

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МЕХАНИКИ ИМ. А.Ю. ИШЛИНСКОГО  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

ИЛЬИНЫХ АНДРЕЙ ЮРЬЕВИЧ

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ГИДРОДИНАМИКИ ВСПЛЕСКА КАПЛИ**

01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:  
доктор физ.-мат. наук,  
профессор Чашечкин Ю.Д.

Москва 2017

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Аннотация</b> .....	4
<b>Введение</b> .....	6
<b>Глава 1. Теоретические основы исследования течений, образующихся при погружении капель в толстый слой жидкости</b> .....	23
1.1 Размерные параметры задачи .....	23
1.2 Система уравнений движения. Начальные и граничные условия .....	25
1.3 Собственные линейные и временные масштабы процесса .....	27
1.4 Отношения параметров – традиционные безразмерные числа.....	29
1.5 Энергетика течений, образующихся при контакте и погружении капли в жидкость .....	32
1.6 Система уравнений движения неизотермической многокомпонентной жидкости переменной плотности.....	36
1.7 Требования к методике эксперимента.....	38
1.8 Выводы к первой главе .....	39
<b>Глава 2. Методика эксперимента</b> .....	40
2.1 Традиционные методы визуализации течений при падении капель в жидкость .....	40
2.2 Экспериментальная установка .....	42
2.3 Теневая визуализация течений, сопровождающих погружение капли в жидкость .....	50
2.4 Высокорастворяющий датчик электропроводности .....	52
2.5 Выводы ко второй главе.....	58
<b>Глава 3. Экспериментальные исследования картины течений, инициированных погружением свободно падающей капли в покоящуюся жидкость</b> .....	59
3.1 Основные компоненты течений .....	59
3.2 Динамика погружающейся капли. Скорость линии контакта .....	63
3.3 Циклические эффекты в выбросе брызг.....	68

3.4 Капиллярные волны на поверхности погружающейся капли и разлетающиеся брызги .....	69
3.5 Эволюция формы каверны и венца.....	77
3.6 Выводы к третьей главе .....	81
<b>Глава 4. Распределение вещества капли в принимающей жидкости .....</b>	<b>83</b>
4.1 Линейчатые структуры в картине распределения вещества капли при погружении капель жидкости, смешивающейся с принимающей жидкостью... ..	83
4.2 Тонкая структура картины погружения капель несмешивающихся жидкостей .....	104
4.3 Погружение капель эмульгированных жидкостей и суспензий.....	106
4.4 Выводы к четвертой главе .....	113
<b>Глава 5. Динамика и геометрия течений, образующихся в результате погружения капли в жидкость .....</b>	<b>115</b>
5.1 Влияние высоты свободного падения капли окрашенной жидкости на картину всплеска.....	116
5.2 Влияние коэффициента поверхностного натяжения и качества поверхности принимающей жидкости на картину течений .....	124
5.3 Влияние вязкости на картину распределения вещества капли по деформированной поверхности принимающей жидкости .....	131
5.4 Влияние профиля дна на картину растекания окрашенной капли .....	133
5.5 Выводы к пятой главе.....	136
<b>Основные результаты и выводы .....</b>	<b>138</b>
<b>Литература.....</b>	<b>141</b>

## Аннотация

Методами макрофотосъемки и высокоскоростной видеосъемки исследована эволюция картины течения, возникающего в процессе погружения свободно падающей капли в глубокую жидкость. Основное внимание уделено механизмам энерго- массопереноса и тонким быстропротекающим компонентам течений, сопровождающих традиционно изучаемые компоненты течений во всех фазах процесса, а также влиянию параметров задачи на картины течений и распределение вещества капли.

Проведены параметризация и масштабный анализ задачи, который позволил сформулировать требования к методике эксперимента. Использование разработанной высокоразрешающей методики позволило визуализировать течения, возникающие на поверхности погружающейся капли вблизи контактной линии с принимающей жидкостью в связи со столкновением мелких капелек, вылетающих из области контакта, с поверхностью капли. Направление разлета брызг и стримеров определяется значениями коэффициентов поверхностного натяжения жидкостей капли и принимающей среды. Определены условия, при которых брызги попадают на поверхность капли.

Рассмотрены картины распределения вещества капли по деформированной поверхности принимающей жидкости для случаев взаимодействия смешивающихся и несмешивающихся жидкостей, а также при погружении в жидкость капель эмульсий и суспензий. Впервые установлено, что на поверхности каверны и венца вещество капли, смешивающееся с принимающей жидкостью, 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.

Линейчатые структуры наблюдаются во всех фазах процесса погружения капли, вплоть до прекращения течений, обусловленных падением капли, и в широком диапазоне параметров и условий задачи (высоты падения капли, вязкости, толщины слоя принимающей жидкости, формы дна).

Несмешивающиеся жидкости покрывают поверхность каверны более равномерно. Положение границы центрального пятна и характер финального растекания капельного вещества зависит от отношения коэффициентов поверхностного натяжения жидкостей и, в частности, от состояния поверхности принимающей жидкости: чистой, запыленной или покрытой тонкой нефтяной пленкой.

Образование тонких структур течений связывается с быстрым освобождением доступной потенциальной поверхностной энергии, которое происходит в тонком слое при уничтожении свободных поверхностей сливающихся жидкостей. Как следствие, и в случае смешивающихся, и несмешивающихся жидкостей, в быстрых вылетающих капельках (брызгах) всегда присутствуют обе контактирующие среды.

## Введение

В работе приводятся результаты экспериментального исследования гидродинамики всплеска капли. Основное внимание уделено визуализации мелкомасштабных компонентов течений, которые дополняют общеизвестные элементы и наблюдаются на всех стадиях процесса: от соприкосновения капли с принимающей жидкостью до растекания вещества капли в толще (смешивающиеся жидкости) или по поверхности принимающей жидкости (несмешивающиеся). Исследована картина распределения вещества капли в принимающей жидкости, определено влияние основных параметров задачи на картины течения, механизмы энерго- массопереноса.

Интерес к изучению процессов, инициированных падением капель в жидкость или столкновением с поверхностью твердого тела, который возник еще в античные времена, сохранился до настоящего времени в силу распространенности явления в природе и современных технологиях. На протяжении всей истории, образы, навеянные выразительными картинами течений, активно использовались в искусстве, дизайне, архитектуре.

Практический и научный интерес к явлению всплеска капли при столкновениях капель с поверхностью жидкости обусловлен фундаментальностью данной задачи гидродинамики, а также широким диапазоном масштабов природных и технологических процессов. Капли участвуют в процессах, характеризующихся широким диапазоном пространственно-временных масштабов: от масштабов порядка размеров первичной капли и вторичных брызг (перенос вещества мелкими брызгами, излучение звука [1]), до глобальных в размерах Земли (климатические факторы облаков). Эффекты столкновения капель с поверхностью жидкостей играют важную роль в переносе вещества из гидросферы в атмосферу и обратно. 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 [2], влияют на распространение массовых инфекций [3].

