

На правах рукописи

Ильиных Андрей Юрьевич

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИКИ ВСПЛЕСКА
КАПЛИ

01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук (ИПМех РАН)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
Чашечкин Юлий Дмитриевич,
Институт проблем механики им. А.Ю.
Ишлинского РАН, главный научный
сотрудник.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
Зырянов Валерий Николаевич,
Институт водных проблем РАН,
заведующий лабораторией
гидродинамики

доктор физико-математических наук,
Урманчев Саид Федорович, Институт
механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ
РАН, заведующий лабораторией
«Механика многофазных систем»

Ведущая организация: Федеральное государственное
унитарное предприятие
«Центральный аэрогидродинамический
институт имени профессора
Н.Е. Жуковского»

Защита состоится 2 ноября 2017 г. в 15 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.240.01 при Институте проблем механики Российской академии наук по адресу: 119526 Москва, проспект Вернадского, д. 101, корп. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИПМех РАН (<http://www.ipmnet.ru>)

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.240.01,
кандидат физико-математических наук

Е.Я. Сысоева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Экспериментально исследована гидродинамика всплеска капли, которая включает мелкомасштабные компоненты, наблюдаемые на всех стадиях процесса; исследована картина распределения вещества капли; изучено влияние основных параметров задачи на картины течения; определен механизм тонкоструктурного массопереноса.

Актуальность исследования. Практический и научный интерес к явлению всплеска при столкновениях капель с поверхностью жидкости обусловлен фундаментальностью данной задачи в теоретической гидродинамике, а также широким диапазоном пространственно-временных масштабов природных и технологических процессов, простирающихся от микро- (перенос вещества мелкими брызгами, излучение звука), до глобальных в масштабах Земли (климатические факторы облаков). Высыхающие микрокапли оставляют кристаллики солей, которые попадают с током воздуха в верхние слои атмосферы и служат центрами конденсации влаги при формировании облачных систем, влияющих на погоду и климат.

Капли и брызги также участвуют в обмене микробами и вирусами между гидросферой и атмосферой, влияют на распространение массовых инфекций. Капли воды, часто используемые при пожаротушении, попадая в разогретое масло, вскипают и выбрасывают большое число мелких капелек. Образующийся "масляный туман" способствует усилению горения как в бытовых условиях, так и при пожарах на нефтепромыслах и нефтепроводах.

Тонкие детали процесса переноса вещества при столкновении капли с принимающей жидкостью представляют интерес и для механики жидкостей, и для акустики при изучении механизмов генерации звуковых пакетов на стадии первичного контакта жидкостей и в ходе эволюции течения.

Непрерывные высокопроизводительные капельные технологии приобретают все большее значение по мере развития техники и расширения списка рабочих материалов, среди которых важное место занимает нефть и продукты ее

переработки. Исследование механизмов и картин капельного переноса вещества представляет как научный, так и практический интерес.

В целом, интерес к задачам гидродинамики капель обусловлен научной содержательностью тематики, доступностью аппаратуры для экспериментального изучения, многообразием практических приложений полученных научных результатов в различных разделах механики, космической энергетики, акустики, экологии, биологии и медицины.

Объектами исследования являются свободно падающая капля и течения, образованные в процессе ее контакта с поверхностью и при дальнейшем погружении в глубокую жидкость, а также тонкие компоненты и линейчатые структуры в распределении вещества капли. **Предмет исследования** – высокоразрешающая регистрация картин течения, перенос вещества капли в принимающую жидкость, влияние параметров задачи и условий опытов на картину течений, определение роли поверхностной потенциальной и кинетической энергий капли.

Цель работы – изучение геометрии картины течения в целом, пространственной структуры картины переноса вещества на ранних стадиях процесса, в котором представлены собственно погружающаяся капля, каверна в принимающей жидкости и растущий венец, при контакте смешивающихся и несмешивающихся жидкостей, эмульсий и суспензий, определение параметров задачи и их роли в картине течения.

Определены следующие задачи:

1. совершенствование техники высокоразрешающей регистрации быстропротекающих процессов с использованием источников непрерывного освещения,
2. визуализация стримеров первичного контакта капли,
3. исследование углового распределения разлетающихся брызг первичного контакта,

4. изучение картин распределения вещества падающей капли по поверхности венца и каверны в принимающей жидкости в случае смешивающихся и несмешивающихся жидкостей,
5. определение параметров коротких капиллярных волн на различных стадиях процесса.

Методы исследований. Теоретическую основу работы составляет система фундаментальных уравнений механики, включающая уравнения состояния и баланса вещества, массы, импульса и энергии. В основу экспериментального исследования гидродинамики всплеска капли положены оптические методы прямой визуализации. Мелкомасштабные короткоживущие компоненты течений и картины распределения вещества капли по деформированной поверхности принимающей жидкости регистрировались методом фото- и высокоскоростной видеорегистрации. Картина течений в толще стратифицированной жидкости наблюдалась теневыми приборами.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Брызги всегда содержат вещества взаимодействующих сред – падающей капли и принимающей жидкости. Процессы образования тонких структур и эжекции брызг связаны с быстрым высвобождением доступной потенциальной энергии, сосредоточенной в тонком приповерхностном слое.
2. При отрицательных значениях относительного коэффициента поверхностного натяжения на поверхности погружающейся капли наблюдаются группы коротких капиллярных волн, образованных попадающими брызгами.
3. При погружении вещество окрашенной капли смешивающейся жидкости концентрируется на поверхности каверны и венца в тонких волокнах, разделенных принимающей жидкостью. Волокна образуют ряд структурных уровней. Несмешивающиеся вещества распределяются более равномерно. Образование тонких структур устойчиво воспроизводится в широких диапазонах параметров задачи и наблюдается во всех фазах процесса.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Семейства капиллярных волн наблюдаются на поверхностях покоящейся жидкости и отдельных структурных компонентов –выступающем венце, первичной каверне, и даже на погружающейся капле. Образование коротких капиллярных волн тесно связано с процессами формирования или отрыва структурных компонентов, в частности, эжекцией мелких капелек и их столкновениями с деформированной поверхностью принимающей жидкости или погружающейся капли.
2. Впервые надежно установлено, что брызги содержат вещества обеих взаимодействующих сред. Состав вторичных капель зависит от параметров взаимодействующих жидкостей и условий эксперимента.
4. Впервые установлено, что при взаимодействии смешивающихся жидкостей, эмульсий, суспензий 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.
5. Вещество капли, несмешивающееся с принимающей жидкостью, растекается более равномерно по поверхностям венца и каверны.
6. Положение границы центрального пятна несмешивающейся жидкости зависит от степени чистоты поверхности принимающей жидкости.
7. Все наблюдаемые вихревые системы характеризуются тонкой волокнистой структурой.
8. Впервые наблюдаемые короткопериодные 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.

