погружения окрашенное вещество капли формирует на внутренней поверхности венца и растущей каверны сложный линейчатый многоярусный рисунок, основным элементом которого служат тонкие окрашенные волокна.

В верхней части растущего венца (рис. 5, *б*) волокна располагаются вертикально со средним шагом 0.1 см, существенно превышающем толщину волокна (0.04 см). Все волокна верхнего ряда имеют примерно одинаковую длину 0.47 см.

Краска из окрашенных волокон, достигающих вершин зубцов, частично попадает в вылетающие капельки. Некоторые окрашенные линии остаются в теле венца и переходят на его внешнюю поверхность.

В следующем, примыкающем к каверне ярусе, волокна расположены наклонно. Некоторые из них образуют простые геометрические фигуры (преимущественно треугольники и четырехугольники). Часть вертикальных волокон верхнего ряда контактируют с вершинами нижележащих треугольников. Высота второго яруса составляет 0.14 см.

По мере роста высоты стенок венца первый ряд параллельных полосок дополня-

ется новыми ярусами – вначале с треугольными фигурами, затем – кольцевым ободком, заполненным многоугольниками. Ранее зарегистрированное семейство вертикальных линий на верхнем слое венца, контактирует с вершинами треугольников подстилающего ряда (рис. 5, в). Под первым ярусом сетчатого орнамента располагается следую-

щий, меньшей высоты. Со временем число ярусов растет и, в зависимости от концентрации красителя в капле, дно каверны оказывается покрытым сплошным слоем краски, под которым прослеживаются более ярко окрашенные отрезки, образующие сетчатую структуру.

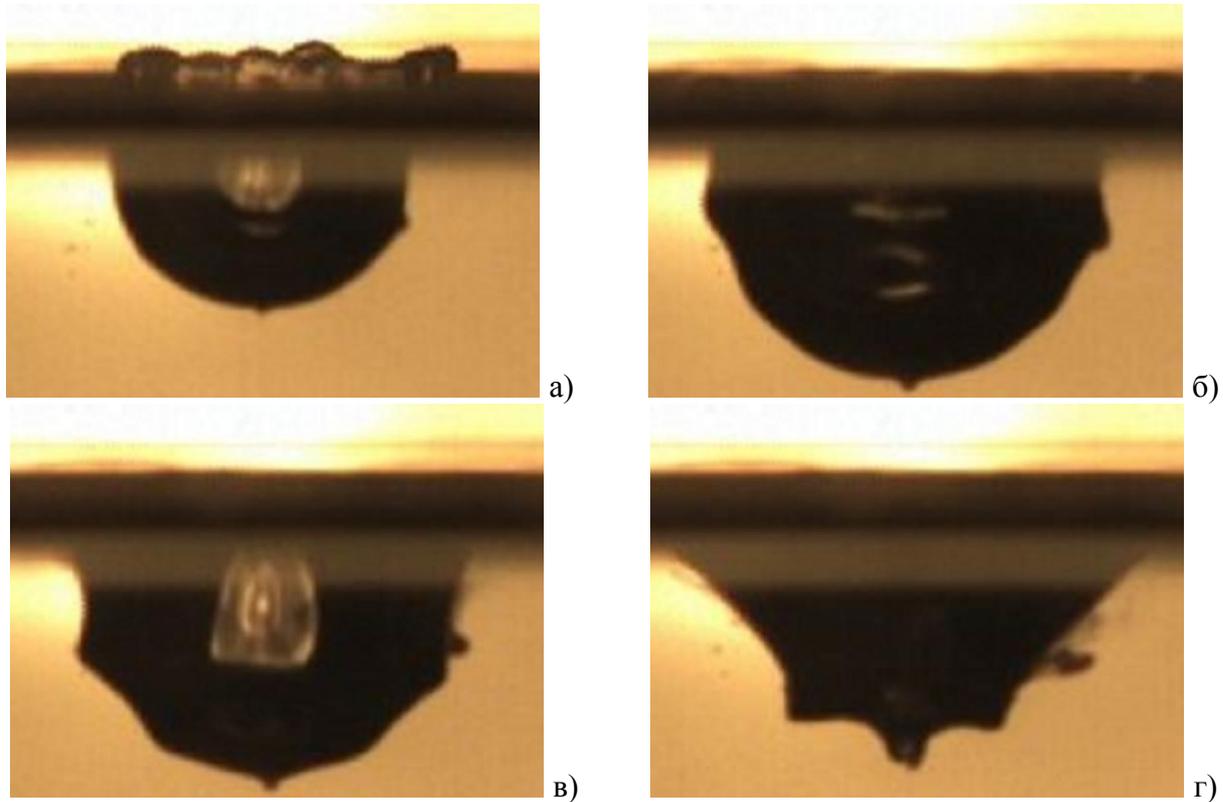


Рисунок 4 – Эволюция формы каверны, образующейся при падении капли водного раствора чернил в воду ( $h_l = 4.5$  см,  $H = 48$  см,  $D = 0.42$  см,  $U = 2.5$  м/с): а) –  $t = 0.0042$  с, глубина  $h = 4.8$  мм и диаметр  $d = 8.9$  мм каверны, б) –  $t = 0.013$  с,  $h = 6.8$  мм,  $d = 11.7$  мм, в) –  $t = 0.016$  с,  $h = 6.9$  мм,  $d = 12.1$  мм, г) –  $t = 0.021$  с,  $h = 6.4$  мм,  $d = 14.5$  мм. Линия визирования составляет  $0^\circ$  к горизонту.

В дальнейшем распределение красителя по стенкам каверны становится еще более сложным. На верхней кромке венца со сглаженными зубцами шеврона сохраняются глубоко окрашенные и чистые участки воды. Внутренняя поверхность каверны покрывается диффузным слоем красителя, в котором прослеживаются окрашенные волокна, образующие узоры из фигур с четко очерченными углами (рис. 5, з).

Высота верхних ярусов составляет 0.75 см. Среди заполняющих фигур представле-

ны треугольники (близкие к правильным и равнобедренным, длина сторон верхнего ряда – 3 мм, оснований – 3.3 мм), прямоугольники, четырехугольники (стороны 3.1 и 3.5 мм).

В дальнейшем исследовании основное внимание уделено регистрации линейчатых структур в верхнем слое венца, образующихся при погружении в жидкость капель различного состава.

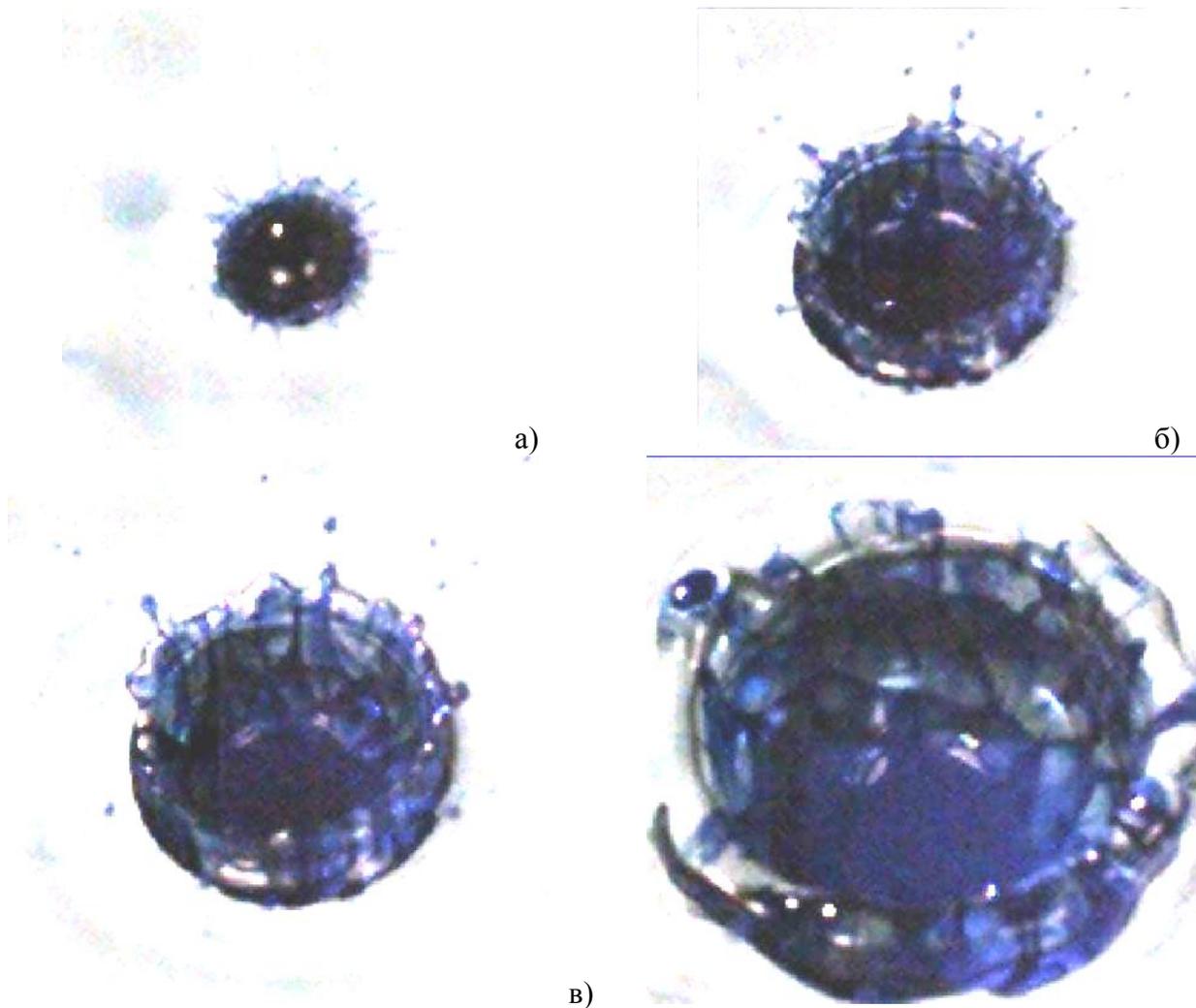


Рисунок 5 – Выборки из видеофильма, иллюстрирующие формирование линейчатых структур распределения вещества капли по поверхности каверны и венца ( $h_i = 21$  см,  $H = 40$  см,  $D = 0.42$  см): а – г) –  $t = 0.53, 2.47, 4.13, 18.7$ мс.