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. 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, очистки воздуха, акустики, экологии, биологии и медицины. Примерами промышленных приложений являются: металлургические процессы высокоинтенсивного плавления металлов и инъекции газа в процессе выплавки [4, 5], струйное напыление покрытий [6], инъекция твёрдых частиц в расплавы металлов, дренаж газа из расплавленной массы [7], охлаждение разбрызгиванием [8], интенсификация пузырькового кипения [9, 10], впрыск топлива в двигателях внутреннего сгорания [11].

Довольно важным практическим применением на сегодняшний день является технология струйной печати [12], которая широко используется не только в обычных струйных принтерах, но и в микроэлектронике для пайки контактов жидкими частицами различных металлических сплавов. Также изучение процессов взаимодействия капель с жидкостью важно для решения таких проблем, как эрозия почвы под ударным воздействием дождевых капель [13-15], перемещение газов вдоль поверхности раздела атмосфера-океан [16], распыление пестицидов [17], предотвращение пожаров [18, 19], аэрация [20] и столкновение метеоритов с твёрдыми объектами [21]. В промышленных приложениях обычно фигурируют негативные последствия столкновений капель с жидкостью, от которых стараются избавиться теми или иными способами. К примеру, частые удары капель могут служить причиной эрозии в турбинах и двигателях. В производстве быстролетающие капли жидкой массы могут увлекать с собой пузырьки, ухудшающие качество напылений и покрытий. Процесс

увлечения пузырьков играет положительную роль в аэрации, и используется насыщения водоёмов и озёр кислородом. Процессы удара капли о жидкость также используются в биохимии: плавающие на поверхности жидкости капли могут служить контейнерами для реагирующих веществ в биохимических реакциях [22]. Увлечение пузырьков газа ударяющейся каплей может оказывать негативное воздействие на работу клеточных биохимических реакторов [23].

Научное изучение гидродинамики капельных течений началось с середины XIX века, когда У. Роджерс описал несколько способов создания вихревых колец в жидкостях и газах, в число которых включил в качестве источника падающие капли [24]. В дальнейшем исследования были продолжены в Великобритании, где Томпсон и Ньюэл, используя искровые источники света, смогли выделить группы веществ, образующих вихри в толще жидкости и погружающихся в компактной форме, рассмотреть и описать процесс отрыва волокон с краёв нестабильного кольца [25].

На проникающую способность вихревых колец влияет форма капли (вытянутая капля порождает кольцо с большей проникающей способностью, а сплюснутая – с меньшей [26, 27]), высота падения (при меньших числах Фруда и Вебера наблюдаются кольца с большей проникающей способностью, что связано с видом формирующегося кратера и перераспределением энергии столкновения [28]) и коэффициент поверхностного натяжения [29]. Изучению процесса перераспределения вещества свободно падающей окрашенной капли в вихревое кольцо и, далее, в каскад вихревых колец, связанных отдельными петлями до настоящего времени уделяется большое внимание [30].

Классификацию элементов картин течений, включающую собственно погружающуюся каплю, разлетающиеся брызги, венец с краевым шевроном, последовательно вылетающие в воздух сравнительно толстую кумулятивную струю и тонкий стример, группы капиллярных волн представил в своих фотографиях Вортингтон [31], который был первым, кто применил технику мгновенной фотографии к изучению всплесков, порождаемых каплями, ударяющимися о жидкость. Поставленный в его работах вопрос о природе

формирования и величине скорости течений в области падения капли, все еще остается без ответа. Классификация наблюдаемых режимов течений (при различных значениях безразмерных параметров – чисел Вебера и Фруда), включающая слияние, отскок, разбрызгивание, образование кумулятивной струи и тонких стримеров, значительно позднее была приведена в работе [32].

Моделирование динамики растекания капли и формирования каверны с учетом уничтожения части свободной поверхности и появления новой – одна из наиболее сложных задач современной теоретической гидромеханики, решение которой отыскивается аналитическими [33] и численными методами [34], а также в ходе целенаправленных опытов [35].

Методика опытов, начиная с первых работ [25], разрабатывается в предположении осесимметричности и капли, и возникающих в принимающей жидкости течений. В этой связи наблюдения преимущественно проводятся в вертикальной плоскости. Подходящий выбор линии визирования позволяет одновременно наблюдать каверну в толще жидкости [36], а также венец и вылетающие струйки над ее поверхностью [30]. В программах расчета течений также используется предположение об осевой симметрии поля скоростей [37] и однородного распределения вещества капли по поверхности принимающей жидкости [38, 39].

Информативность картин течений возрастала по мере совершенствования осветительной и фотографической техники. Уже в первых работах, в которых использовался искровой источник света, удалось установить влияние уничтожения свободной поверхности на структуру и динамику течений – капли растворяющихся окрашенных жидкостей трансформируются в вихревые кольца, в отличие от несмешивающихся [25, 31]. Повышение яркости источников света и разрешающей способности фотографической техники позволило уточнить детали структуры на всех фазах эволюции течений при падении капли в жидкость [40]. Повышение разрешающей способности регистрирующей аппаратуры, позволяющее уточнить детали структуры течений, показало, что диск первичной

пелены может быть и плоским, и деформированным [41] в зависимости от свойств жидкостей.

Многообразие компонентов течений и их строгая зависимость от физических параметров задачи и условий опытов определяют широкий спектр исследований. Характер течений зависит от многих параметров задачи, и в первую очередь от размера капли и скорости в момент контакта (или высоты свободного падения), поэтому для описания условий эксперимента часто используются числа Вебера, Рейнольдса и Фруда, которыми задается режим течения.

Отрыв капли от сопла сопровождается возбуждением ее объемных осцилляций [32], которые сохраняются до столкновения с поверхностью принимающей жидкости. Форма осциллирующей капли (вытянутая, сплюснутая, сферическая [42]) в момент контакта зависит от высоты падения капли [25], влияет на динамику протекающих процессов, в частности на геометрию вылетающих брызг, наряду с физическими свойствами жидкостей и другими условиями экспериментов.

Интерес к углу приводнения обусловлен поиском критерия, определяющего переходный режим между отскоком и поглощением капли. Влияние угла падения рассматривалось совместно с числом Вебера для различных углов ( $10^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ ): пограничное значение числа Вебера  $We_{crit}(\theta)$  между отскоком ( $We < We_{crit}$ ) и коалесценцией ( $We > We_{crit}$ ) находится в диапазоне  $0.8 \leq We_{crit}(\theta) \leq 3$  [43-45].

Для чисел Вебера  $15 \leq We \leq 249$  [46] отскок наблюдался только при углах  $< 14^\circ$ . При углах  $\theta < 23^\circ$  и числах Вебера  $We < 140$  капля растекается по поверхности жидкости без видимого погружения в жидкость. При больших углах происходит частичное погружение капли в жидкость. Визуализированные картины соударения позволили исследовать процессы возникновения передней кромки венца и генерации капиллярных волн.