Практическая и научная значимость работы. Разработанная методика позволяет визуализировать ранее неизученные тонкие компоненты на всех стадиях эволюции течений. Результаты исследований могут быть использованы для совершенствования теории капельных течений, разработки капельных систем охлаждения, профилактики возгораний и оптимизации методик тушения пожаров, повышения эффективности капельных технологий в химической, нефтехимической и биохимической промышленности.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих международных и российских конференциях: Международная конференция «Потоки и структуры в жидкостях» (Санкт – Петербург, июнь 2013 г.; Калининград, июнь 2015 г.); IV V, VI, VII Международные научные школы молодых ученых «Волны и вихри в сложных средах» (Москва, ноябрь 2013 г.; Москва, ноябрь 2014 г., Калининград, июнь 2015 г., Москва, ноябрь 2016г.); Всероссийская научная конференция «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред» (Москва, декабрь 2015 г.); Отраслевая конференция по измерительной технике и метрологии для исследований летательных аппаратов КИМИЛА-2016 (г. Жуковский, октябрь 2016 г); Генеральная ассамблея EGU (Вена, апрель 2014 г.), Международный семинар Turbulent Mixing and Beyond (Триест, август 2014 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 16 работ, включая 4 статьи из списка ВАК [1-4], 1 статью в журнале, не входящем в список ВАК [5], 11 работ, включенных в материалы школ и конференций. Экспериментальные исследования и обработка данных выполнены диссертантом лично, обсуждение и анализ результатов проводились совместно с научным руководителем диссертационной работы.

Личный вклад автора. Постановка задачи проводилась совместно с научным руководителем Ю.Д. Чашечкиным. Разработка методики, подготовка экспериментальной установки, проведение экспериментальных работ и обработка экспериментальных данных выполнены автором лично. Материал, изложенный в работах [1-5], является результатом совершенствования автором экспериментальной установки и проведения экспериментальных работ. В [1, 2] автором были определены группы веществ, для которых на поверхности погружающейся капли обнаруживаются капиллярные волны, измерены длины волн и рассчитаны фазовые скорости. В работах [3, 5] автором экспериментально были получены картины распределения вещества капли по деформированной поверхности принимающей жидкости, построены графики пространственного распределения полосчатых структур, определены их линейные масштабы, выполнен масштабный анализ. В работе [3] автором прослежена эволюция геометрии каверны и венца. Результаты проведенных автором экспериментов в стратифицированной среде с использованием датчика электропроводности приведены в работе [4].

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав с краткими заключениями по каждой главе, основных выводов, списка литературы, содержащего 122 наименования. Полный объем диссертации составляет 150 машинописных страниц, включает 60 рисунков, 9 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обсуждаются актуальность и новизна исследования, сформулирована цель диссертации, представлено краткое содержание работы, проведен обзор литературы.

В **первой главе** приведены размерные параметры задачи гидродинамики всплеска свободно падающей капли, в число которых входят: плотности (воздуха ρ_a , жидкостей капли ρ_d и принимающей ρ_t), кинематические $\nu_{a,d,t}$ и динамические $\mu_{a,d,t}$ вязкости, коэффициенты поверхностного натяжения σ_d^a , σ_t^a , коэффициенты диффузии вещества капли κ_t^d и маркирующей примеси κ_t^{md} в принимающей жидкости, температуры ($T_d = T_t = T_a$), условия опытов (диаметр D и скорость U капли в момент первичного контакта, высота свободного падения H , глубина слоя принимающей жидкости h_l , внешнее поле силы тяжести \mathbf{g}). Выделяются дополнительные параметры: масса капли M , площадь свободной поверхности S_d , импульс \mathbf{p} , кинетическая E_k и доступная потенциальная поверхностная энергия E_σ падающей капли.

В проведенных опытах значения размерных параметров изменялись в диапазоне: высота падения $H = 40 \div 260$ см, диаметр капли $D = 0.3 \div 0.5$ см, глубина слоя жидкости $h_l = 0.2 \div 8$ см, плотность $\rho = 0.87 \div 1.26$ г·см⁻³, вязкость $\mu = 0.01 \div 15$ г·см⁻¹·с⁻¹, коэффициент поверхностного натяжения на границе с воздухом $\sigma = 27 \div 75$ г·с⁻².

Приведена система уравнений гидродинамики для вязкой однородной жидкости в декартовой системе координат, ось z – вертикальна. Система включает уравнение неразрывности, условие несжимаемости и переноса импульса в плоском гравитационном поле с ускорением свободного падения \mathbf{g} (акустическими эффектами, в частности, излучением звука, в традиционном рассмотрении пренебрегается):

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

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

Здесь \mathbf{v} – скорость, P – давление.

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

$$\left(P_1 - P_2 - \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \right) \nabla_i \zeta - (\sigma_1^{ij} - \sigma_2^{ij}) \nabla_j \zeta = 0 \quad (3)$$

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

На основе выделенных размерных параметров для определения требований к методике эксперимента проведен масштабный пространственно-временной анализ системы уравнений. Наборы линейных и временных масштабов задачи разделены на подгруппы.

Первая группа линейных масштабов включает капиллярно-гравитационный параметр $\delta_g^\gamma = \sqrt{\gamma/g}$, входящий в дисперсионное уравнение коротких поверхностных волн, и диссипативно-капиллярные масштабы $\delta_\gamma^v = \nu^2/\gamma$. 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 прандтлев $\delta_U^v = \nu/U_d$ масштабы.

По аналогии, одна часть собственных временных масштабов включает только параметры среды – $\tau_g^\gamma = \sqrt[4]{\gamma/g^3}$, $\tau_\gamma^v = \nu^3/\gamma^2$, другая – размер капли –

$\tau_\gamma^d = \sqrt{D^3/\gamma}$, $\tau_\kappa^\gamma = \kappa D/\gamma$, $\tau_v^\gamma = \nu D/\gamma$, $\tau_v^D = D^2/\nu$, третья группа – ее скорость – $\tau_U^d = D/U_d$, $\tau_g^U = U_d/g$. Значения масштабов использованных в экспериментах жидкостях приведены в диссертации в таблицах. Для воды наибольший и наименьший масштабы длины составили $\delta_{\min} = \delta_\gamma^v = 1.4 \cdot 10^{-6}$ см и $\delta_{\max} = \delta_g^v = 0.27$ см, соответственно, а временные масштабы – $\tau_{\min} = \tau_\gamma^v = 1.9 \cdot 10^{-10}$ с и $\tau_{\max} = \tau_v^D = 17.6$ с.