#### Линейчатый характер распределения вещества капли на стенках венца

Высокоразрешающая регистрация картины течения позволила надежно установить, что вещество капли распределяется по стенкам венца неравномерно и распространяется в форме тонких линейчатых элементов – волокон (в литературе также встречаются следующие синонимы: нити, филаменты, лигатуры, фибры).

Набор независимых фотографий, иллюстрирующих эволюцию типичной линейчатой картины начальной фазы распределения вещества при падении капли синих ализариновых чернил в воду приведен на рис. 6 (левый столбец I – полная фотография, правый II – вырезки с коэффициентом увеличения 4:1 для иллюстрации сверхтонких деталей элементов течения).

В данных опытах, условия которых соответствуют режиму формирования кумулятивной струи [12], капли диаметром  $D = 0.42$  см свободно падали с высоты  $H = 48$  см. Краска из капли распределяется по стенкам каверны и венца в форме тонких протяженных волокон, достигающих верхнюю кромку как на вершинах зубцов, так и на гладких впадинах (рис. 6 аI).

Рассмотрение с большим увеличением показывает, что отдельные окрашенные волокна могут как непосредственно подходить к зубцу шеврона, так и касаться поверхности венца на некотором расстоянии от него (рис. 6, а II). В таком случае краска поступает от линейчатых окрашенных волокон к зубцу шеврона с помощью тонких наклонных лигаментов. Непосредственно под зубцом

наблюдается разрыв фазовых поверхностей коротких капиллярных волн (рис. 6, а II).

Сравнительно большие расстояния между волокнами или окрашенными областями (в данном опыте составляют от 0.03 до 0,12 см), позволяют четко разрешить отдельные элементы и структуры в целом. Толщина отдельных окрашенных волокон в данном опыте не превышает 0.01 см.

В картине также встречаются области с близко расположенными волокнами, которые можно также идентифицировать как толстые неравномерно окрашенные полосы (поперечный размер которых на порядок превышает толщину нитей). В пространственном спектре яркости изображения венца на рис. 6, а I, выражены пики на масштабах 0.08, 0.11, 0.15, 0.19 см.

На шевроне венца, приведенном на рис. 6а выражены пять зубцов шириной от 0.04 до 0.08 см, расположенные на расстояниях от 0.09 до 0.5 см. С вершин зубцов отрываются сравнительно крупные вторичные капельки. Кромка шеврона окрашена неравномерно.

Окрашенная жидкость подтекает по вертикальным волокнам к кромке шеврона, где она накапливается и частично сбрасывается в вылетающие брызги, расположенные ярусами (рис. 6, б I).

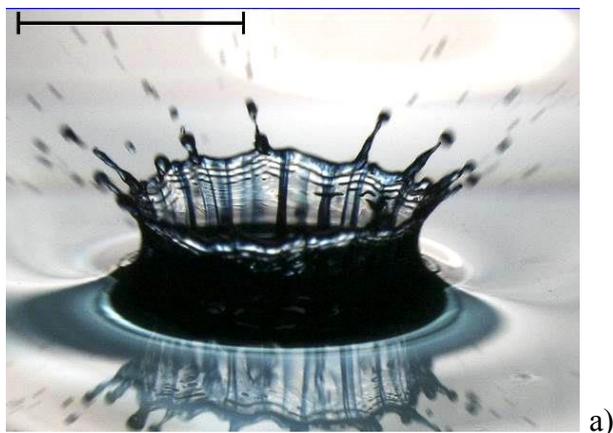
Со временем интенсивность окраски кромки шеврона повышается (правая колонка на рис. 6, а или б II). Отдельные тонкие нити расплываются под действием течений и молекулярной диффузии на стенках венца, образуя слабоокрашенные полосы и пятна.

На растущем венце (рис. 6, б) удается разрешить большее число окрашенных структур, общее количество которых на видимой части достигает двадцати (расстояния между волокнами лежат в диапазоне от 0.02 до 0.14 см).

Регистрируются и сверхтонкие волокна толщиной от 0.008 см, и размытые окрашенные области (толщиной порядка 0.05 см), а также выраженные толстые вертикальные полосы толщиной до 0.11 см. Волокна расположены по всей высоте венца. В пространственном спектре интенсивности освещенности на поверхности венца выделены пики на масштабах 0.07, 0.083, 0.13, 0.2 и 0.31 см, характеризующих расстояния между окрашенными волокнами.

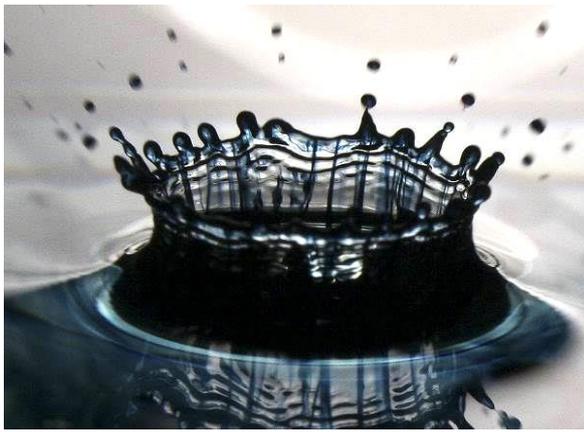
На шевроне видимой области венца 8 зубцов с шириной основания от 0.09 до 0.15 см располагаются на расстояниях от 0.13 до 0.44 см. В спектре сохраняются пики на масштабах 0.14, 0.2 и 0.3 см и наиболее выраженный – на 0.17 см.

На стенках венца наблюдаются сложные быстро эволюционирующие системы гравитационно-капиллярных волн, бегущих ко дну каверны. На первом кадре (рис. 6, а I) представлены группы волн длиной 0.33, 0.44, 0.33, 0.33, 0.31, 0.52 мм (отсчет от шеврона к каверне) с разрывом фазовых поверхностей под основанием шеврона. Длины капиллярных волн основной группы со временем монотонно растут, угловые точки контактов фазовых поверхностей сглаживаются (рис. 6, б, в, II). Капиллярные волны на рис. 6, б постепенно покрывают всю поверхность венца.

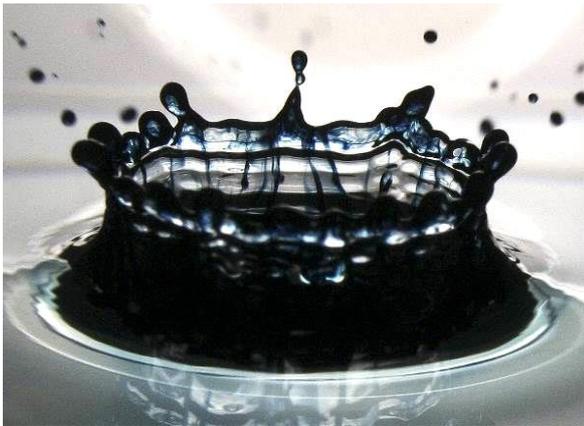


а)

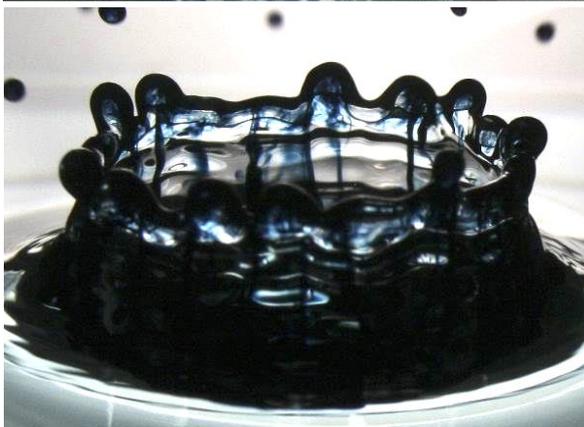




б)



в)



г)



Рисунок 6 – Эволюция течения с сохранением полосчатого распределения красителя (раствора ализариновых чернил с концентрацией 1:2) по поверхности венца в глубокой воде ( $h_f = 4.5$  см,  $H = 48$  см,  $D = 0.42$  см,  $U = 2.5$  м/с). Длина метрии на рис. 6а, левый столбец, составляет 1 см, правый столбец – 1 мм. Линия визирования составляет  $25^\circ$  к горизонту.

На видимом участке внутренней поверхности венца сохраняется небольшое число окрашенных полос (всего пять), расположенных на расстояниях от 0.17 до 0.46 см. (рис. 6, з,  $t = 4.13$  мс). В пространственном спектре изображения наблюдаются максимумы на масштабах 0.13, 0.17, 0.25 и 0.43 см.

По мере эволюции венца структура волновых полей продолжает усложняться и на фоне относительно крупных капиллярных волн (длиной 0.128 и 0.12 см) появляются

сверхкороткие волны длиной 0.012 и 0.016 см (рис. 6, з II, правая сторона). Ранее подобные волновые компоненты не визуализировались.

Также усложняется и структура распределения краски по поверхности шеврона. В картине течения наряду с остатками вертикальных волокон появляются горизонтальные кольца с шагом 0.15 см на рис. 6, в, з, возможно вызванные переносом краски с вершины шеврона бегущими к его основанию капиллярными волнами. Шаг структуры

приблизительно в четыре раза больше толщина окрашенного слоя (0.036 см). Под остатками зубца образуется сложная сетчатая структура с размерами ячеек от 0.015 до 0.025 см и толщиной волокон от 0.007 до 0.013 см.