Угол падения влияет на массу вторичных капель (размеры и количество). По мере увеличения угла приводнения до  $\theta = 50^\circ$  значительно возрастает размер вторичных капель при практически неизменном количестве. При средних углах

( $50^\circ \leq \theta \leq 70^\circ$ ) уменьшаются размер и количество капель и при  $\theta > 70^\circ$  вторичные капли не возникают [47].

Численное моделирование процесса наклонного погружения капли в жидкость для случая глубокого и неглубокого бассейна для углов  $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$  проведено в [48]. При этом для случая неглубокого бассейна для всех углов наблюдалось образование вторичных капель, в случае же глубокого бассейна при углах более  $60^\circ$  образования вторичных капель не происходило.

В работах рассматривается падение капли в глубокую жидкость при различных значениях безразмерных комбинаций (например, чисел Вебера и Фруда [32]), в тонкий слой, или даже на твердую поверхность [49, 50].

При столкновении капель со слоями жидкости конечной толщины параметры всплеска и критерии его возникновения довольно сильно зависят от безразмерной толщины слоя жидкости  $h^* = h_l / D$ , где  $h_l$  – толщина слоя жидкости [51]. Критерий перехода между глубокой жидкостью и неглубокой определен в [52], где установлено, что для капель диаметром от 2.4 до 3.8 мм при глубине слоя жидкости более 25 мм ( $h_l / D > 8$ ) дно бассейнов перестает влиять на характер течений.

На неглубокой жидкости деформация каверны при достижении дна и соответствующее изменение геометрии венца и центральной струи рассмотрены в [53]. Критерий глубокой жидкости вводился уже в соответствии с диаметром каверны, формирующейся в результате падения капли: глубоким считался бассейн с  $h_l / R_c < 1.5$ , а мелким бассейн с  $h_l / R_c < 0.5$ , где  $R_c$  – диаметр каверны. Результаты были объединены и подтверждены в [54], где было установлено, что центральная струя достигает максимальной высоты тогда, когда толщина слоя жидкости равна радиусу кратера, образованного ударом капли, причем вязкость или поверхностное натяжение оказывают слабое влияние.

Параметры всплеска в неглубоком бассейне, критерии возникновения короны, отрыва от неё вторичных капель, а также общая масса возникающих вторичных капель в диапазоне  $0.0275 \leq h_l / D \leq 68$  рассматривались в [55], где

обнаружено, что безразмерная глубина довольно слабо влияет на параметры всплеска по сравнению с параметром столкновения  $K$  ( $K = We \cdot Oh^{-0.4}$ ), а также предложена эмпирическая формула, связывающая количество вторичных капель с параметром  $K$  и безразмерной глубины  $h^*$ .

Сильное влияние состава принимающей жидкости на динамику всплеска (при взаимодействии различных жидкостях) для глубин в диапазоне  $h^*$  от 0.7 до 8.4 отмечалось в [56]. Хотя в целом принципиальные черты зависимости от глубины бассейна, отмеченные в работе [52], прослеживались для каждой из жидкостей. Подробнее вопрос влияния различных жидкостей на параметры всплеска в зависимости от толщины слоя жидкости для глубин  $0.5 \leq h_l / D \leq 10$  изучен в работе [51], где использовались такие жидкости, как гептан, декан, гексадекан, дистиллированная вода, смесь 30% глицерина с 70% воды, метанол, н-пропанол и бутанол, экспериментальное исследование эволюции кратера и численное моделирование для случая неглубокой жидкости  $0.5 \leq h_l / D \leq 2$  проведены [38].

При наличии тонкой плёнки жидкости расширяющаяся кольцевая жидкая плёнка, наблюдаемая при столкновении с сухими твёрдыми поверхностями, трансформируется в корону. Процессы распада и образования вторичных капель также сильно отличаются в указанных двух случаях, что продемонстрировано в экспериментах [57 - 69].

Пороговое значение числа Вебера  $We_{cr}$ , при котором происходит образование брызг, стремится к минимуму при  $h^* < 0.1$  и зависит от вязкости жидкости и характеристик твёрдой поверхности под плёнкой и не зависит от толщины плёнки [60].

Критерии возникновения и распада короны в случае столкновения капель с тонкими плёнками жидкости  $h^* = 0.004 \div 0.14$  в общем случае зависят не только от безразмерной толщины плёнки, но и от параметра столкновения  $K$ .

Численному и аналитическому моделированию процесса соударения капли с тонким слоем жидкости посвящено большое количество работ [61-63]. Внимание

к процессам столкновения капли с тонкой пленкой (толщиной от нескольких микрометров до нескольких миллиметров) обусловлено широким многообразием практических приложений: напыление покрытий, эрозия лопаток турбин, впрыск топлива в двигателях внутреннего сгорания и эрозия почвы под ударным воздействием дождевых капель.

При сравнительно низких скоростях, большой вязкости или при очень маленьких диаметрах капель возможен режим полного слияния капли с принимающей жидкостью без образования струй, всплесков и вторичных капель. Критерием перехода между слиянием и всплеском является образование центральной струи – для случая глубокого бассейна, и образование вторичных капель – для случая твёрдой поверхности [32]. Переходный режим между полным слиянием капли и всплеском, который характеризовался появлением центральной струи жидкости, исследовался в ряде работ. Критерий подобия такого перехода задавался диапазоном значений чисел Фруда при заданном значении числа Рейнольдса [64], числа Вебера [65]. Позднее были введены числовые критерии, зависящие от чисел Вебера и Рейнольдса [66] или Вебера и Онезорге в широком диапазоне плотностей, вязкостей и коэффициентов поверхностного натяжения [67].

Слияние капли с принимающей жидкостью может происходить в несколько этапов – частичных слияний с формированием струй и вторичных капель меньшего размера при разрыве воздушной прослойки, препятствующей слиянию жидкостей. В экспериментах наблюдалось до восьми этапов частичного слияния [68]. Механизм частичного слияния объясняется действием на каплю капиллярных волн [69], поэтому для полного слияния необходимо, чтобы силы вязкого трения доминировали над силами поверхностного натяжения. По результатам экспериментальных и численных исследований в качестве критерия режима выбиралось число Онезорге (частичное слияние наблюдалось при значениях  $Oh < 0.026$  [69]) или, при взаимодействии разных жидкостей, совокупности чисел Бонда, Онезорге для первой и второй жидкости, отношения плотностей [70].

В картине эволюции течений, вызванных погружением капли в глубокую принимающую жидкость, в режиме формирования выраженной центральной кумулятивной струи, для сравнительно больших энергий капли, традиционно выделяются: первичная кольцевая пелена с семейством стримеров [42], каверна, форма и динамика которой исследована в большом числе работ [21, 71], и растущий венец с краевым шевроном. С вершин зубцов шеврона выбрасываются последовательности мелких капелек – брызги [72]. На боковых поверхностях венца [73] и вокруг него [74] на более поздних стадиях процесса наблюдаются система кольцевых капиллярных волн. В ходе погружения капли излучаются высокочастотные акустические сигналы (короткие пакеты), которые регистрируются и в жидкости, и в воздухе [75].