Отношения масштабов задают наборы безразмерных комбинаций, включающие традиционные числа:

$$\text{Рейнольдса } Re = UD/\nu = 150 \div 10^4,$$

$$\text{Фруда } Fr_d = U^2/gD = 140 \div 200,$$

$$\text{Вебера } We_d = U^2 D/\gamma_d = 400 \div 1000,$$

$$\text{Бонда } Bo = D^2/(\delta_g^\gamma)^2 = gD^2/\gamma_d^a = 2.4 \div 3.4,$$

$$\text{Онезорге } Oh = \sqrt{\delta_\gamma^v/D} = \nu/\sqrt{\gamma D} = 1.8 \cdot 10^{-3} \div 1.7 \cdot 10^{-1},$$

$$\text{и капиллярное отношение } Ca_U^v = U/U_\gamma^v = 6 \cdot 10^{-3} \div 2.3 \cdot 10^{-1}.$$

При различии в составах вещества капли и принимающей жидкости протекающие процессы характеризуются еще одной группой безразмерных комбинаций, включающей 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 $R_\mu = \frac{\mu_t - \mu_d}{\mu_t + \mu_d}$, которые в проведенных

экспериментах принимали как положительные, так и отрицательные значения (приведены в таблице в диссертации).

В выражении для дифференциала свободной энтальпии, которое в толще жидкости имеет вид $dg = -sdT + VdP$, в поверхностном слое, следуя модели Дж. Гиббса, в выражение для потенциала вводится дополнительное положительное

слагаемое $dg_{\sigma} = -sdT + VdP + \sigma dS_b$ (заштрихованный слой на рис. 1). На контактной поверхности жидкость – газ, где среда может распадаться на ионные кластеры, в выражении для термодинамического потенциала входит еще один член, зависящий от химического потенциала μ_n и концентрации соответствующих компонентов dN_n :

$$dg_s = -sdT + VdP + \sigma dS_b + \mu_n dN_n.$$

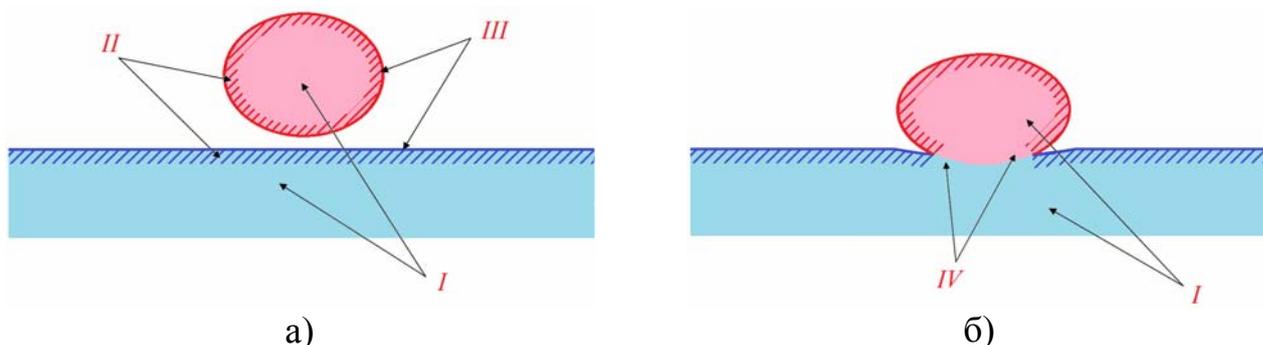


Рис. 1. Схема распределения термодинамических потенциалов: а) – полет капли; б) – начало процесса слияния. *I* – потенциал dg в толще жидкости; *II* – потенциал dg_{σ} в приповерхностном слое; *III* – потенциал dg_s непосредственно на границе раздела – поверхности молекулярного контакта жидкости с газовой фазой; *IV* – потенциал dg_2 слившихся жидкостей в области соприкоснувшихся приповерхностных слоев.

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, который соотносится с диссипативно-капиллярным масштабом. Схема течений составлена с учетом характера распределения свободной энтальпии в капле и принимающей жидкости.

Значения отношений компонентов энергий для типичных значений параметров изучаемых процессов показывают, что основную долю (более 97%) составляет кинетическая энергия движения, однако плотность доступной потенциальной поверхностной энергии существенно выше в силу ее концентрации в тонком приповерхностном слое.

При слиянии жидкостей вначале происходит уничтожение собственно поверхностного слоя за время $\Delta t_s \sim 10^{-10}$ с (толщина физически выделенного поверхностного слоя порядка $\delta_s = 5 \cdot 10^{-8}$ см). В течение более длительного промежутка времени $\Delta t = \delta_\sigma / U \sim 10^{-9}$ с происходит слияние жидкостей (уничтожение свободной поверхности и приповерхностных слоев), преобразование доступной потенциальной поверхностной энергии в другие формы энергии, которая сопровождается повышением температуры и давления в области слияния.

Во **второй главе** приведена принципиальная схема экспериментальной установки для визуализации мелкомасштабных быстропротекающих процессов (стенд ТБП, входящий в состав комплекса «УСУ ГФК ИПМех РАН»), описаны особенности ее конструкции с учетом целей и задач проводимого исследования. Приведено описание оптических и электронных схем таких как: блок регулируемых задержек и высокоразрешающий датчик электропроводности, даны оценки пространственно-временного разрешения инструментов. Схемы экспериментальных установок приведены на рис. 2.

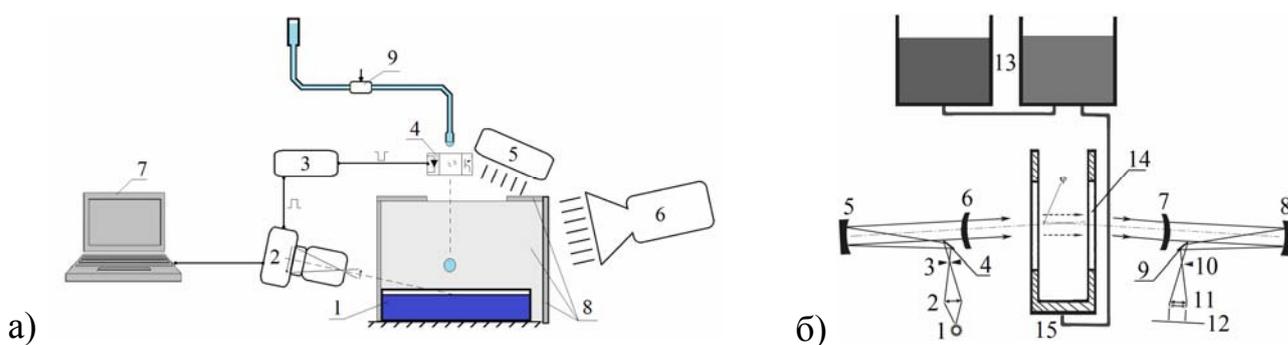


Рис. 2. Оптические схемы экспериментальных установок: а) стенд ТБП для регистрации мелкомасштабных быстропротекающих процессов на поверхности жидкости и б) стенд ТБП для изучения тонкой структуры волновых процессов в стратифицированных жидкостях.