Сравнение фотографий, приведенных на рис. 6 и 5 позволяет сделать вывод, что окрашенные стримеры и последовательности вылетающих с их вершин брызг служат продолжением линейчатых элементов структуры в расширяющейся пелене (рис. 5, *a*) и стенках венца (рис. 6, *a*). Дискретный характер расположения окрашенных волокон толщиной от 0.005 до 0.04 см сохраняется в течение всего времени существования венца.

Методика опытов позволила более детально проследить картину течений, вызванных падением капли молока, изучение которой получило большую популярность после работы [6], выполненной в стиле классических фотографий [5].

Набор фотографий, иллюстрирующий эволюцию картин течений, вызванных падением с высоты  $H = 45$  см каплей стандартного молока (жирность 3.2%) диаметром  $D = 0.37$  см в слабоокрашенную красными ализариновыми чернилами воду, приведен на рис. 7. Здесь остатки капли длительное время различимы на дне каверны (рис. 7, *a-z*).

Картина течения подобна в общих чертах приведенной на рис. 6, однако заметно отличается в тонких деталях. В начальной фазе погружения капли венец оказывается более тонким, чем при падении капли с краской, и раскрытым наружу. Зубцы шеврона на кромке венца также более тонкие, брызги мелкие (рис. 7, *a*). Так же, как и краска, молоко сосредоточено в тонких волокнах в теле венца. Однако встречаются области, окрашенные сравнительно равномерно (левая часть венца на рис. 7, *a*).

В целом полосы располагаются на поверхности венца нерегулярно, однако существуют области и с равномерным распределением волокон, окрашенных веществом капли (семь полос с правой стороны венца, рис. 7, *a*). Из них четыре расположены парно, а две состоят из двух неразрешенных полос каждая. Средняя толщина полос 0.018 см (в том числе и сдвоенных). Расстояние между парными полосами составляет 0.016 см, а расстояния между парами достигают 0.12 см. В пространственном спектре изображения выражены дискретные пики на масштабах 0.03, 0.08, 0.1 и 0.167 см.

Кромка венца здесь неровная и более изрезанная в правой части венца с полосчатым распределением молока. Здесь на шевроне венца находятся восемь стримеров, средняя толщина которых составляет 0.03 см. С заострений выступов вылетают тонкие брызги. Среднее расстояние между волокнами в группе составляет 0.06 см, при этом расстояние между группами составляет 0.47 см. В спектре масштабов имеются пики на длинах 0.051, 0.146, 0.26, 0.44 см.

По мере роста высоты венца степень изрезанности кромки увеличивается, число стримеров растет. Растет и число волокон, которые не прерываются на всей гладкой поверхности венца, за счет разбиения толстых прядей на тонкие волокна (рис. 7, *b*,  $t = 0.53$  мс). Здесь на венце насчитывается 17 полос, разбитых на группы, которые включают до четырех различных волокон, сливающихся к основанию венца. Встречаются также открашенные неструктурированные участки. Толщины волокон варьируются от 43 до 130 мкм, расстояния между ними сопоставимы с толщиной – от 32 до 100 мкм. Толщина полос и полосчатых структур варьируется от 100 до 260 мкм, а расстояния между ними – от 0.02 до 0.1 см. В пространственном спектре пики расположены на 0.07, 0.13 и 0.3 см.

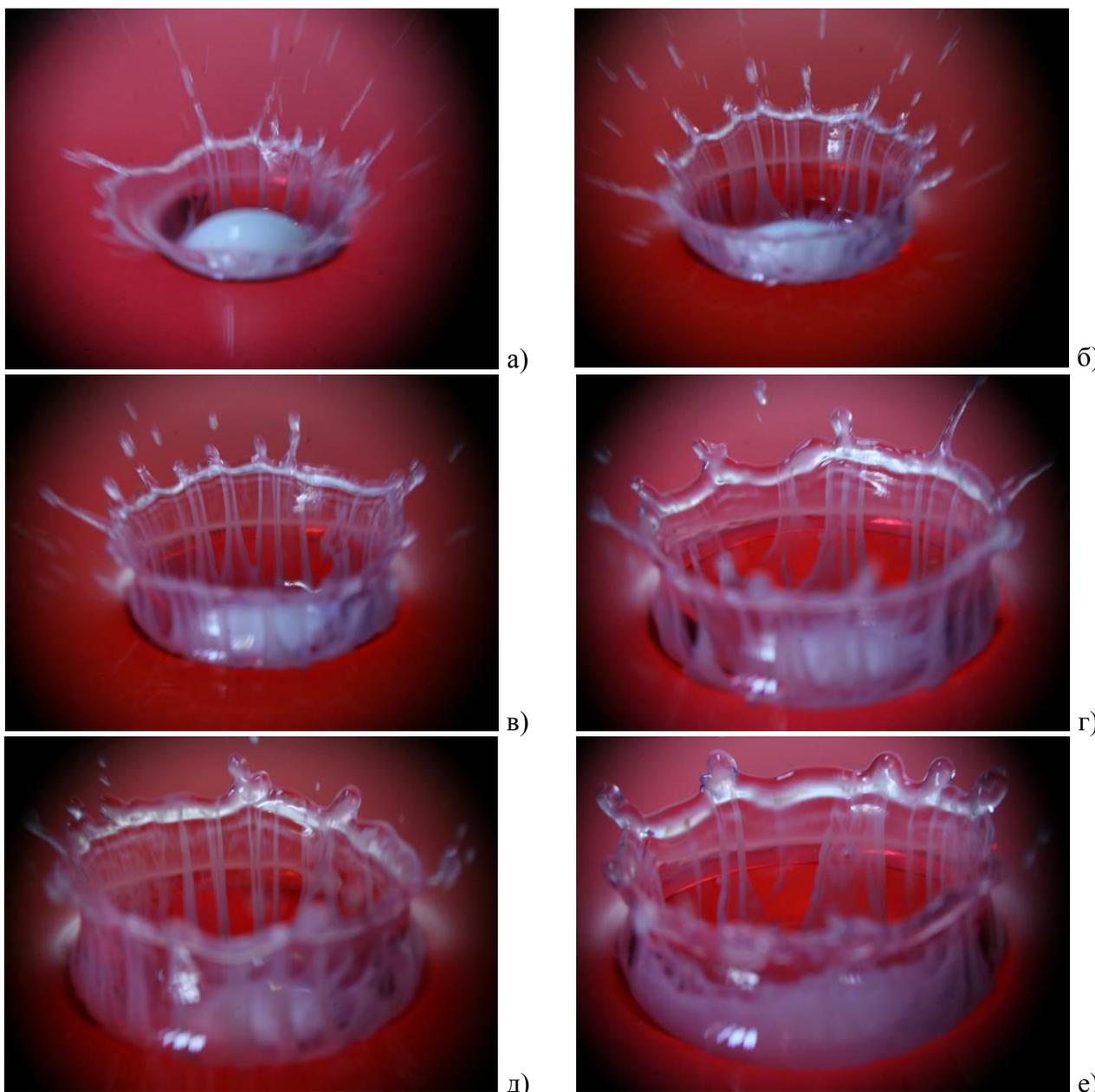


Рисунок 7 – Полосчатое распределение молока (3% жирности) по поверхности венца в подкрашенной воде ( $h_l = 1.5$  см,  $H = 45$  см,  $D = 0.37$  см,  $U = 2.5$  м/с): а – е) –  $t = 0.3, 0.53, 0.66, 1.5, 2.5, 3.1$  мс.

На шевроне венца располагаются восемь зубцов (с шириной основания от 0.04 до 0.06 см) на расстояниях от 0.03 до 0.14 см. На кромке венца появляются капиллярные волны. Наряду с крупными вторичными каплями, отделяющимися от выступов, с кромки венца вылетают тонкие брызги.

Наличие кольцевых групп брызг на различных расстояниях от кромки венца указывает на аксиальную однородность течения и цикличность процесса выброса брызг во времени.

Следующая группа равноудаленных капель большего размера присутствует на рис. 7, в,  $t = 0.66$  мс. Здесь на поверхности венца идентифицированы 11 полосчатых структур (включающих три пары), которые состоят из тонких волокон. Толщина отдельных волокон, расположенных на расстояниях от 0.007 до 0.13 см, лежит в диапазоне от 60 до 500 мкм. Одиночные или двойные волокна у края венца контактируют с зубцом, с вершины которого вылетают вторичные брызги (на рис. 7, в, выражены шесть

зубцов у задней стенки венца). Средняя ширина оснований зубцов составляет 0.05 см, их вершины располагаются на расстояниях от 0.07 до 0.16 см.

Окрашенные волокна сохраняют линейную форму, однако их толщина начинает медленно увеличиваться у дна каверны. Кромка венца постепенно наполняется молоком и становится все более отчетливо выраженной (рис. 7, *з*,  $t = 1.5$  мс). По мере повышения концентрации молока размеры зубцов шеврона увеличиваются, и его кромка отворачивается внутрь венца.

Вниз по венцу распространяется система коротких капиллярных волн, как и в [16]. Постепенно идет разрушение венца, сглаживаются выступы шеврона, увеличивается длина капиллярных волн на поверхности венца, которые вносят свой вклад в распределение интенсивности света при фотометрии.

На рис. 7, *з* выражены десять вертикальных полосчатых структур, причем шесть из них состоят из двух волокон. Толщины окрашенных полос варьируются от 0.01 до 0.035 см, а образующих их волокон – от 0.005 до 0.02 см. Расстояния между полосами изменяются от 0.015 до 0.23 см, а между тонкими волокнами – от 0.004 до 0.01 см. На шевроне венца остается всего три выступа средней шириной 0.1 см с расстояниями 0.3 см друг от друга.

На фотографии венца рис. 7, *д* ( $t = 2.5$  мс) имеется две области. В правой части имеется группа тонких близко расположенных волокон, в центральной части на задней стенке венца находятся более толстые полосы. Толщина отдельных волокон 0.018 см, расстояния между ними составляют от 0.008 до 0.037 см. Полосы имеют толщину от 0.01 до 0.037 см, расстояния между ними – от 0.008 до 0.2 см.