В экспериментальных, аналитических и численных исследованиях каверны, образованной каплями диаметром  $D \sim 0.5$  см, имеющими в момент соприкосновения скорости в диапазоне  $U = 1 \div 17$  м/с, основное внимание уделялось временным и пространственным масштабам эволюции каверны и влияющим параметрам. Механизмы переноса энергии из капли в принимающую жидкость являлись ключевым вопросом при определении максимального радиуса и глубины каверны. Выдвигались предположения о полном переходе кинетической и поверхностной энергий капли в потенциальную энергию каверны [21, 76], либо учитывалась только кинетическая энергия [77].

В аналитических работах максимальный размер определялся не только числами Фруда, но также Вебера и Бонда [78]. Экспериментальные исследования показали, что кинетическая энергия капли не полностью переходит в потенциальную энергию каверны [7, 79]. В работе [80] было отмечено существование капиллярной и гравитационной асимптотик, аналитическая модель строилась в промежуточном варианте при зафиксированной капиллярной длине, что позволило получить значения, соответствующие экспериментальным данным.

Детальное численное моделирование процесса формирования и развития кратера для случая неглубоких бассейнов [38] показало, что увеличение скорости удара капли при постоянной толщине слоя жидкости практически не влияет на

максимальную глубину кратера, а также на время её достижения. При этом поверхностное натяжение влияет на динамику схлопывания кратера и на его размер: чем больше поверхностное натяжение, тем меньше максимальная глубина кратера и тем раньше начинается его схлопывание.

После заполнения каверны и растекания венца в принимающей жидкости остается кольцевая впадина сложной геометрии (розетка), в центре которой постепенно формируется обратная струя, как достаточно толстая (кумулятивная [81]), так и тонкая – стример [1]. Верхняя часть струи, как правило, состоит преимущественно из жидкости капли. Также довольно часто из-за капиллярной неустойчивости с вершины этой струи отрываются вторичные капли, сравнимые по размеру с первоначальной [31]. Характер течений зависит от многих параметров задачи, и в первую очередь от размера капли и скорости в момент контакта (или высоты свободного падения).

В большинстве работ, посвященных изучению центральной струи, рассматриваются механизмы и условия формирования и динамика кумулятивной струи. Отмечается влияние глубины принимающей жидкости на высоту струи: при равенстве глубины слоя жидкости максимальной глубине каверны при заданных условиях высота обратной струи будет максимальной, поскольку в этом случае дно бассейна препятствует вертикальному течению жидкости в области дна каверны [54]. При постоянной глубине принимающей жидкости (глубокая жидкость) отмечается узкий диапазон скоростей капли, в котором высота струи максимальна (струя при этом очень тонкая и обычно разрушается с образованием нескольких вторичных капель), что связывается с увлечением пузырька в жидкость [75].

Аналитическое определение высоты и диаметра струи выполнено в предположении, что масса вытесненной в момент максимального расширения кратера жидкости формирует струю [80, 82]. Экспериментально установлено, что при уменьшении вязкости или увеличении числа Вебера [83] максимальная высота струи растёт, однако объём струи практически не зависит от физических параметров жидкости [82].

Большое внимание в современных работах уделено тонким компонентам течений, возникающим в области влияния капли с принимающей жидкостью, которые, обычно, рассматриваются в случае тонких пленок, однако формируются также и на поверхности глубокой жидкости. В результате численного моделирования [84] и экспериментально [41, 42, 85] было установлено, что пелена брызг, окружающая область контакта, формируется в несколько этапов. Практически мгновенно при контакте капли с жидкостью (в первые 100 мкс) из области контакта формируется тонкая эжекта [41], состоящая из подстилающей жидкости [42]. Механизмы образования и разрушения тонкой пелены и были рассмотрены в работах [42, 85]. Рассматривалось влияние на форму пелены значений числа Рейнольдса [84] и отношения вязкостей жидкостей [86]. В последнем случае было обнаружено, что если вязкость жидкости капли больше вязкости принимающей жидкости, то пелена окутывала каплю и замыкалась на её вершине, порождая бьющую вверх струйку, скорость которой была в 10 раз больше скорости капли.

На более поздних временах, спустя 500-1000 мкс, формируется второй слой пелены – ламелла, которая затем трансформируется в корону. Критерием формирования короны и критерием её распада с образованием вторичных капель служат числа Вебера [60], безразмерная толщина плёнки жидкости и параметр столкновения  $K$  [87]. Толщина короны практически не зависит от глубины слоя жидкости и от числа Вебера, в то время как высота короны зависит от числа Вебера, но при этом практически не зависит от глубины жидкости [88].

В вопросах о механизме неустойчивости короны и о регулярности её зубцов на основе экспериментальных исследований и численного моделирования выдвигаются предположения о возникновении неустойчивости Рэлея-Плато [34, 89] (однако высокорегулярные картины зубцов были получены только для малых чисел Рейнольдса), неустойчивость Рихтмайера-Мешкова [90, 91] (импульс вязких напряжений приводит к неустойчивости и дальнейшему формированию зубцов) или имеют место оба механизма. Первый механизм даёт большой вклад в начальный момент контакта капли с жидкостью, когда происходит резкое

торможение из-за вязкости, а второй - в более поздние моменты времени, когда уже начинается формирование зубцов и струй [92].

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, как высокочастотных на стадии первичного контакта жидкостей [75], так и более низкочастотные, излучаемые газовыми полостями, которые образуются в ходе эволюции течений [1].

Совершенствование техники приема акустических сигналов способствовало регистрации звука, вызванного падением капли в жидкость. В начале XX века звук, вызванный падением капель в воду, был зарегистрирован в воздухе [93], а позднее, с появлением гидрофонов, – и в воде. Довольно быстро был замечен тональный характер сигналов, который позволил идентифицировать в качестве источника звука газовые пузырьки [94]. Механизм возбуждения колебаний пузырьков, излучающих высокочастотный звук, все еще продолжает изучаться как теоретически, так и экспериментально [75].

Уже в первых работах были замечены качественные отличия картин течений и характера переноса вещества при падении в жидкость капель смешивающихся и несмешивающихся жидкостей, таких как нефть, жидкие масла, различные неорганические жидкости [25, 31]. В опытах в частности, изучалось влияние на картину течения температуры принимающей жидкости с целью разработки новых средств тушения пожаров и профилактики пожарной безопасности [95, 96]. В частности, капли воды, которые часто используются при пожаротушении, попадая в разогретое масло, вскипают и выбрасывают большое число мелких капелек, образующих "масляный туман", который способствует усилению горения как в бытовых условиях, в частности, при приготовлении пищи в раскаленном масле [37, 96], так и при пожарах на нефтепромыслах и нефтепроводах [95]. Отмечено, что для возникновения вертикальной струи от удара капли при более высокой температуре требуется меньшее число Вебера. Эксперименты показали, что основное влияние на динамику всплеска оказывают

физические свойства жидкости: вязкость, поверхностное натяжение и смешиваемость, в то время как температура в основном определяет размер вторичных капель и высоту выброса центральной струи [96].