Стенд ТБП (рис. 2, а) включает: оптическая кювета 1 с принимающей жидкостью глубиной h_l , оптическая система регистрации 2, управляемая компьютером 7 и блоком регулируемых задержек 3 с датчиком прохождения

капли 4, источники света 5, 6, защитные и отражающие экраны 8, дозатор капель 9. Стенд и его составные части перенастраивались с учетом задач экспериментального исследования.

Оптическая схема экспериментальной установки для регистрации внутренних возмущений (рис. 2, б) включает бассейн 15 с оптическими иллюминаторами 14, два накопительных бака 13, смеситель и соединительные шланги. Оптическая система включает источник света 1; конденсор 2, формирующий изображение в плоскости регулирующей диафрагмы; осветительную щель 3; плоские поворотные зеркала 4, 9, направляющие пучки света на главные сферические зеркала 5, 8; корректирующие мениски 6, 7; визуализирующую диафрагму 10 (нить, нож, дифракционная решетка), оптическую систему преобразования изображения 11 для построения образа изучаемой картины течения в плоскости наблюдения 12.

Приведены принципиальная схема и результаты тестовой работы датчика электропроводности в стратифицированной среде при различных видах входного воздействия. Описана конструкция датчика и чувствительного элемента. Динамические свойства датчиков оцениваются при следующих видах входного воздействия: гармонические колебания в среде с однородным градиентом плотности; резкое смещение на небольшую высоту и перемещение преобразователя по высоте с постоянной скоростью.

Оценка динамических характеристик выполнялась при вертикальном перемещении датчика в рабочей среде с постоянной скоростью 3 мм/с, время реакции не превышало 5 с. Пространственное разрешение датчика составило не меньше 0.1 мм при скорости смещения перемешанной области относительно чувствительного элемента около 3 мм/с.

В **третьей главе** рассмотрены картины течений, инициированных погружением свободно падающей капли в покоящуюся жидкость, приведены стадии процесса (первичное соприкосновение, погружение капли, формирование венца и каверны, образование розетки, кумулятивная струя, тонкая вторичная струя – стример, разбегающиеся капиллярные волны, погружение жидкости и

формирование системы вихрей в толще жидкости), описаны характерные особенности структурных элементов на разных стадиях процесса.

На графике приведено изменение скорости верхней кромки капли по мере ее погружения в принимающую жидкость. Систематические отклонения экспериментальных точек от аппроксимирующей прямой линии $S(t) = -0.25t + 0.42$ (рис. 3, а) наблюдаются на заключительной стадии процесса, когда капля практически сливается с принимающей жидкостью (высота остатка капли $\Delta h_d = 0.27$ мм, что составляет 5.4% от диаметра).

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), когда доступная потенциальная поверхностная энергия поступает только в узкое кольцо контакта жидкостей. Изменение скорости движения контактной линии капли с принимающей жидкостью при начальном соприкосновении по мере погружения капли представлено на рис. 3, б. Область контакта жидкостей движется к стенкам каверны при погружении нижней половины капли, и наоборот, внутрь каверны, удаляясь от стенок, при слиянии верхней половины капли.

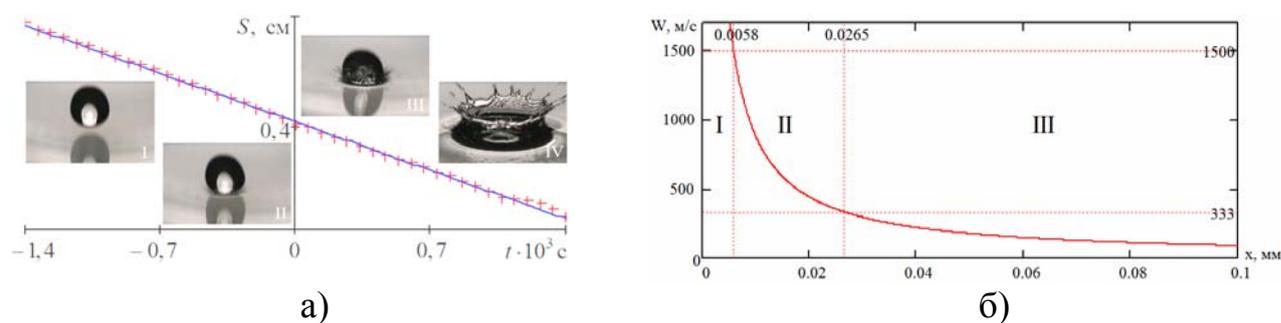


Рис. 3. а) Движение верхней кромки капли воды в области контакта с принимающей жидкостью, б) изменение скорости линии контакта капли с принимающей жидкостью

При уничтожении свободных поверхностей наблюдается ряд циклических эффектов в выбросе брызг. Длительное действие ускоряющего течения механизма уничтожения свободных поверхностей 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 и угловое положение их вылета увеличиваются по мере погружения капли. Первые группы стримеров вылетают настильно (под углом 10° на рис. 4, б), зубья шеврона с отделяющимися крупными брызгами располагаются под углом 45° к горизонту. Зональная структура капельных облаков указывает на существование радиальных периодических движений, почти однородных по азимутальной переменной (рис. 4, в).

Попадание мелких брызг на криволинейную поверхность погружающейся капли генерирует группы капиллярных волн, периодически расположенных по линии контакта жидкостей (рис. 4, а).

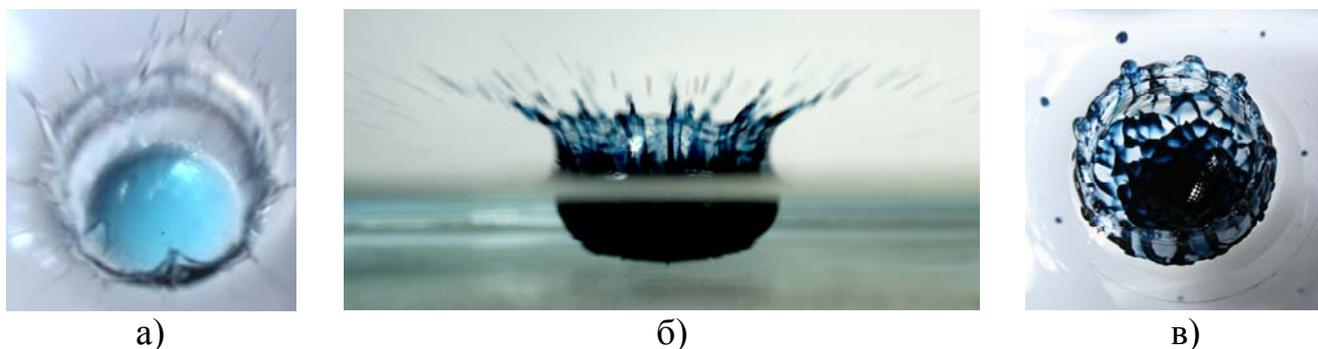


Рис. 4 Циклические эффекты в выбросе мелких брызг в фазе первичного контакта: а) капиллярные волны на поверхности погружающейся капли (капля водного раствора медного купороса погружается в воду, вид сверху), б) набор стримеров (капля раствора чернил погружается в воду, вид сбоку), в) зональная структура капельных облаков.