На последнем кадре при  $t = 3.1$  мс (рис. 7, *е*) картина течений практически сохраняется неизменной. Отмечены две области с полосчатыми структурами (по 3 полоски в каждой со средней толщиной 0.04 см).

Изменение углового положения линии визирования позволяет визуализировать сетчатые структуры из окрашенных молоком волокон на дне каверны, которые контактируют с линейчатыми структурами на боковых стенках каверны и венца (рис. 8). На стадии активного развития течения (рис. 8, *а*,  $t = 5$  мс) на дне каверны выражены два ряда многоугольников, включающих треугольные, четырехугольные и пятиугольные элементы.

На следующей фотографии (рис. 8, *б*,  $t = 10$  мс, новый опыт) регулярная сетчатая структура несколько нарушена. Размер отдельных ячеек здесь лежит в диапазоне от 0.3 до 1.3 мм. На больших временах вновь проявляется цикличность процессов: на дне каверны вновь прослеживается четыре кольцевых яруса структур. Толщина волокон составляет от 0.24 на нижнем и до 0.47 мм на верхнем ярусе, размеры ячеек – от 0.3 до 2 мм.

По мере развития течения контуры ячеек сглаживаются, угловые элементы становятся менее выраженными (рис. 8, *в*). На шевроне венца четко выражены отдельные тонкие волокна (особенно в левой нижней части изображения). Неровность внешней поверхности шеврона отражается в форме фазовых поверхностей капиллярных волн, состоящих из отдельных дужек. Фазовые поверхности ранее возникших волн состоят из отдельных кольцевых элементов (в верхней части изображения).

В фазе активного расплывания венца (рис. 8, *г*) сетчатая структура в целом сохраняется, хотя некоторые волокна внешнего яруса дна каверны успевают раствориться и не визуализируются в данной технике эксперимента. Однако и на данной стадии развития возмущений, отдельные волокна сохраняются и прослеживаются вплоть до кромки венца (в верхней части изображения). Неровная наружная поверхность венца окружена системой капиллярных волн, формы гребней которых повторяют контуры линии контакта венца с принимающей жидкостью.

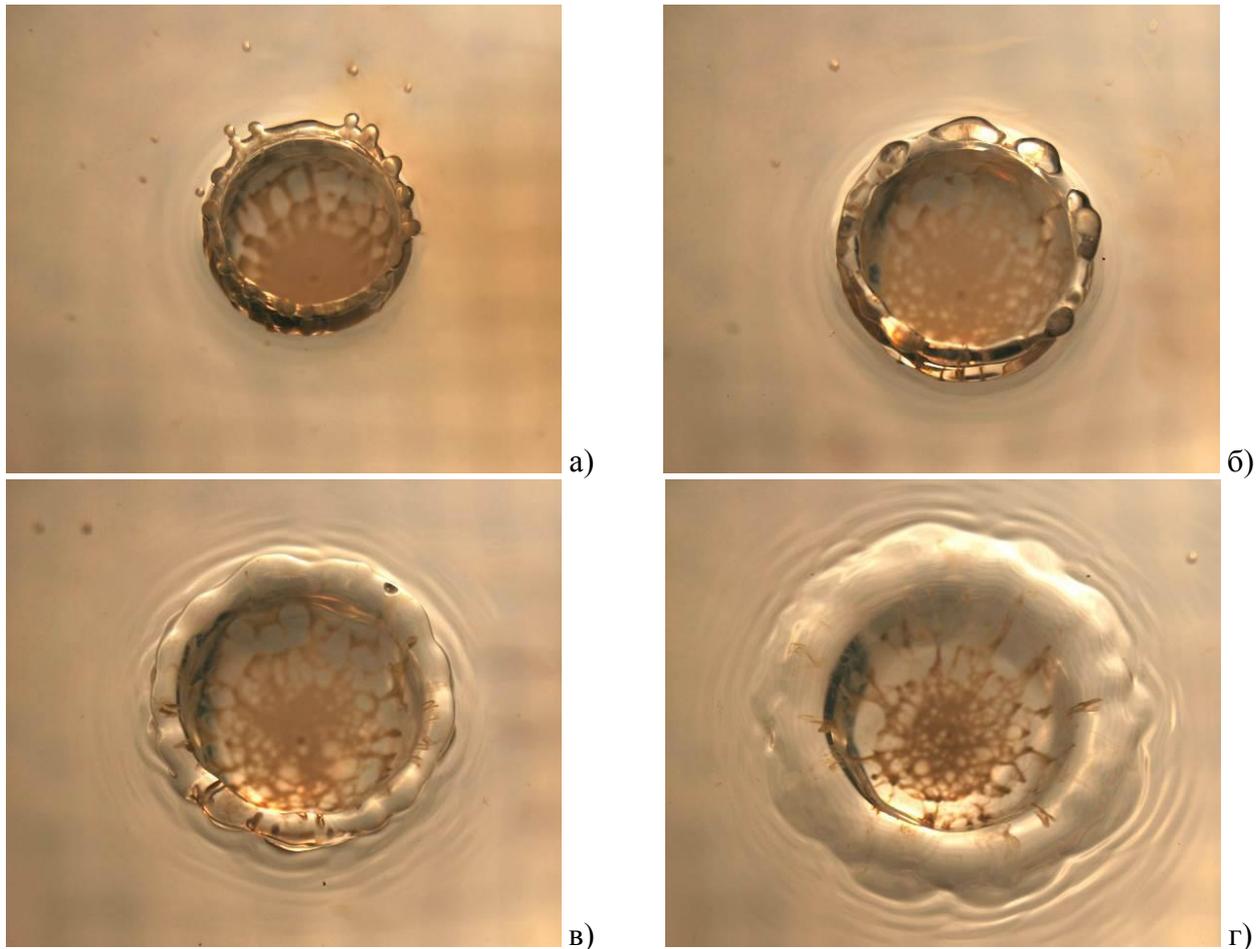


Рисунок 8 – Сетчатые структуры в распределении молока по дну каверны в воде ( $h_1 = 15$  см,  $H = 47$  см,  $D = 0.41$  см):  $a - z) - t = 5, 10, 18, 28$  мс.

**Картины распределения вещества капель, не смешивающихся с принимающей жидкостью**

Опыты выполнены с каплями нефти и окрашенного подсолнечного масла. Картины распределения несмешивающихся жидкостей по стенкам каверны и венца, оказываются более однородными, чем в случае смешивающихся сред. Однако и в этом случае тонкие детали изображения также зависят от значений относительных коэффициентов, характеризующих контактирующие среды (табл. 5) и состояние водной поверхности.

В одной серии опытов, результаты которых представлены в левой колонке, поверхность воды, которая обновлялась перед каждым опытом, была чистой.

В другой серии (правая колонка) поверхность принимающей жидкости перед каждым опытом запылялась лабораторной

пылью, сброшенной с бумажной салфетки. Случайная наброска частиц пыли постепенно перестраивалась. Пыль собиралась в тонкие волокна, образующие сложный нерегулярный узор на свободной поверхности.

При попадании капли нефти на чистую поверхность воды из области контакта вылетает двухслойная пелена, верхняя часть которой образована нефтью, нижняя – водой. Пелена окрашена неравномерно, однако ее внешняя кромка (светлая линия) достаточно однородна (рис. 9, а, левая колонка).

Неравномерность распределения нефти более выражена при столкновении капли с запыленной поверхностью (рис. 9, а, правая колонка). Внешняя кромка развитого венца покрыта семейством сглаженных выступов, с некоторых вершин которых выбрасываются мелкие капельки – брызги.