**Объектами исследования** являются свободно падающая капля и течения, образованные в процессе контакта и погружения капли в глубокую жидкость, тонкие компоненты и линейчатые структуры распределения вещества капли. **Предмет исследования** – высокоразрешающая регистрация картин течения, перенос массы капли в принимающую жидкость, влияние параметров задачи и условий опытов на картину течений, определение роли поверхностной потенциальной и кинетической энергий капли в структуре всплеска.

**Цель работы** – изучение эволюции 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 при помощи теневых приборов.

**Основные положения, выносимые на защиту**

1. При отрицательных значениях относительного коэффициента поверхностного натяжения на поверхности погружающейся капли наблюдаются группы коротких капиллярных волн, образованных попадающими брызгами.

2. 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 фаза процесса.

3. Брызги всегда содержат вещества взаимодействующих сред – падающей капли и принимающей жидкости. Процессы образования тонких структур и выброса брызг связаны с быстрым высвобождением доступной потенциальной энергии, сосредоточенной в тонком приповерхностном слое.

**Научная новизна работы** состоит в следующем:

1. Семейства капиллярных волн наблюдаются не только на поверхности покоящейся жидкости, но и на отдельных структурных компонентах – поверхности выступающего венца, первичной каверны, и даже на поверхности погружающейся капли. 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 как от параметров взаимодействующих жидкостей, так и от условий эксперимента.

3. 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.

4. Вещество капли, несмешивающееся с принимающей жидкостью, растекается более равномерно по поверхностям венца и каверны.

5. Положение границы центрального пятна несмешивающейся жидкости зависит от степени чистоты поверхности принимающей жидкости.

6. Все наблюдаемые вихревые системы характеризуются тонкой волоконной структурой.

7. 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 [114, 115, 121, 122], 1 статья в журнале, не входящим в список ВАК [120], и 11 работ, включенных в материалы школ и конференций. Во всех работах экспериментальные исследования и обработка данных выполнены диссертантом, обсуждения и анализ результатов осуществлены 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 [114, 115, 120-122], является результатом совершенствования автором

экспериментальной установки и проведения экспериментальных работ. В [114, 115] автором были определены группы веществ, для которых на поверхности погружающейся капли обнаруживаются капиллярные волны, измерены длины волн и рассчитаны фазовые скорости. В работах [120, 121] 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 [121] автором прослежена эволюция геометрии каверны и венца. Результаты проведенных автором экспериментов в стратифицированной среде с использованием датчика электропроводности приведены в работе [122].

**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.

# Глава 1. Теоретические основы исследования течений, образующихся при погружении каплей в толстый слой жидкости

## 1.1 Размерные параметры задачи

Структуры течений, возникающих при слиянии свободно падающей капли с принимающей жидкостью (рис. 1.1), 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  $T_d = T_t = T_a$ ).

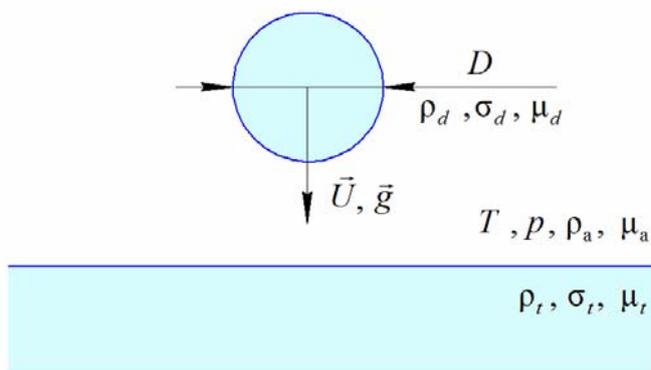


Рис. 1.1 Постановка и размерные параметры задачи

Значения параметров жидкостей, использованных в экспериментах при температуре 20°C, приведены в табл. 1.

Табл.1.

Жидкость \ Параметр	Плотность $\rho, \text{г} \cdot \text{см}^{-3}$	КПН $\sigma, \text{г} \cdot \text{с}^{-2}$	Норм. КПН $\gamma, \text{см}^3 \cdot \text{с}^{-2}$	Вязкость $\mu, \text{г} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$
Вода	1.00	73	73	0.01
Раствор соли (26%)	1.18	75	72	0.02
Раствор этанола (40%)	0.94	27	29	0.03
Масло подсолнечное	0.92	33	36	0.55
Нефть	0.87	30	34.5	0.07
Молоко (3% жирности)	1.029	54	52.5	0.018
Молочные сливки	1.02	46.4	45.5	0.27
Глицерин				
• 100%	1.261	63.4	50.28	15
• 99%	1.258	63.5	50.5	11.5
• 90%	1.235	64.2	52	2.35
• 60%	1.153	67.5	58.5	0.11
• 40%	1.1	69.8	63.5	0.038
Касторовое масло	0.96	35.4	36.9	9.87
Уксусная кислота (9%)	1.014	55	54.2	0.012

Условия опытов задают диаметр  $D$  и скорость  $U$  капли в момент первичного контакта, глубина слоя жидкости  $h_l$  и форма дна (для «мелкой воды»). Капля в данных опытах свободно падала с высоты  $H$  в однородном поле силы тяжести с ускорением  $g$ . Сферическая капля массой  $M = \frac{\pi}{6} \rho D^3$  с площадью свободной поверхности  $S_d = \pi D^2$  падает 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.

## 1.2 Система уравнений движения. Начальные и граничные условия

В качестве основы математического (аналитического и численного) и экспериментального моделирования процессов столкновения капли с жидкостью в работах встречаются как полная система балансных уравнений, включающая уравнения неразрывности, переноса импульса, энергии и вещества [97], так и упрощенные модели, частично учитывающие эффекты диссипации и поверхностного натяжения [98], и даже приближение идеальной жидкости [71].

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 [97]

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \rho \mathbf{v} &= 0, \quad \operatorname{div} \mathbf{v} = 0 \\ \frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \nabla) \rho \mathbf{v} &= -\nabla P + \rho \mathbf{g} + \mu \Delta \mathbf{v} \end{aligned} \quad (1.1)$$

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

$$z = \zeta(x, y, t) \quad (1.2)$$

выполняются динамические условия взаимной компенсации всех действующих на поверхность сил

$$\left( P_1 - P_2 - \sigma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \right) \nabla_i \zeta - (\sigma_1^{ij} - \sigma_2^{ij}) \nabla_j \zeta = 0 \quad (1.3)$$

или формулы Лапласа на границе покоящихся сред

$$\left( P_1 - P_2 = \sigma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \right)_i \quad (1.4)$$

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

$$\mathbf{v} \cdot \nabla (z - \zeta) = \frac{\partial \zeta}{\partial t}, \quad \mathbf{v} \times \nabla (z - \zeta) = 0, \quad (1.5)$$

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 [99] или идеальной жидкости [100]. 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 (красителя) капли распределяются подобным образом.