Траектории разлета брызг находятся в широком угловом диапазоне, который определяется динамикой столкновения и действием поверхностных сил, которые зависят от отношения коэффициентов поверхностного натяжения жидкостей и глубины погружения капли. Часть вылетающих брызг достигает поверхности

погружающейся капли, если значения относительного коэффициента поверхностного натяжения контактирующих сред меньше или равно нулю $R_{\sigma} \leq 0$. Всего было проведено более 180 опытов с парами: вода – вода $R_{\sigma} = 0$, водный раствор поваренной соли – вода $R_{\sigma} = -0,014$, вода – водный раствор этанола $R_{\sigma} = -0.46$, вода – подсолнечное масло. Следы попадания брызг на поверхность погружающейся в жидкость капли и сопутствующие группы коротких капиллярных волн приведены на рис. 5.

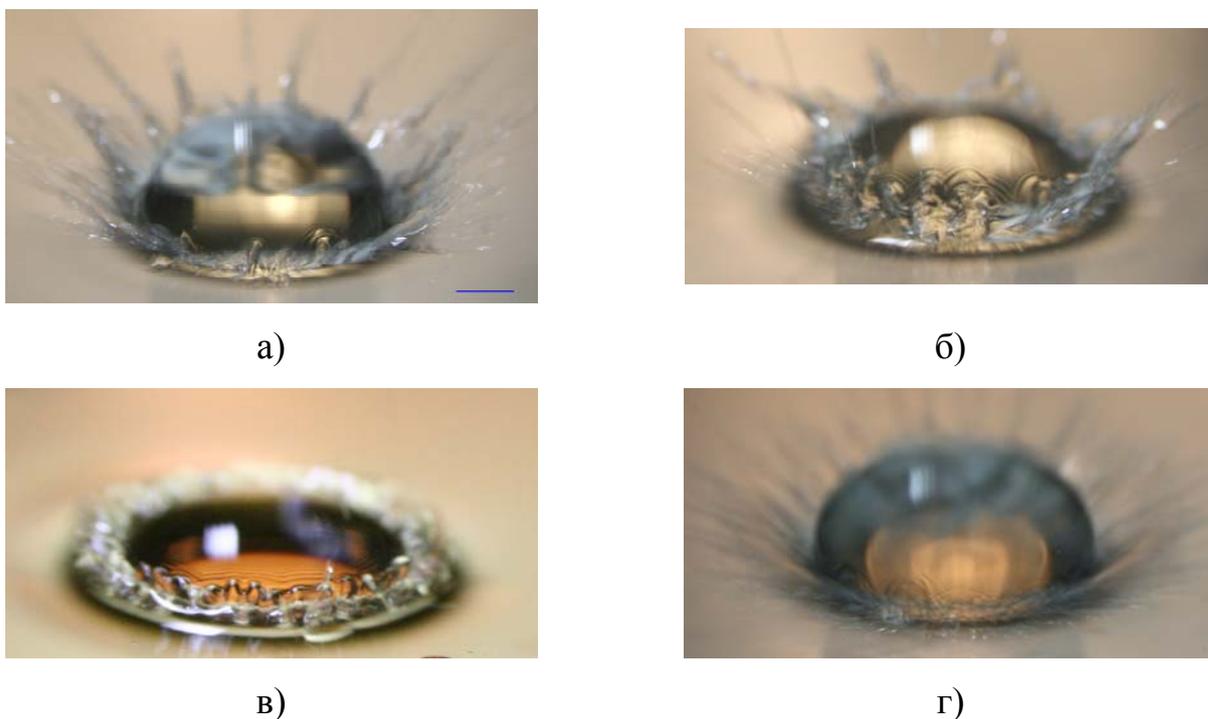


Рис. 5. Капиллярные волны на поверхности погружающейся капли: а) пресной воды в воду, б) насыщенного водного раствора поваренной соли в воду, в) пресной воды в подсолнечное масло, г) пресной воды в чашку Петри с раствором этанола.

При положительных значениях параметра R_{σ} капиллярные волны на поверхности погружающейся капли не наблюдаются (более 160 опытов с парами: водный раствор этанола – вода $R_{\sigma} = 0.46$, подсолнечное масло – вода $R_{\sigma} = 0.38$).

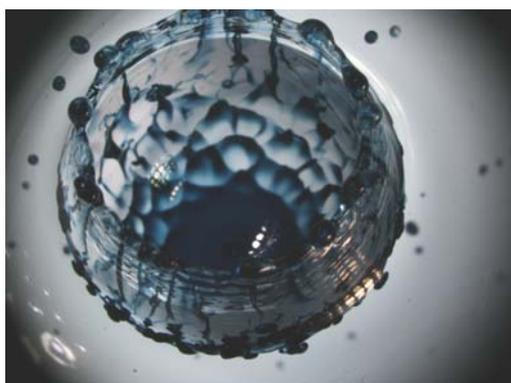
Из анализа распределения освещенности вдоль направления распространения капиллярных волн определены их длины. Фазовые скорости волн были получены

в соответствии с дисперсионным уравнением для капиллярных волн $c = \sqrt{2\pi\gamma/\lambda}$ и составили в разных от 2 до 4 м/с.

Периодические компоненты течений (капиллярные волны) наблюдаются во всех фазах процесса погружения капли: на поверхности капли, венце, каверне, кумулятивной струе при ее формировании и отрыве от ее вершины вторичных капель.

В **четвертой главе** впервые систематически описана наблюдаемая пространственная картина распределения вещества окрашенной капли по поверхности каверны и венца, которые, считается, имеют гладкие формы вследствие непрерывного распределения энергии и импульса в области слияния жидкостей.