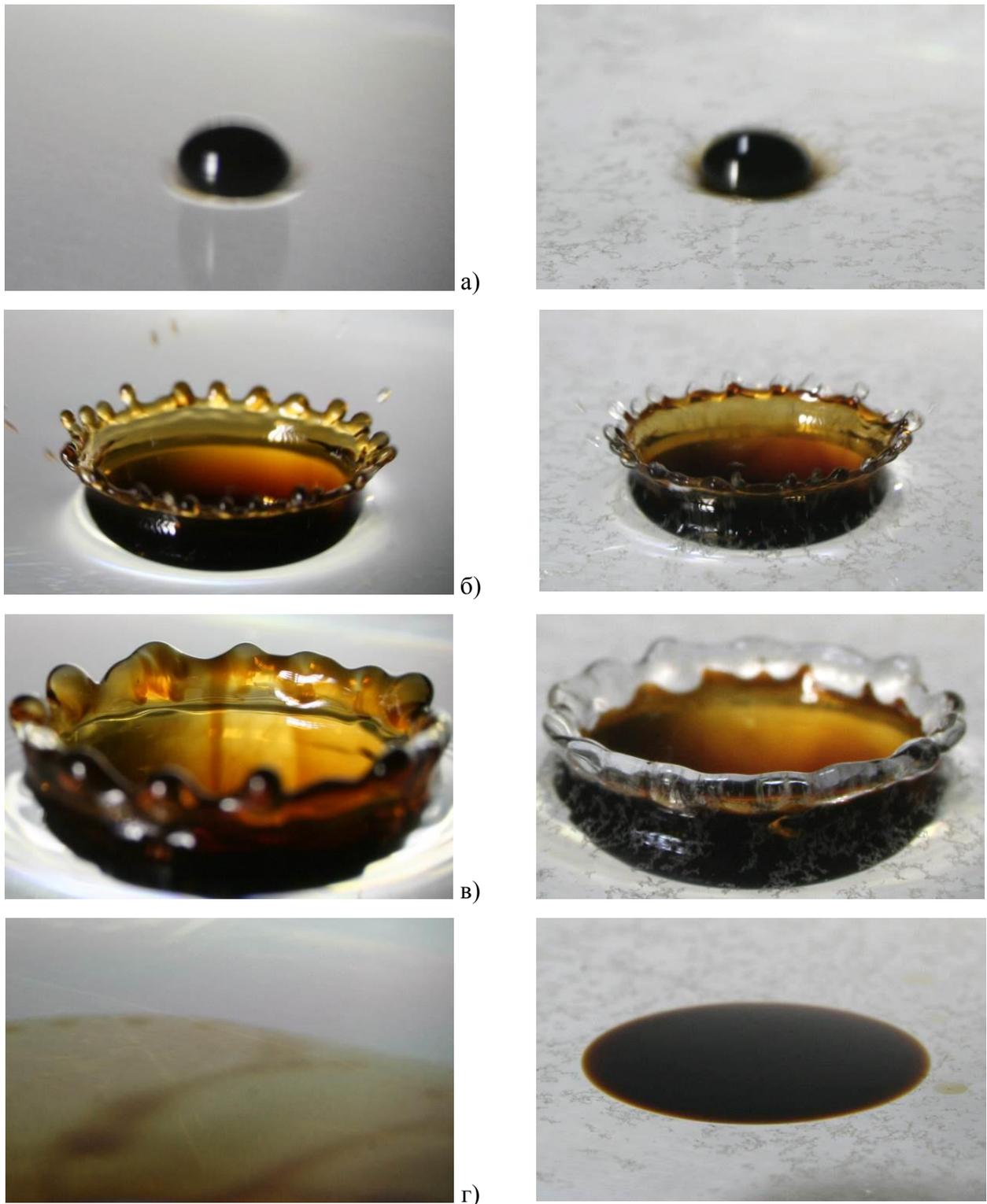


Рисунок 9 – Эволюция картины течения при погружении капли нефти ( $h_1 = 1.5$  см,  $H = 45$  см,  $D = 0.31$  см), падающей в чистую воду – правая колонка, и в воду с запыленной поверхностью: а) – первичный контакт, б) – развитый венец, в) – спадающий венец, г) – остаток нефти на поверхности.

Рассмотрение увеличенного изображения показывает, что середина вылетающих капелек заполнена водой, а нефть располагается в оболочке – (одиночная капли в угловом положении на "2 часа", последователь-

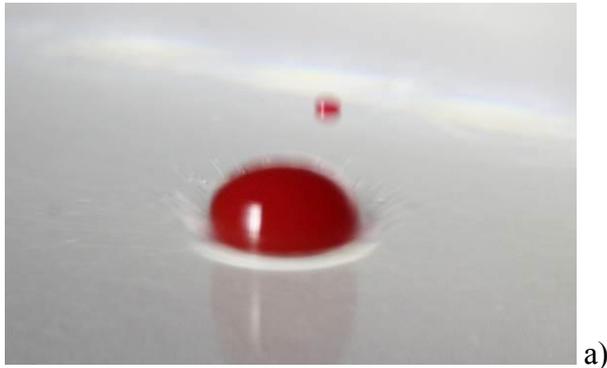
ность из двух капель – на "9 часов", рис. 9, б, левая колонка). Плотный цвет окраски венца и дна каверны свидетельствует о равномерном распределении нефти по поверхности.

По поверхности венца сбегает капиллярные волны.

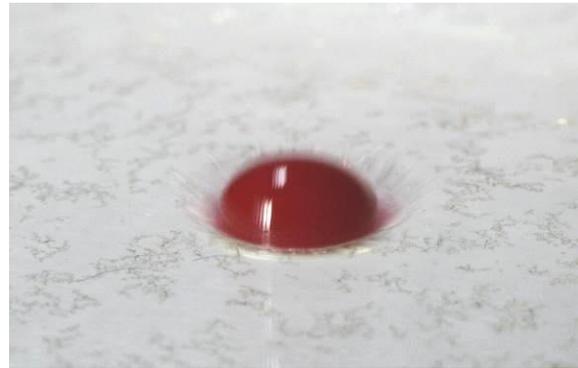
Вершины зубьев венца, образовавшегося при падении капли нефти на запыленную поверхность, как и вылетающие брызги (на "3 и 9 часов") – прозрачные, т.е. если они и покрыты нефтью, то очень тонкой пленкой (рис. 9, б, правая колонка). Окраска венца и

боковой стороны каверны здесь неоднородная, на ней выражены отдельные волокна.

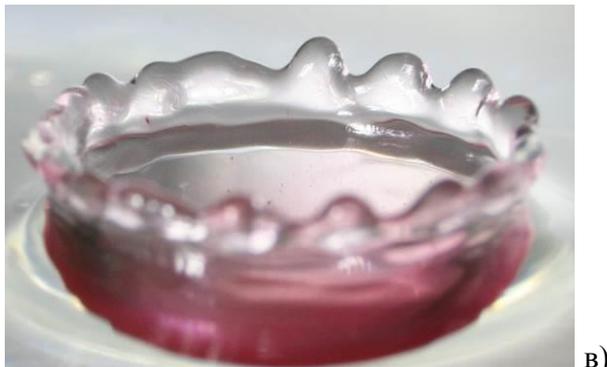
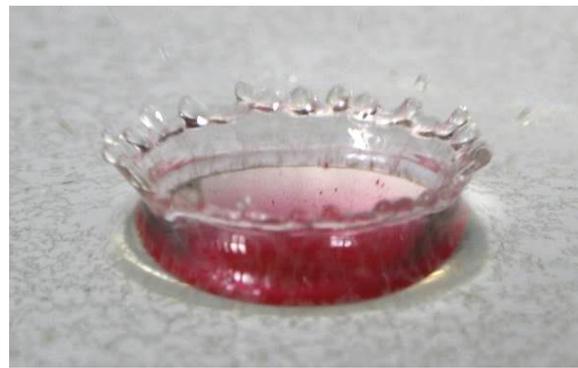
Внешняя сторона венца состоит из воды, о чем свидетельствуют искажения формы пылевых волокон, подходящих к его поверхности. От наружной стороны венца начинает отходить первая капиллярная волна.



а)



б)



в)

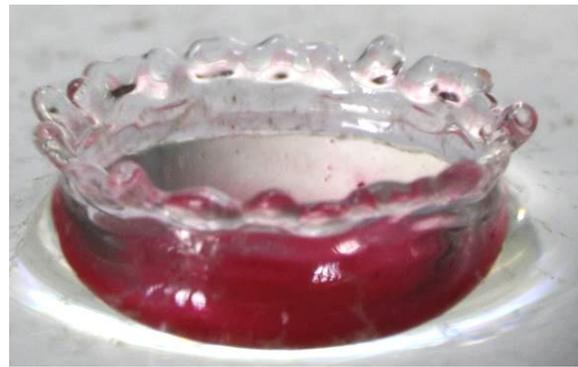


Рисунок 10 – Эволюция картины течения при падении капли окрашенного растительного масла: правая колонка – в чистую воду, левая колонка – в воду с запыленной поверхностью ( $h_l = 1.5$  см,  $H = 45$  см,  $D = 0.32$  см).

На спадающем венце от капли нефти, упавшей на чистую поверхность воды ( $R_p = 0.07$ ,  $R_\sigma = 0.42$ ,  $R_\mu = -0.75$ ), видны более темно окрашенные полосы и пятна, преимущественно вертикальные на стенках каверны и сложно ориентированные на шев-

роне. На границе шеврона и венца выражена группа коротких кольцевых капиллярных волн  $\lambda = 0.1, 0.07, 0.05$  мм (рис. 9, в, левая колонка). Длина волн измерялась по направлению к краю шеврона.

Поверхность расплывающегося шеврона венца на запыленной жидкости остается прозрачной (рис. 9, в, правая колонка). На передней поверхности шеврона прослеживаются линейчатые пылевые структуры, разделенные полосами чистой воды.

Боковая поверхность каверны остается окрашенной однородно, верхний край нефтяной пленки воспроизводит зубчатую топографию шеврона, однако заострения располагаются в центре впадин.

На больших временах нефть неограниченно растекается по поверхности чистой воды (рис. 9, г, левая колонка).

На запыленной поверхности воды остаток капли нефти длительное время сохраняется в форме компактного круглого пятна (рис. 9, г, правая колонка). Иногда в центре нефтяного пятна длительное время сохраняется газовый пузырек.

При сохранении общей геометрии течения картина растекания капли масла по поверхности воды ( $R_p = 0.042$ ,  $R_c = 0.38$ ,  $R_\mu = -0.96$ ) характеризуется собственными структурными особенностями (рис. 10). Здесь, как и при падении нефти, образуется кольцевая наклонная пелена, толщина которой регулярно меняется в аксиальном направлении.

На фоне плоской пелены с гладким наружным краем наблюдается регулярная последовательность утолщенных "пальцев" диаметром 0.1 мм, расположенных с шагом 0.6 мм на тыльной стороне течения (рис. 10, а, левая колонка). Над погружающейся каплей видна более мелкая вторичная капля, образовавшаяся из перемычки при отрыве основной капли.

Тонко структурированная пелена на запыленной поверхности имеет неоднородную толщину по всей поверхности и неровный внешний край (рис. 10, а, правая колонка).

С зубцов растущего венца исторгаются отдельные капли (рис. 10, б, левая колонка, на "10 часов"). Окраска изображения указывает на распределение масла по всей поверхности венца и шеврона.

Верхняя часть зубцов шеврона на запыленной поверхности практически не окрашена маслом, как и вылетающие брызги

(рис. 10, б, правая колонка). Остатки пылевых линейчатых структур здесь прослеживаются по всей поверхности венца.

Линия перехода венца в каверну (темное кольцо на рис. 10, б, правая сторона) здесь более выражена, чем в случае масла, падающего на чистую поверхность. Еще одна вышележащая эквидистантная линия – гребень опускающейся по поверхности венца капиллярной волны.

Капиллярные волны и тонкие структуры отчетливо выражены в фазе расплывания венца (рис. 10, в, левая сторона) и на чистой, и на запыленной поверхности (рис. 10, в, правая сторона), где повышенная концентрация масла четко визуализирует гребни капиллярных волн.

**Обсуждение результатов.** В проведенных опытах впервые систематически визуализирована сложная пространственная структура картины распределения вещества окрашенной капли по поверхности каверны и венца в принимающей жидкости.