В традиционной гидродинамике поверхностное натяжение учитывается в граничном условии на поверхности, разделяющей жидкость и газ [97]. 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 ( $\text{г}/\text{с}^2$ ) эквивалентна традиционной энергетической размерности (в системе CGS –  $[\sigma] = \text{эрг}/\text{см}^2$ ).

### 1.3 Собственные линейные и временные масштабы процесса

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 [97], и диссипативно-капиллярные масштабы  $\delta_\gamma^v = v^2/\gamma$ ,  $\delta_\gamma^k = \kappa^2/\gamma$ . В литературе встречаются и другие масштабы, типа  $\delta_g^v = \sqrt[3]{v^2/g}$  [101], 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  $\delta_d^U = U_d^2/g$ , а также тонкие капиллярный  $\delta_U^\gamma = \gamma/U_d^2$  и прандтлевы  $\delta_U^v = v/U_d$  и  $\delta_U^k = \kappa/U_d$  масштабы (значения приведены в табл. 2).

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

Таблица 2. Масштабы длины и скорости

Масштаб Жидкость	$\delta_g^U$ , см	$\delta_g^\gamma$ , см	$\delta_U^\gamma$ , см	$\delta_U^v$ , см	$\delta_\gamma^v$ , см	$U_v^\gamma$ , м/с
Вода	63.8	0.27	$12 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$14 \cdot 10^{-7}$	73
Раствор соли	63.8	0.27	$13 \cdot 10^{-4}$	$64 \cdot 10^{-6}$	$36 \cdot 10^{-7}$	45
Раствор этанола (40%)	63.8	0.18	$5 \cdot 10^{-5}$	$12 \cdot 10^{-5}$	$28 \cdot 10^{-6}$	10.7
Подсолнечное масло	63.8	0.19	$58 \cdot 10^{-5}$	$24 \cdot 10^{-4}$	0.01	0.6
Касторовое масло	63.8	0.19	$5.9 \cdot 10^{-4}$	$4.1 \cdot 10^{-2}$	3	0.036
Нефть	63.8	0.19	$55 \cdot 10^{-5}$	$32 \cdot 10^{-5}$	$19 \cdot 10^{-5}$	4.3
Молоко (3% жирности)	63.8	0.23	$84 \cdot 10^{-5}$	$68 \cdot 10^{-6}$	$55 \cdot 10^{-7}$	31
Молочные сливки	63.8	0.22	$73 \cdot 10^{-5}$	$10^{-3}$	$15 \cdot 10^{-4}$	1.8
Глицерин						
• 100%	63.8	0.23	$8 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-2}$	2.8	0.04
• 99%	63.8	0.23	$8 \cdot 10^{-4}$	$3.7 \cdot 10^{-2}$	1.7	0.06
• 90%	63.8	0.23	$8 \cdot 10^{-4}$	$7.6 \cdot 10^{-3}$	0.07	0.27
• 60%	63.8	0.24	$9.4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$17 \cdot 10^{-5}$	5.9
• 40%	63.8	0.26	$10^{-3}$	$14 \cdot 10^{-5}$	$18 \cdot 10^{-6}$	19
Уксусная кислота (9%)	63.8	0.23	$87 \cdot 10^{-5}$	$4.8 \cdot 10^{-5}$	$26 \cdot 10^{-7}$	45

В маловязких средах значения масштабов, приведенные в таблицах 2, 3, существенно различаются. Для воды наибольший и наименьший масштабы длины равны  $\delta_{\min} = \delta_\gamma^v = 1.4 \cdot 10^{-6}$  см и  $\delta_{\max} = \delta_g^\gamma = 0.27$  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 базовых линейных и временных масштабов формируют характерные скорости  $U_v^\gamma = \gamma/v$  (значения приведены в табл. 2) и  $U_\kappa^\gamma = \gamma/\kappa$ , которые используются для параметризации процессов в ряде работ [102].

Таблица 3. Масштабы времени

Жидкость \ Масштаб	$\tau_v^D, \text{с}$	$\tau_g^U, \text{с}$	$\tau_\gamma^d, \text{с}$	$\tau_\gamma^\gamma, \text{с}$	$\tau_U^d, \text{с}$	$\tau_v^\gamma, \text{с}$	$\tau_\gamma^v, \text{с}$
Вода	17.64	0.25	0.032	0.017	$17 \cdot 10^{-4}$	$58 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-10}$
Раствор соли	13.23	0.25	0.037	0.017	$18 \cdot 10^{-4}$	$10^{-4}$	$7.9 \cdot 10^{-10}$
Раствор этанола (40%)	3	0.25	0.029	0.014	$12 \cdot 10^{-4}$	$28 \cdot 10^{-5}$	$2.6 \cdot 10^{-8}$
Подсолнечное масло	0.17	0.25	0.035	0.014	$14 \cdot 10^{-4}$	$58 \cdot 10^{-4}$	$17 \cdot 10^{-5}$
Касторовое масло	0.011	0.25	0.033	0.014	$14 \cdot 10^{-4}$	0.1	0.8
Нефть	1.2	0.25	0.029	0.014	$12 \cdot 10^{-4}$	$72 \cdot 10^{-5}$	$43 \cdot 10^{-8}$
Молоко (3% жирности)	8.5	0.25	0.032	0.015	$15 \cdot 10^{-4}$	$12 \cdot 10^{-5}$	$18 \cdot 10^{-10}$
Молочные сливки	0.5	0.25	0.032	0.015	$14 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$85 \cdot 10^{-7}$
Глицерин							
• 100%	0.013	0.25	0.036	0.015	$16 \cdot 10^{-4}$	$95 \cdot 10^{-3}$	$67 \cdot 10^{-2}$
• 99%	0.018	0.25	0.036	0.015	$16 \cdot 10^{-4}$	$73 \cdot 10^{-3}$	0.3
• 90%	0.084	0.25	0.035	0.015	$16 \cdot 10^{-4}$	$15 \cdot 10^{-3}$	$25 \cdot 10^{-4}$
• 60%	1.68	0.25	0.034	0.016	$16 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-7}$
• 40%	5.2	0.25	0.034	0.016	$17 \cdot 10^{-4}$	$22 \cdot 10^{-5}$	$10^{-8}$
Уксусная кислота (9%)	12	0.25	0.032	0.015	$15 \cdot 10^{-4}$	$84 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-10}$

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.

#### 1.4 Отношения параметров – традиционные безразмерные числа

Отношения характерных масштабов образуют наборы безразмерных комбинаций, включающие традиционные числа: Рейнольдса (характеризующие движение капли  $Re_d = UD/v_d$  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  $L_t$ ,

$$\text{Фруда } Fr_d = U^2 / gD,$$

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

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

$$\text{Онезорге } Oh = \sqrt{\delta_\gamma^\nu / D} = \nu / \sqrt{\gamma D},$$

и так называемое капиллярное отношение  $Ca_U^\nu = U / U_\nu^\gamma$ ,  $Ca_U^\kappa = U / U_\kappa^\gamma$ .