В экспериментах со смешивающимися жидкостями (растворами чернил, окрашенного спирта, глицерина, растворов солей, уксусной кислоты и молоком, падающими в чистую и подкрашенную воду) отмечено, что вещество капли в принимающей жидкости распределяется неравномерно, собирается в тонких линейчатых элементах – волокнах. В верхнем ряду венца волокна образуют вертикальную линейчатую структуру. На дне каверны выражена сетчатая структура, включающая трех-, четырех- и пятиугольные ячейки (рис. 6).



а)



б)

Рис. 6. Линейчатые структуры на поверхностях венца и каверны при растекании капель: а) чернил, б) перманганата калия.

В линейчатой структуре распределения вещества капли по внутренней поверхности каверны выделяется три масштаба. Первый из них определяет длину структур $\delta_l = U \cdot t$, другой – диссипативно капиллярный – определяет толщину слоя $\delta_\gamma^v = v^2 / \gamma$, третий – линейный масштаб тонких окрашенных нитей и полосчатых структур δ_w – находится в диапазоне между капиллярным и капиллярно-гравитационным масштабами. Полосчатые структуры в процессе эволюции венца распадаются на более тонкие окрашенные нити, толщиной от 0.005 до 0.04 см.

Линейчатые структуры наблюдаются на нескольких начальных фазах процесса слияния капли, на растущей каверне и венце, а также на заполняющейся каверне и погружающемся венце, сохраняются до распада кумулятивной струи. Образование линейчатых структур объясняется действием больших флуктуаций давления в сравнительно малых по объему областях уничтожения свободной поверхности сливающихся жидкостей. Большие флуктуации давления ускоряют совместное тонкослойное течение соприкасающихся жидкостей и формируют неравномерное распределение вещества капли по поверхности венца и каверны.

Наблюдаемая быстрая эволюция картины течений при падении капли нефти или масла (формирование первичной пелены, стримеров, каверны и венца) в воду также обусловлена быстрым освобождением потенциальной поверхностной энергии, поскольку обе несмешивающиеся жидкости одновременно визуализируются на поверхностях всех элементов течения, включая вылетающие брызги. При погружении капли вещества, несмешивающегося с принимающей жидкостью, картина распределения более равномерная, линейчатые структуры не наблюдаются.

В **пятой главе** проведена параметризация картин распределения вещества капли по деформированной поверхности принимающей жидкости, включающая: радиус центрального пятна R_1 и колец R_i , на которых располагаются узлы сетчатого рисунка, целостность колец χ , число ярусов k и длина ребер сетки f_i . Рассмотрено влияние условий экспериментов (высота падения, вязкости и

коэффициенты поверхностного натяжения жидкостей, форма дна) на картину распределения вещества капли смешивающегося и несмешивающегося с принимающей жидкостью.

Рассматривается картина распределения вещества капли (водный раствор чернил) при свободном падении с высоты $H = 80 \div 260$ см. Определено, что с увеличением высоты падения капли и, следовательно, числа We линейчатые структуры становятся более тонкими, вещество капли концентрируется в узлах ярусов сетки, возрастает целостность колец (рис. 7, а), однако уменьшается количество ярусов (рис. 7, б)

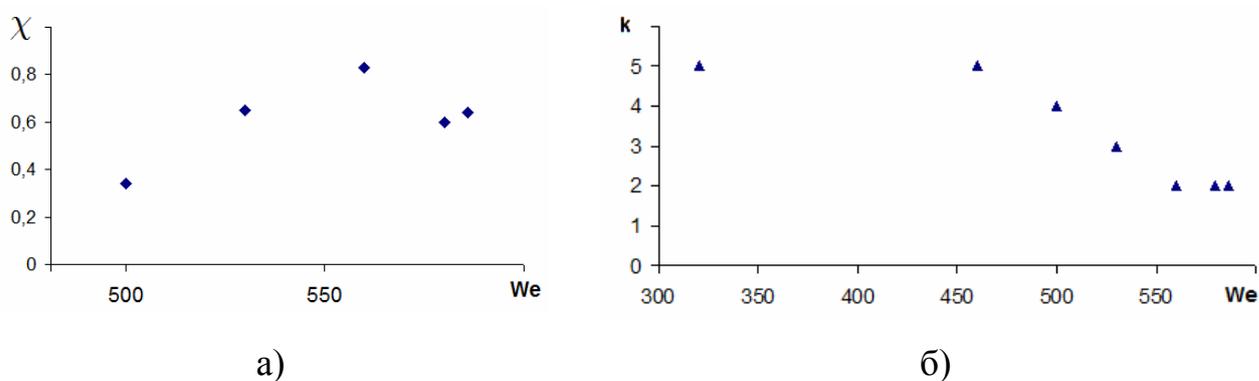


Рис. 7. Зависимости целостности колец (а) и (б) числа ярусов от числа Вебера в картине распределения вещества капли в фазе развитого венца

При погружении капли нефти на чистую поверхность воды, шеврон венца оказывается полностью окрашенным, как и внутренняя часть венца. Вторичные капли, вылетающие с вершин шеврона, также преимущественно состоят из вещества капли. Наличие пыли или нефтяной пленки на поверхности принимающей жидкостью (воды) приводит к значительному уменьшению ее поверхностного натяжения. Отношением коэффициентов поверхностного натяжения капли и принимающей жидкости регулируется положение границы центрального пятна и состав вторичных капель (рис. 8).

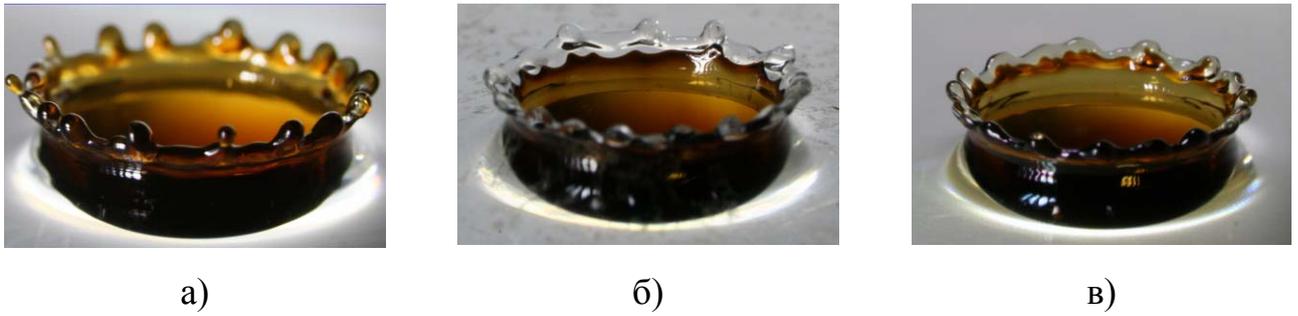


Рис. 8. Картина распределения вещества капли нефти по поверхности воды: а) чистой б), запыленной, в) покрытой тонкой нефтяной пленкой

Различные концентрации подкрашенного водного раствора глицерина (от 40 до 99%) позволили оценить влияние вязкости на картину растекания вещества капли по деформированной поверхности принимающей жидкости. Отмечено, что по мере увеличения вязкости (концентрации глицерина) материал капли распределяется по поверхности каверны более равномерно при частичном сохранении линейчатых структур на поверхности венца (уменьшается число ярусов сетки). Зависимость числа ярусов k и отношения радиуса центрального R_1 пятна к радиусу каверны R от числа Онезорге приведены на рис. 9.