Приводимые картины течения показывают, что на фоне непрерывной поверхности каверны, сплошного венца вещество капли распределяется неравномерно и образует характерные линейчатые структуры. Первоначально волокна располагаются в тонком слое параллельно локальной контактной поверхности жидкость-воздух.

Характер распределения красителя в толще венца нуждается в дополнительном изучении – имеют ли место продолжения наблюдаемых линейчатых структур в толщу жидкости или структуры на внутренней и внешней поверхности венца формируются независимо.

Линейчатые структуры наблюдаются на нескольких начальных фазах процесса слияния капли водного раствора краски или молока – при первичном контакте, на растущей каверне и венце, а также на заполняющейся каверне и погружающемся венце.

В фазе формирования верхний ярус структуры образован вертикальными волокнами. К нему примыкает один или несколько ярусов, разделенных горизонтальной границей, которые заполнены многоугольниками (трех-, четырех- и пятиугольниками). На дне каверны краситель собирается в сетку, также

составленную из многоугольников. Из области слияния в толщу окружающей среды проникают отдельные тонкие струи, подобные наблюдавшимся в [16].

На ранней стадии формирования каверны и венца краситель капли оказывается распределенной по всей поверхности каверны, форма которой возмущается отдельными струйками, проникающими из боковой поверхности каверны в толщу жидкости. По мере эволюции течения окрашенные петли поворачиваются и толщина слоя, содержащего краску, увеличивается. Геометрия переноса вещества в этой стадии требует дополнительного детального изучения.

Образование линейчатых структур в стадии формирования каверны и венца объясняется действием больших флуктуаций давления в сравнительно малых по объему областях уничтожения свободной поверхности сливающихся жидкостей.

В традиционной гидродинамике поверхностное натяжение учитывается в граничном условии на поверхности, разделяющей жидкость и газ [19]. Разность давления по разные стороны изогнутой контактной поверхности определяется по формуле Лапласа  $(P_w - P_a) = (\sigma / R_m)$ , где  $R_m$  – средний радиус кривизны  $R_m^{-1} = R_1^{-1} + R_2^{-1}$ . Здесь размерность коэффициента  $[\sigma]$  – Н/м в системе СИ или дин/см ( $\text{г}/\text{с}^2$ ) в системе CGS эквивалентна традиционной энергетической размерности  $[\sigma] = \text{эрг}/\text{см}^2$ .

В толще каждая из контактирующих сред 1 и 2 характеризуется собственным термодинамическим потенциалом, например, свободной энтальпией  $dg^1$  и  $dg^2$  (потенциалом Гиббса)  $dg = -sdT + VdP$ , где  $s$  – энтропия,  $V = 1/\rho$  – удельный объем,  $T, P$  – температура и давление, или другими термодинамическими величинами (внутренней энергией, энтальпией или свободной энергией).

Современный вывод формулы Лапласа основывается на идее Гиббса, который ввел понятие "тонкой разделяющей поверхности" на контактной границе жидкость-газ и принимал реальный поверхностный слой жидкости за новую поверхностную фазу, отли-

чающуюся от объемной фазы жидкости наличием дополнительного члена в выражении для термодинамического потенциала  $dg_b = \sigma dS_b$  в одной из сред [32].

При деформации границы с изменением площади контактной поверхности  $dS_b$  совершается работа  $dA = \sigma dS_b$  [19]. При этом в потенциал Гиббса для поверхностного слоя вводится дополнительное положительное слагаемое  $dg_s = -sdT + VdP + \sigma dS_b$  [32].

Одинаковые размерности коэффициента  $[\sigma] = \text{г}/\text{с}^2$ , входящего в независимые силовые и энергетические определения, указывают на двойственность природы поверхностного натяжения, обеспечивающего и поверхностное давление на границах капельных жидкостей с другими жидкостями или газами, и дополнительную энергию  $dg_b = \sigma dS_b$ , входящую в потенциал Гиббса и другие термодинамические потенциалы.

Доля энергии, зависящая от положения атомов и молекул в системе жидкость-газ, относится к группе потенциальных энергий, которые могут трансформироваться в энергию других видов при уничтожении свободной поверхности – тепловую, механическую работу по созданию свободной поверхности или энергию трансляционного движения вещества [33]. Плотность потенциальной поверхностной энергии для воды составляет  $0.072 \text{ Дж}/\text{м}^2$  при значении коэффициента поверхностного натяжения  $0.072 \text{ Н}/\text{м}$ .

В современной физико-химической гидродинамике методами оптической и рентгеновской рефлекто- и рефрактометрии, спектроскопии и рассеяния, атомно-силовой микроскопии установлено, что плотность, диэлектрическая проницаемость, дипольный момент различаются в толще жидкости и в структурно выделенном слое толщиной порядка 250 нанометров на границе жидкости с газом или твердым телом [34]. Толщина физически выделенного слоя порядка размера молекулярного кластера  $\delta_s = 250 \text{ нм}$  [26, 35]. Схематическое изображение распределения свободной энтальпии в капле и принимающей жидкости показана на рис. 11.

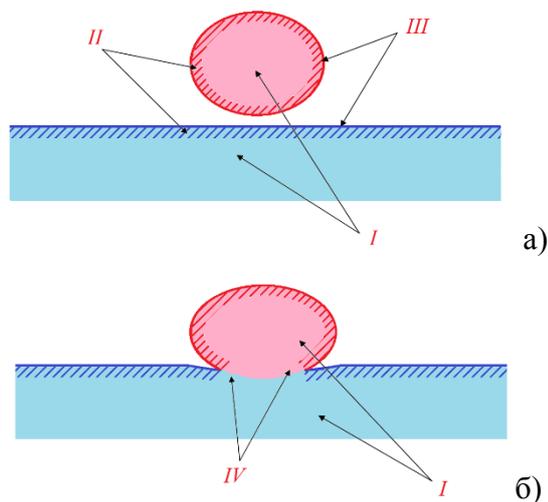


Рис. 11. Схема распределения термодинамических потенциалов: *I* – толщина жидкости; *II* – приповерхностный слой толщиной в молекулярный кластер, *III* – граница раздела – поверхность молекулярного контакта жидкости с газовой фазой; *IV* – двухслойная среда, область соприкосновения приповерхностных слоев, в которой доступная поверхностная потенциальная энергия трансформировалась во внутреннюю энергию и энергию интенсивных тонких течений: *а*) – полет капли; *б*) – начало процесса слияния.

В толще жидкости потенциал Гиббса равен  $dg = -sdT + VdP$ . В заштрихованном приповерхностном слое толщиной порядка молекулярного кластера в выражении для свободной энтальпии появляется дополнительное слагаемое  $dg_s = -sdT + VdP + \sigma dS_b$ .

Еще большие изменения происходят в области границы жидкость – газ (окрашена в розовый цвет), где среда может распадаться на ионные кластеры. Здесь в выражении для термодинамического потенциала  $dg_s = -sdT + VdP + \sigma dS_b + \mu_n dN_n$  появляется дополнительный член, зависящий от химического потенциала и концентрации соответствующих компонент  $\mu_n dN_n$  [36, 37]. При слиянии жидкостей вначале происходит уничтожение собственно поверхностного слоя за время  $\Delta t \sim 10^{-10}$  с. За более длительный промежуток времени  $\Delta t = \delta_s / U \sim 10^{-7}$  с происходит уничтожение приповерхностных слоев, размытие свободной поверхности и

преобразование доступной потенциальной поверхностной энергии ( $dg_s = \sigma dS_s + \mu_n dN_n$ ) в другие формы энергии, сопровождающейся повышением температуры и давления в области слияния.

Первоначально преобразование энергии идет в пятне контакта деформированных поверхностей капли и принимающей жидкости. Реальный размер площади соприкасающихся поверхностей определяет величину освобождающейся энергии.

Далее слияние оболочек происходит в кольцевой области на дне формирующейся каверны. Область контакта жидкостей движется к стенкам каверны при погружении нижней половины капли, и наоборот, внутрь каверны, удаляясь от стенок, при слиянии верхней половины капли. Быстро передаваемая большая энергия предопределяет геометрию течения, при котором вещество капли распространяется только в тонком приповерхностном слое.

Зона контакта жидкости на границе погружающейся капли имеет сложную структуру. Энергия и импульс в области слияния сред, в основном, распределены непрерывно. Их совместное действие создает гладкую форму растущей каверны и восходящего венца.

Вещество, молекулярный перенос которого определяется коэффициентом диффузии, имеющим наименьшее значение среди всех кинетических коэффициентов изучаемого процесса, распределяется неравномерно.

Как следствие, стримеры, которые образуются на шевроне венца, служат продолжением полосчатых структур, примыкающих к зубцам шеврона. Длительное действие ускоряющего течения механизма уничтожения свободной поверхности предопределяет геометрию поступления вещества капли в растущий венец, а также обеспечивает продолжительность процесса удлинения стримеров и исторжения мелких капелек с их вершин.

Размер вылетающих капелек со временем растет. Зональная структура капельных облаков указывает на существование радикальных периодических движений, почти однородных по азимутальной переменной.