Таблица 4. Определяющие безразмерные параметры задачи

Жидкость \ Число	Re	Wb	Fr	Bo	Oh	Ca <sub>U</sub>
Вода	10500	400	140	2.4	$18 \cdot 10^{-4}$	0.034
Раствор соли NaCl	7200	400	140	2.9	$28 \cdot 10^{-4}$	0.056
Раствор этанола (40%)	2500	1000	160	2.8	$97 \cdot 10^{-4}$	0.26
Подсолнечное масло	146	600	180	3.35	$17 \cdot 10^{-2}$	4.2
Касторовое масло	8.3	580	190	3.1	2.9	70
Нефть	1000	560	200	2.73	$24 \cdot 10^{-3}$	0.58
Молоко (3% жирности)	5400	450	170	2.7	$38 \cdot 10^{-4}$	0.08
Молочные сливки	340	500	180	2.8	$64 \cdot 10^{-3}$	1.43
Глицерин						
• 100%	8.4	500	160	3.1	2.65	59
• 99%	11	500	160	3.1	2.04	45
• 90%	53	480	160	3	0.42	9
• 60%	1070	440	155	2.8	0.02	0.43
• 40%	3000	410	150	2.7	$66 \cdot 10^{-4}$	0.13
Уксусная кислота (9%)	8000	440	170	2.6	$26 \cdot 10^{-4}$	0.055

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 [41]:

- 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 экспериментах принимали как положительные, так и отрицательные значения (табл. 5). Особое внимание в работе было уделено влиянию отношения коэффициентов поверхностного натяжения на тонкую структуру и динамику течения.

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	Раствор соли NaCl (24%)	Вода	0.46	-0,083	-0,014	-0,33
3	Раствор этаноло (40%)	Вода	0.3	0,031	0,46	-0,5
4	Вода	Раствор этаноло (40%)	0.42	-0,031	-0,46	0,5
5	Молоко (3% жирности)	Вода	0.38	-0,014	0,15	-0,29
6	Уксусная кислота (9%)	Вода	0.38	-0,007	0,14	-0,09

№	Капля	Принимающая жидкость	Диаметр капли $D_d$ , см	Отношения		
				плотностное, $R_\rho$	капиллярное, $R_\sigma$	вязкостное, $R_\mu$
7	Вода	Подсолнечное масло	0.42	-0,042	-0,38	0,96
8	Подсолнечное масло	Вода	0.32	0,042	0,38	-0,96
9	Касторовое масло	Вода	0.34	0,02	0,35	-1
10	Нефть	Вода	0.31	0,07	0,42	-0,75
11	Молочные сливки	Вода	0.36	-0,01	0,22	-0,93
12	Вода	Молочные сливки	0.42	0,01	-0,22	0,93
13	Глицерин	Вода				
	• 100%		0.4	-0,12	0,07	-1
	• 99%		0.4	-0,11	0,07	-1
	• 90%		0.4	-0,1	0,06	-1
	• 60%		0.41	-0,07	0,04	-0,83
	• 40%		0.42	-0,05	0,02	-0,58

### 1.5 Энергетика течений, образующихся при контакте и погружении капли в жидкость

В течениях вязкой жидкости происходит диссипация механической энергии движения жидкости и передача энергии процессам теплопроводности. Для описания состояния сплошной среды вдали от ее границ, наряду с термодинамическими величинами (энтропией  $s$ , плотностью и удельным объемом  $V = 1/\rho$ , давлением  $P$ , температурой  $T$ ) используются следующие термодинамические потенциалы:

$$\text{энергия } dE = Tds - PdV ; \quad (1.6)$$

$$\text{тепловая функция (энтальпия) } dW = Tds = VdP \quad (1.7)$$

$$\text{свободная энергия (потенциал Гельмгольца) } dF = -sdT - PdV \quad (1.8)$$

$$\text{и свободная энтальпия (потенциал Гиббса) } dG = -sdT + VdP . \quad (1.9)$$

При описании свободных течений вдали от границ из четырех эквивалентных представлений выбирается потенциал Гиббса, из которого простым дифференцированием определяется плотность среды

$$\rho = (V)^{-1} = (\partial G / \partial P)_s^{-1} \quad (1.10)$$

Современный вывод формулы Лапласа, входящей в граничное условие (1.3) 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, отличающуюся от объемной фазы жидкости наличием дополнительного члена в выражении для термодинамического потенциала  $dG_b = \sigma dS_b$  в одной из сред [103].

Одинаковые размерности коэффициента  $[\sigma] = \text{г/с}^2$ , 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 (1.4), и дополнительную энергию  $dG_\sigma = \sigma dS_b$ , входящую в потенциал Гиббса [103] и другие термодинамические потенциалы.

$$dG_\sigma = -sdT + VdP + \sigma dS_b. \quad (1.11)$$

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 [104]. При деформации границы с изменением площади контактной поверхности  $dS_b$  совершается работа  $dA = \sigma dS_b$  [97], знак которой зависит на значения производной площади свободной поверхности.

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 [105], что соотносится с диссипативно-капиллярным масштабом  $\delta_\gamma^v = v^2 / \gamma$ .

Значения отношений компонентов энергий для типичных значений параметров изучаемых процессов, приведенные табл. 6, 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.

Таблица 6. Значения кинетической и поверхностной 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	$2.3 \cdot 10^{-3}$
Молоко (3% жирность)	92	2.45	$3.2 \cdot 10^3$	$2.2 \cdot 10^6$	37.7	$1.5 \cdot 10^{-3}$
Молочные сливки	78	1.9	$3.2 \cdot 10^3$	$1.9 \cdot 10^6$	41.2	$1.7 \cdot 10^{-3}$
Глицерин						
• 100%	132	3.2	$3.9 \cdot 10^3$	$2.5 \cdot 10^6$	41.4	$1.6 \cdot 10^{-3}$
• 99%	132	3.2	$3.9 \cdot 10^3$	$2.5 \cdot 10^6$	41.4	$1.6 \cdot 10^{-3}$
• 90%	130	3.2	$3.9 \cdot 10^3$	$2.6 \cdot 10^6$	40.1	$1.5 \cdot 10^{-3}$
• 60%	130	3.6	$3.6 \cdot 10^3$	$2.7 \cdot 10^6$	36.5	$1.3 \cdot 10^{-3}$
• 40%	133	3.9	$3.4 \cdot 10^3$	$2.8 \cdot 10^6$	34.5	$1.2 \cdot 10^{-3}$
Касторовое масло	62	1.3	$3 \cdot 10^3$	$1.4 \cdot 10^6$	48	$2.1 \cdot 10^{-3}$
Уксусная кислота (9%)	91	2.5	$3.2 \cdot 10^3$	$2.2 \cdot 10^6$	36	$1.4 \cdot 10^{-3}$

Высокая скорость освобождения поверхностной энергии и ее сосредоточенность в тонком слое вещества указывает на возможное влияние данного процесса на процесс формирования структур течений.