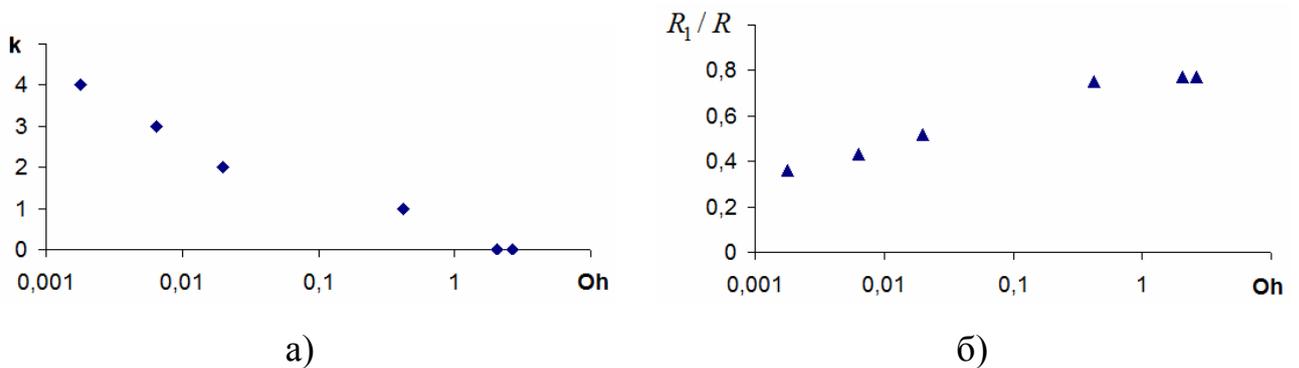


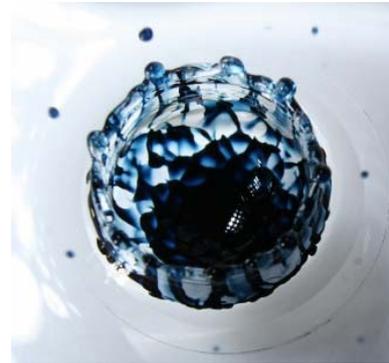
Рис. 9. Изменение числа ярусов (а) и отношения радиусов центрального пятна и каверны (б) с числом Онезорге.

Погружение капли чернил в тонкий слой воды ($h_l \sim D$) показал, что форма дна бассейна оказывает существенное влияние на картину распределения вещества капли лишь в случае непосредственного контакта (рис. 10). Контакт каверны с гранями углубления приводит к искажению формы каверны и

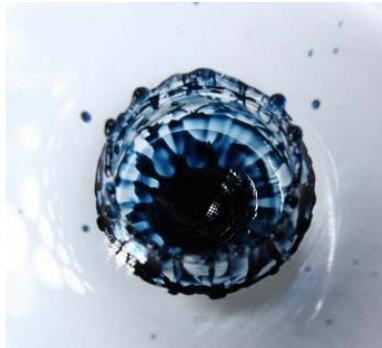
сетчатого рисунка – существенно увеличивается отношение радиуса первого яруса к радиусу центрального пятна.



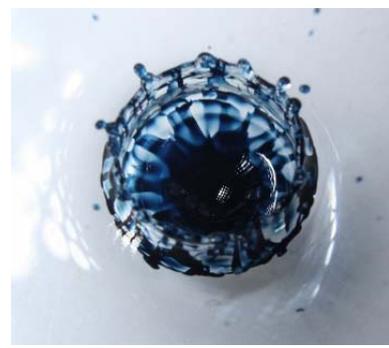
а) $k = 5$, $R_1 / R = 0.41$, $R_{21} = 1.35$



б) $k = 5$, $R_1 / R = 0.39$, $R_{21} = 1.33$



в) $k = 4$, $R_1 / R = 0.44$, $R_{21} = 1.84$



г) $k = 4$, $R_1 / R = 0.43$, $R_{21} = 1.9$

Рис. 10. Погружение капли раствора чернил в тонкий слой воды ($h_l = 2$ мм) с профильным дном: а) сферическое углубление $d = 20$ мм, б) коническое $d = 20$ мм, в) сферическое углубление $d = 10$ мм, г) коническое $d = 10$ мм.

В целом сетчатая картина распределения вещества капли по деформированной поверхности принимающей жидкости наблюдается в широком диапазоне чисел Вебера и Онезорге, при погружении капли в тонкие слои жидкости при различных формах поверхности дна.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработанная методика фото и видеорегистрации всплеска с непрерывными источниками света (лампы накаливания, прожектора, светодиоды) обеспечивает детальную регистрацию мелкомасштабных ($\delta > 10^{-3}$ см) короткоживущих $\delta t > 10^{-4}$ с компонентов течений, порождаемых падением капли (диаметром $D = 0.3 \div 0.5$ см) в жидкость со скоростью $U = 2 \div 3.5$ м/с на всех этапах процесса.
2. Для регистрации параметров течений в непрерывно стратифицированных средах разработан высокоразрешающий датчик удельной электропроводности жидкостей с импульсным питанием для уменьшения дрейфа сигнала.
3. Верхняя кромка капли остается невозмущенной, а в области слияния наблюдается комплекс нестационарных процессов, проявляющихся в зональном характере распределения брызг в горизонтальной плоскости и формировании отдельных стримеров с различным угловым положением.
4. При первичном контакте часть брызг разлетается наружу, а часть попадает на поверхность погружающейся капли и генерирует на ней короткие капиллярные волны, если относительный коэффициент поверхностного натяжения жидкостей меньше или равен нулю $R_\sigma = \frac{\sigma_t - \sigma_d}{\sigma_t + \sigma_d} \leq 0$ (более 180 опытов с парами: вода – вода $R_\sigma = 0$, водный раствор поваренной соли – вода $R_\sigma = -0,014$, вода – водный раствор этанола $R_\sigma = -0.46$, вода – подсолнечное масло $R_\sigma = -0.38$). При положительных значениях параметра R_σ капиллярные волны на поверхности погружающейся капли не наблюдаются (более 160 опытов с парами: водный раствор этанола – вода $R_\sigma = 0.46$, подсолнечное масло – вода $R_\sigma = 0.38$).
5. В результате анализа результатов большой серии опытов с веществами (водные растворы ализариновых чернил, окрашенные растворы спирта, солей, подкрашенное подсолнечное масло, нефть, молоко и молочные сливки) впервые надежно установлено, что брызги содержат вещества обеих взаимодействующих сред. Соотношение веществ во вторичных каплях зависит от условий

эксперимента, в частности, от величины относительного коэффициента поверхностного натяжения жидкостей.