Из приведенного анализа следует, что полная система уравнений, описывающих динамику погружения капли и течения жидкостей, должна включать уравнения состояния сред (например, для плотности и потенциала Гиббса с учетом свойств приповерхностных слоев), неразрывности, переноса импульса (Навье-Стокса), полной энергии (Фурье) и вещества.

$$\rho = \rho(T, P, S_i) = \sum \rho(i)$$

$$dG = -s dT + V dP$$

$$dG = -s dT + V dP + \sigma dS_d + \mu_i dn_i$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial p_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial p_i}{\partial t} + \frac{\partial \Pi_{\alpha i}}{\partial x_\alpha} = \rho f_i + Q_i$$

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} + \text{div} \left( e \mathbf{p} + \mathbf{J}^{(e)} \right) = Q^{(e)}$$

$$\frac{\partial \rho S_i}{\partial t} + \text{div} \left( \rho S \mathbf{v} + \mathbf{J}^{(S)} \right) = Q^{(S)}$$

$$\frac{\partial \rho s}{\partial t} + \text{div} \left( \rho s \mathbf{v} + \mathbf{J}^{(s)} \right) = P^{(s)}$$

где  $S_i$  – концентрация  $i$ -ой примеси,  $\rho(i)$  – плотность  $i$ -ой компоненты,  $p_i = \rho v_i$  – импульс течения,  $e$  – внутренняя энергия,  $s$  – энтропия,  $\mathbf{J}^{(e)}$ ,  $\mathbf{J}^{(S)}$ ,  $\mathbf{J}^{(s)}$ , – плотности потоков энергии, вещества и энтропии,  $Q_i$ ,  $Q^{(e)}$ ,  $Q^{(S)}$ ,  $P^{(s)}$  – плотности источников импульса, энергии, вещества и скорости производства энтропии, действующих в толще и на границах контактирующих сред. Конкретные выражения для потоков и источников должны находиться с учетом состава взаимодействующих сред, начальных и граничных условий задачи. При этом может наблюдаться существенное различие длительностей прямых и обратных процессов перехода энергии и импульса. Механическая энергия может передаваться в доступную потенциальную энергию достаточно медленно с характерным временем  $\Delta t_M \sim D/U$  макроскопических процессов. Характерное время обратного преобразования, которое происходит, например, при уничтожении свободных поверхностей,

определяется атомно-молекулярными процессами и является существенно более коротким.

Большие возмущения давления формируют быстрые течения в зоне растекания жидкости капли, группы капиллярных волн различной геометрии и акустические волны. Процессы уничтожения свободной поверхности при отрыве пузырей в толще жидкости приводят к резонансному излучению звуковых пакетов, которые при падении капель наблюдаются в обеих контактирующих средах – в газовой, и в жидкой [13].

### Заключение

Применение высокоразрешающей фототехники впервые позволило визуализировать сложную пространственную структуру течений, возникающих при падении капли в глубокую жидкость и идентифицировать ранее неизученные компоненты сложных процессов.

В опытах впервые замечено:

- попадание брызг, вылетающих с зубцов шеврона на поверхность погружающейся капли,
- зональный характер облаков брызг, указывающий на периодичность процесса их исторжения,
- сложная геометрия каверны, поверхность которой пробивают отдельные тонкие струйки, вторгающиеся в принимающую жидкость,
- линейчатый характер распределения вещества окрашенной капли по поверхности каверны и венца,
- сетчатая структура картины распределения окрашенного вещества капли по дну каверны,
- возбуждение обширного семейства капиллярных волн, образующихся на различных этапах течений,
- сильное влияние состояния поверхности жидкости (чистая или запыленная) на динамику переноса несмешивающихся жидкостей.

Впервые наблюдаемые особенности течения обусловлены процессами быстрого преобразования доступной потенциальной поверхностной энергии, существование которой обусловлено анизотропным действием атомно-молекулярных сил вблизи свободной

поверхности, в энергию механического движения, дополняющую общеизвестную кинетическую энергию капли.

Научный и практический интерес представляет изучение дальнейшей эволюции тонкой сложной структуры течений, вызванных падением капли на гладкую или взволнованную поверхность покоящейся или движущейся принимающей жидкости.

Работа выполнена на стенде ТБП УСУ "ГФК ИПМех РАН" при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект 15-01-09235) и Российской Академии наук (проект IV-4-12 ОЭММПУ РАН).

### **Список литературы:**

1. Rogers V.B. On the formation of rotating rings by air and liquids under certain condition of discharge // *Am. J. Sci. Arts. Second Series*. 1858. V. 26. P. 246-258.
2. Lee J.S., Park S.J., Lee J.H. Weon B.M., Fezzaa K., Je H.J. Origin and dynamics of vortex rings in drop splashing // *Nat. Commun.* 2015. V. 6. 8187.
3. Thompson D. W. On Growth and Form. 1992. Dover reprint of 1942. 2nd ed. (1st ed., 1917).
4. Thomson J.J., Newall H.F. On the formation of vortex rings by drops falling into liquids, and some allied phenomena // *Proc. R. Soc. London*. 1885. V. 29. P. 417-436.
5. Worthington A.M. The splash of the drop. Series "The romance of science" Published by Society for Promoting Christian Knowledge: N. Y.- London: E. & J.B. Young & Co. 1895.
6. Edgerton H.E., Killian J.R. Flash. Boston: Blanford, 1939.
7. Thoroddsen S. T., Etoh T. G., Takehara K. High-Speed Imaging of Drops and Bubbles // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2008. V. 40. P. 257-285.
8. Thoroddsen S. T. The ejecta sheet generated by the impact of a drop // *J. Fluid Mech.* 2002. V. 451. P. 373-381.
9. Engel O.G. Crater Depth in Fluid Impacts // *J. Applied Physics*. 1996. V. 37. №4, P. 1798 - 1808.
10. Чашечкин Ю.Д., Прохоров В.Е. Тонкая структура всплеска при падении капли на свободную поверхность покоящейся жидкости. Доклады Академии Наук. 2011. № 6. С. 768-773.
11. Zhu G.-Z. Li Z.-H., Fu D.-Y. Experiments on ring wave packet generated by water drop // *Chinese Science Bulletin*. 2008. V. 53. No 11. P. 1634-1638.
12. Ray B., Biswas G., Sharma A. Regimes during liquid drop impact on a liquid pool // *J. Fluid Mech.* 2015. V. 768. P. 492-523.
13. Прохоров В.Е., Чашечкин Ю.Д. Генерация звука при падении капли на поверхность воды, *Акустический журнал*, 2011. Т. 57. № 6. С. 792-803.
14. Чашечкин Ю.Д., Прохоров В.Е. Аэро- и гидроакустика удара свободно падающей капли о поверхность воды // Доклады РАН. 2010. Т. 434. № 1. С. 51-55.
15. L. V. Zhang, J. Toole<sup>1</sup>, K. Fezzaa, R. D. Deegan Evolution of the ejecta sheet from the impact of a drop with a deep pool // *J. Fluid Mech.* 2012. V. 690. P. 5-15.
16. Чашечкин Ю.Д., Прохоров В.Е. Гидродинамика удара капли: короткие волны на поверхности венца // Доклады Академии наук. 2013. Т. 451. № 1. С. 41-45.
17. Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю. Капиллярные волны на поверхности погружающейся в жидкость капли // Доклады Академии наук. 2015. Т. 465. № 4. С. 548-554.
18. Perryman S.A.M., West J.S. Splash dispersal of *Pyllosticta citricarpa* rust spores from infected citrus // EFSA supporting publication № 2014-EN-560. 2014. 30 p.
19. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Том VI. Гидродинамика. М.: Наука, 1986. 736 с.
20. Blanchette F., Messio L., Bush J. W.M. The influence of surface tension gradients on drop coalescence // *Physics of fluids*. 2009. V. 21. P. 072107-1 - 072107-10.
21. Hendrix M.H.W., Bouwhuis W., van der Meer D., Lohse D., Snoeijer J.H. Universal mechanism for air entrainment during liquid impact // *J. Fluid Mech.* 2016. V. 789. P. 708-725.
22. Deegan R. D., Brunet P. and Eggers J. Complexities of splashing // IOP Publishing Ltd and London Mathematical Society. Nonlinearity. 2008. V. 21. C1-C11.

23. Eggers J., Smith A. F. Free streamline flows with singularities // *J. Fluid Mech.* 2010. V. 647. P. 187–200.
24. Эртель Г., мл. (ред). Путеводитель Прандтля по гидродинамике. М.-Ижевск: НИЦ РХТ, 2007. 776 с. (Перевод 10-го издания: Oertel H. jr. (Hrsg). Prandtl-Führer durch die Strömungslehre. Wiesbaden; Vieweg. 2001, первое издание вышло в 1942 г.).
25. Thoroddsen S.T., Etoh T.G., Takehara K. Air entrapment under an impacting drop // *J. Fluid Mech.* 2003. V. 478. P. 125-134.
26. Эйзенберг Д. Кауцман В. Структура и свойства воды. Л-д: Гидрометеиздат. 1975. 258 с.
27. Ильиных А.Ю., Чашечкин Ю.Д. Гидродинамика контакта падающей капли со свободной поверхностью жидкости // *МЖГ.* 2016. № 2. С. 3-12.
28. Чашечкин Ю. Д., Прохоров В. Е. Структура первичного звукового сигнала при столкновении свободно падающей капли с поверхностью воды // *ЖЭТФ.* 2016. Т. 149. Вып. 4. С. 864–875.
29. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика (4-е издание). М.: Физматлит. 1963. 583 с.
30. Уизем Дж. Линейные и нелинейные волны. М.: Мир. 1977. 624 с.
31. Thoraval M.-J., Li Y., Thoroddsen S. T. Vortex-ring-induced large bubble entrainment during drop impact // *Physical Review. E* 93. 2016. P. 033128-1 – 033128-10.
32. Гиббс Дж. Термодинамика. Статистическая механика. М. 1982. 584 с.
33. Lewars E.G. Computational Chemistry: Introduction to the Theory and Applications of Molecular and Quantum Mechanics. 2003. N.-Y. Kluwer. 471 p.
34. Greef R., Frey J. G. The water-like film on water // *Physica Status Solidi.* 2008. V. 5. P. 1184-1186.
35. Teschke O., de Souza E.F. Water molecule clusters measured at water/air interfaces using atomic force microscopy // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2005. V. 7 (22). P. 3856 -3865.
36. Güner F. E. G., Wählin J., Hinge M., Kjellstrup S. The temperature jump at a growing ice-water interface // *Chem. Phys. Lett.* 2015. V. 622. P. 15-19.
37. Бункин Н.Ф., Индукаев К.В., Игнатьев П.С. Спонтанная самоорганизация газовых микропузырей в жидкости // *ЖЭТФ.* 2007. Т. 131. № 3. С. 539-555.