6. В опытах с растворами ализариновых чернил, окрашенного спирта, глицерина, солей (медный и железный купорос, перманганат калия, поваренная соль), уксусной кислоты и молоком, капающими в чистую и подкрашенную воду, а также чернил, падающих в молоко и молочные сливки, впервые установлено, что вещество капли, смешивающееся с принимающей жидкостью, распределяется в толще жидкости и на ее деформированной поверхности в форме тонких линейчатых (полосчатых и сетчатых) структур.

7. Вещество капли, смешивающееся с жидкостями капли и принимающей среды, распределяется в принимающей жидкости виде тонких волокон во всех фазах процесса: при соприкосновении капли с принимающей жидкостью, образовании пелены брызг и стримеров, образовании и разрушении венца и каверны, формировании и разрушении кумулятивной струи, выбрасывании стримера и погружении вещества капли в принимающую жидкость с формированием вихревых колец.

8. При погружении капли вещества, которое не смешивается с принимающей жидкостью (капель нефти и подкрашенных подсолнечного и касторовых масел погружающихся в чистую воду), картина распределения более равномерная, линейчатые структуры не наблюдаются.

9. Геометрия течения, формы каверны, венца, обратной кумулятивной струи и стримера существенно зависят от формы дна, если глубина принимающей жидкости не превосходит масштаба $h_r = h_l / D < 3$. Образование линейчатых структур устойчиво воспроизводится в широком диапазоне вязкостей и высот свободного падения капель, в глубокой и мелкой ($h_l < D$) воде при различных профилях дна.

10. Изменение структурных компонентов процессов сопровождается генерацией коротких капиллярных волн: при попадании брызг на погружающуюся каплю, на эволюционирующих венце и каверне, при отрыве капли от кумулятивной струи.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю. Капиллярные волны на поверхности погружающейся в жидкость капли // Доклады Академии наук. 2015. Т. 465, № 4, с. 548-554.
2. Ильиных А.Ю., Ильиных Ю.С., Чашечкин Ю.Д. Измерительный преобразователь электрической проводимости жидкостей // Измерительная техника. 2015. №12. С. 30-33
3. Ильиных А.Ю., Чашечкин Ю.Д. Гидродинамика контакта падающей капли со свободной поверхностью жидкости // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2016. № 2. С. 3 -12.
4. Ильиных А.Ю., Чашечкин Ю.Д. Гидродинамика погружающейся капли: линейчатые структуры на поверхности венца // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2017. № 2. С. 152 -164.
5. Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю. Погружение свободно падающей капли и последующий всплеск: тонкие структуры течений // Проблемы эволюции открытых систем (Казахстан). 2016. Т. 18. Вып. 2. С. 2 – 30.
6. А.У. Plynykh Splash at the collision of droplet with a liquid // Потoki и структуры в жидкостях: Международная конференция, 25-28 июня 2013., Санкт – Петербург: Сборник материалов конференции. –М.: МАКС Пресс, 2013
7. А.У. Plynykh Dynamics of cavern and circular rim formed by free falling drop in fluid // Потoki и структуры в жидкостях: Международная конференция, 25-28 июня 2013., Санкт – Петербург: Сборник материалов конференции. – М.: МАКС Пресс, 2013
8. А.Ю. Ильиных Роль тонких компонент течений в переносе массы капли при всплеске // Волны и вихри в сложных средах:4-я международная научная школа молодых ученых, 26-29 ноября 2013г., Москва: Сборник материалов школы. – М.: МАКС Пресс, 2013
9. Ильиных А.Ю. Тонкоструктурные компоненты начальной стадии всплеска, Волны и вихри в сложных средах: 5-я Международная научная школа молодых

- ученых; 25-28 ноября 2014г., Москва: Сборник материалов школы. – М.: МАКС Пресс, 2014.
10. А.Ю. Ильиных Формирование и трансформация тонких струек и брызг при погружении капли в жидкость // Волны и вихри в сложных средах: 6-я Международная научная школа молодых ученых; 21-23 июня 2015 г., Калининград: Сборник материалов школы. – М.: МАКС Пресс, 2015. – 196 с. ISBN 978-5-317-04989-8
11. А. Yu. Ilinykh Development of fine streams at the first stages of droplet splash // Потoki и структуры в жидкостях: Международная конференция; 23-26 июня 2015 г., Калининград: Сборник материалов конференции. – М.: МАКС Пресс, 2015. – 316с. ISBN 978-5-317-04990-4
12. Ильиных А.Ю. Начальная фаза переноса вещества при падении капли в несмешивающуюся жидкость // Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред. Сборник материалов Всероссийской научной конференции. Москва, 15-17 декабря 2015г.- М.:ИПРИМ РАН, 2015. - 652с. Стр. 625-628
13. Ильиных А.Ю., Чашечкин Ю.Д. Визуализация тонкой структуры всплеска капли // Материалы II Отраслевой конференции по измерительной технике и метрологии для исследований летательных аппаратов (КИМИЛА-2016). 25–26 октября 2016 г. г. Жуковский С. 470 - 475. ФГУП «ЦАГИ». 2016. 510 с. (на диске)
14. Ильиных А.Ю. Высокочувствительный датчик электропроводности жидкостей // Материалы II Отраслевой конференции по измерительной технике и метрологии для исследований летательных аппаратов (КИМИЛА-2016). 25–26 октября 2016 г. г. Жуковский С. 146 -151. ФГУП «ЦАГИ». 2016. 510 с. (на диске)
15. Ильиных А.Ю. Влияние поверхностного натяжения на растекание капли по поверхности жидкости // Материалы 7-ой международной научной школы молодых ученых «Вихри и волны в сложных средах», 30 ноября -2 декабря 2016 г., Москва: Сборник материалов школы. – М.: ПРИНТ ПРО, 2016. – 200 с.

16. Ильиных А.Ю. Картины растекания капель с примесями // Материалы 7-ой международной научной школы молодых ученых «Вихри и волны в сложных средах», 30 ноября -2 декабря 2016 г., Москва: Сборник материалов школы. – М.: ПРИНТ ПРО, 2016. – 200 с.