Принято к печати 30.06.2016

Приложение

Таблица 1. Параметры жидкостей

Жидкость \ Параметр	Вода	Раствор соли	Раствор этанола (40%)	Масло	Нефть
$\rho, \text{г} \cdot \text{см}^{-3}$	1.00	1.18	0.94	0.92	0.87
$\sigma, \text{г} \cdot \text{с}^{-2}$	73	75	27	33	30
$\gamma, \text{см}^3 \cdot \text{с}^{-2}$	73	72	29	36	34.5
$\mu, \text{г} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$	0.01	0.02	0.03	0.55	0.07
$\kappa \cdot 10^6, \text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$	2.43	11	7.18		

Таблица 2. Масштабы длины и скорости

Жидкость \ Масштаб	Вода	Раствор соли	Раствор этанола (40%)	Масло	Нефть
$\delta_g^U, \text{см}$	63.8	63.8	63.8	63.8	63.8
$\delta_g^Y, \text{см}$	0.27	0.27	0.18	0.19	0.19
$\delta_U^Y, \text{см}$	$12 \cdot 10^{-4}$	$13 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$58 \cdot 10^{-5}$	$55 \cdot 10^{-5}$
$\delta_U^V, \text{см}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$64 \cdot 10^{-6}$	$12 \cdot 10^{-5}$	$24 \cdot 10^{-4}$	$32 \cdot 10^{-5}$
$\delta_\gamma^V, \text{см}$	$14 \cdot 10^{-7}$	$36 \cdot 10^{-7}$	$28 \cdot 10^{-6}$	0.01	$19 \cdot 10^{-5}$

$U_v^y$ , м/с	73	45	10.7	0.6	4.3
---------------	----	----	------	-----	-----

Таблица 3. Масштабы времени

Жидкость \ Масштаб	Вода	Раствор соли	Раствор этанола (40%)	Масло	Нефть
$\tau_v^D$ , с	17.64	13.23	3	0.17	1.2
$\tau_g^U$ , с	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
$\tau_\gamma^d$ , с	0.032	0.037	0.029	0.035	0.029
$\tau_g^y$ , с	0.017	0.017	0.014	0.014	0.014
$\tau_U^d$ , с	$17 \cdot 10^{-4}$	$18 \cdot 10^{-4}$	$12 \cdot 10^{-4}$	$14 \cdot 10^{-4}$	$12 \cdot 10^{-4}$
$\tau_v^y$ , с	$58 \cdot 10^{-6}$	$10^{-4}$	$28 \cdot 10^{-5}$	$58 \cdot 10^{-4}$	$72 \cdot 10^{-5}$
$\tau_\gamma^v$ , с	$2 \cdot 10^{-10}$	$7.9 \cdot 10^{-10}$	$2.6 \cdot 10^{-8}$	$17 \cdot 10^{-5}$	$43 \cdot 10^{-8}$

Таблица 4. Определяющие безразмерные параметры задачи

Жидкость \ Число	Вода	Раствор соли	Раствор этанола (40%)	Масло	Нефть
Re	10500	7200	2500	146	1000
Wb	400	400	1000	600	560
Fr	140	140	160	180	200
Bo	2.4	2.9	2.8	3.35	2.73
Oh	$18 \cdot 10^{-4}$	$28 \cdot 10^{-4}$	$97 \cdot 10^{-4}$	$17 \cdot 10^{-2}$	$24 \cdot 10^{-3}$
$Ca_U$	0.034	0.056	0.234	0.042	0.006

Таблица 5. Относительные коэффициенты

№	Капля	Принимающая жидкость	Диаметр капли $D_d$ , см	Отношения		
				плотностное, $R_\rho$	капиллярное, $R_\sigma$	вязкостное, $R_\mu$
1	Вода	Вода	0.42	0	0	0
2	Водный раствор соли (14%)	Вода	0.46	-0,083	-0,014	-0,33
3	Водный раствор этанола (40%)	Вода	0.3	0,031	0,46	-0,5
4	Вода	Водный раствор этанола(40%)	0.42	-0,031	-0,46	0,5
5	Вода	Подсолнечное масло	0.42	-0,042	-0,38	0,96
6	Подсолнечное масло	Вода	0.32	0,042	0,38	-0,96
7	Нефть	Вода	0.31	0,07	0,42	-0,75

Таблица 6. Значения кинетической и поверхностной потенциальной энергии капли

Жидкость	Кинетическая энергия $E_k$ , мкДж	Поверхностная потенциальная энергия $E_\sigma$ , мкДж	Плотность кинетической энергии $W_k$ , Дж/м <sup>3</sup>	Плотность поверхностной энергии $W_\sigma$ , Дж/м <sup>3</sup>	$\frac{E_k}{E_\sigma}$	$\frac{W_k}{W_\sigma}$
Вода	120	4	$3 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^6$	30	$10^{-3}$
Водный раствор соли (14%)	180	5.5	$3.7 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^6$	32.7	$1.2 \cdot 10^{-3}$
Водный раствор этанола (40%)	40	0.9	$2.9 \cdot 10^3$	$1.1 \cdot 10^6$	44.4	$2.6 \cdot 10^{-3}$
Подсолнечное масло	50	1	$2.9 \cdot 10^3$	$1.3 \cdot 10^6$	50	$2.2 \cdot 10^{-3}$
Нефть	40	0.9	$2.7 \cdot 10^3$	$1.2 \cdot 10^6$	44.4	$2.3 \cdot 10^{-3}$

**Ю.Д. Чашечкин, А.Ю. Ильиных**

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН,  
Россия, Москва ([chakin@ipmnet.ru](mailto:chakin@ipmnet.ru); [ilynykh@ipmnet.ru](mailto:ilynykh@ipmnet.ru))*

## ПОГРУЖЕНИЕ СВОБОДНО ПАДАЮЩЕЙ КАПЛИ И ПОСЛЕДУЮЩИЙ ВСПЛЕСК: ТОНКИЕ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЙ

**Аннотация.** Методами макрофотосъемки и высокоскоростной видеосъемки исследована эволюция картины течения, возникающего в процессе погружения свободно падающей капли в глубокую жидкость. В опытах использованы капли пресной или соленой воды, подкрашенной ализариновыми чернилами, этанола, молока, нефти и подсолнечного масла, падающие в чистую или подкрашенную воду. Основное внимание уделено регистрации картины растекания окрашенной капли по деформированной поверхности и поступления вещества в толщу принимающей жидкости. Впервые установлено, что на поверхности каверны и венца вещество капли концентрируется в тонких волокнах, образующих ряд структурных уровней. В верхнем ряду венца наблюдаются вертикальные волокна, большинство которых при смыкает к основаниям зубцов. В каверне распределение волокон усложняется и в ее центре линейчатый узор сменяется сетчатым. На дне каверны выражены треугольные, а также четырех- и пятиугольные ячейки. Положение и пространственная ориентация волокон сетки со временем меняются.

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

**Ю.Д. Чашечкин, А.Ю. Ильиных**

*РФА А.Ю. Ишлинский механика мәселелері институты, Ресей, Мәскеу*  
([chakin@ipmnet.ru](mailto:chakin@ipmnet.ru); [ilynykh@ipmnet.ru](mailto:ilynykh@ipmnet.ru))

## **ЕРКІН ҚҰЛАЙТЫН ТАМШЫНЫҢ БАТУЫ ЖӘНЕ АРТЫНША ПАЙДА БОЛҒАН ШӨЛПІЛ: АҒЫСТЫҢ ЖҰҚА ҚҰРЫЛЫМДАРЫ**

**Аннотация.** Макротүсіру және жоғарыжылдамдықты видеотүсіру әдістері көмегімен терең сұйықтыққа еркін құлаған тамшы ізінің ағымы зерттелді. Тәжірибеде ализарин сиясымен боялған тұщы және тұздалған су, этанол, сүт, мұнай және сұйық май тамшылардың таза және боялған суға құлауы зерттеді. Негізгі назар деформацияланған субеті бойымен боялған тамшының ағуы мен қандай тереңдікке енетініне аударылған. Сөйтіп, тұңғыш рет каверна мен тәж бетінде тамшы заты құрылымды деңгейлер түзетін жіңішке талшықтар бойында шоғырланатыны анықталды. Тәждің жоғарғы қатарында басым көпшілікте кертештің негізіндетоғысатын вертикалды талшықтар байқалады. Кавернада болса талшықтардың таралуы күрделене түседі, ортасындағы сызықты өрнек тормен алмасады. Каверна түбінде үшбұрышты, төртбұрышты және бесбұрышты ұяшықтар бар. Талшық торларының бағыты мен орналасуы уақыт өте өзгереді.

**Түйінді сөзер:** тамшы соққысы, беттікартылыс коэффициенті, шашырауы, капиллярлы толқындар.

**Yu.D. Chashechkin, A.Yu. Il'inyh**

*A.Yu. Ishlinskii institute of mechanics problem RAS, Russia, Moscow*  
([chakin@ipmnet.ru](mailto:chakin@ipmnet.ru); [ilynykh@ipmnet.ru](mailto:ilynykh@ipmnet.ru))

## **SUBMERSION OF FREE FALLED DROP AND SUBSEQUENT SPLASH FLOW FINE STRUCTURE**

**Abstract.** By the macroshooting and higt-speed video recording the evolution of flow due to submersion of free falled drop into deep fluid was investigated. In these experiments the colored by alizarin ink drops of fresh and salted water, ethanol, milk, petroleum and vegetable oil falls into fresh or colored water. Mostly the attention paid for detecting of colored drop spreading picture over deformed surface and entrance of matter into receiving fluid. It was established for the first time that the drop matter concentrated in thin filament on the surfact of cavern and crown by forming rows of structured levels. On the upper row of crown the vertical filaments mostly adjoined on the base of jaggies were observed. On cavern the distribution of filaments complicated and the linear pattern became meshy. On the botton of the cavern mosly observed triangle, rectangle and pentagonal cells. The location and polarization of filaments changes in time.

**Key wards:** drops blow, surface tension coefficient, splash, capillary wave.