Еще большие изменения атомно-молекулярной структуры вещества наблюдаются непосредственно на границе жидкость – газ, где среда может распадаться на ионные кластеры. Здесь в слое толщиной в несколько молекулярных размеров  $\delta_b \sim 10^{-8}$  см [105, 106] в выражении для термодинамического потенциала

$$dg_s = -sdT + VdP + \sigma dS_b + \mu_n dN_n \quad (1.12)$$

появляются дополнительные член, зависящие от химического потенциала и концентрации соответствующих компонентов  $\mu_n dN_n$  [107, 108].

Схематичное изображение распределения термодинамических потенциалов при погружении капли с учетом выделенных поверхностных и приповерхностных слоев на рис. 1.2, где учтен процесс освобождения доступной потенциальной энергии трансформации термодинамического потенциала в объемную форму для новой среды.

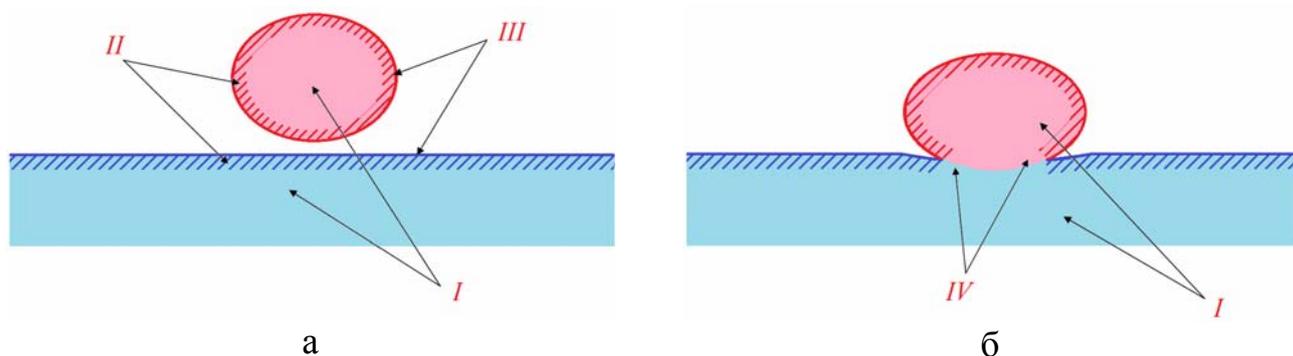


Рис. 1.2 Схема распределения термодинамических потенциалов: а) – полет капли; б) – начало процесса слияния (*I* – потенциал  $dG$  (1.9) в толще жидкости; *II* – потенциал  $dG_\sigma$  (1.11) в приповерхностном слое толщиной в молекулярный кластер; *III* – потенциал  $dG_s$  (1.12) непосредственно на границе раздела – поверхность молекулярного контакта жидкости с газовой фазой; *IV* – потенциал  $dG_2$  слившихся жидкостей в области соприкоснувшихся приповерхностных слоев, в которой доступная поверхностная потенциальная энергия трансформировалась во внутреннюю энергию и энергию интенсивных тонких течений)

Динамика процесса преобразования доступной поверхностной потенциальной энергии в тепловую и энергию механического движения зависит от формы контактных поверхностей в момент слияния контактирующих сред.

## 1.6 Система уравнений движения неизотермической многокомпонентной жидкости переменной плотности

Для описания процессов переноса вещества капли в принимающей жидкости необходимо оценивать изменения дополнительной физической величины – концентрации одного или нескольких веществ, первоначально содержащихся в капле, в принимающей среде  $S_i$ . Зависимость плотности  $\rho = \rho(P, T, S)$  от давления  $P$ , температуры  $T$  и концентрации растворенных веществ или взвешенных частиц  $S_i$  задается уравнением состояния, вид которого определяется эмпирически для каждой группы веществ. В линеаризованном описании плотность характеризуется коэффициентами термического расширения  $\alpha_T = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_{P, S}$ , концентрационного сжатия  $\alpha_S = \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial S} \right)_{P, T}$  и изотермической сжимаемости  $\alpha_P = \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_{T, S}$ . При этом в уравнении состояния учесть эффекты теплового расширения, сжимаемости и солевого сжатия, которые в линеаризованном

В предположении малости градиентов термодинамических величин и медленности протекающих процессов (оценки даны в [97]) уравнение неразрывности

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} + \operatorname{div} \mathbf{v} = 0$$

переходит в уравнение, связывающее дивергенцию скорости с вариациями термодинамических параметров, и принимает вид [109]

$$\operatorname{div} \mathbf{v} = -\alpha_P \frac{dP}{dt} + \alpha_T \frac{dT}{dt} - \alpha_S \frac{dSc}{dt}$$

В рамках линейной термодинамики неравновесных процессов и в предположении постоянства кинетических коэффициентов фундаментальная система уравнений механики неоднородных жидкостей принимает вид [97]

$$\operatorname{div} \mathbf{v} = -\alpha_P \frac{dP}{dt} + \alpha_T \frac{dT}{dt} - \alpha_S \frac{dSc}{dt} \quad (1.13)$$

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \nu\Delta\mathbf{v} + \left(\zeta + \frac{1}{3}\nu\right)\nabla\operatorname{div}\mathbf{v} + \mathbf{g} \quad (1.14)$$

$$\frac{dT}{dt} - \frac{\alpha_T T}{\rho c_P} \frac{dP}{dt} = \kappa_T \Delta T + \left(\frac{\partial\mu_S}{\partial S}\right)_{T,P} \frac{k_T \kappa_c}{c_P} \left(\Delta c + \frac{k_T}{T} \Delta T + \frac{k_P}{P} \Delta P\right) \quad (1.15)$$

$$\frac{dS}{dt} = \kappa_S \left(\Delta S + \frac{k_T}{T} \Delta T + \frac{k_P}{P} \Delta P\right) \quad (1.16)$$

Здесь  $\nu$  и  $\zeta$  – коэффициенты первой и второй кинематической вязкости, соответственно,  $\kappa_T$  и  $\kappa_c$  – коэффициенты теплопроводности и диффузии примеси,  $k_T$  и  $k_P$  – коэффициенты термо- и бародиффузии,  $c_P$  и  $\mu_c$  – удельная теплоемкость и химический потенциал среды. Поле ускорения свободного падения  $\mathbf{g}$  здесь постоянно и однородно. Уравнения должны быть дополнены начальными и граничными условиями, характеризующими условия конкретного эксперимента, и определяющими характерные вариации температуры  $\Delta T$  и концентрации примеси  $\Delta S$ .

Введение дополнительных переменных расширяет список характерных масштабов длины и времени, в котором появляются новые группы, включающие произведения всех выше приведенных масштабов на характерные безразмерные отношения – числа Прандтля  $Pr = \nu/\kappa_T$  и Шмидта  $Sc = \nu/\kappa_S$ . Для водных растворов солей металлов и некоторых красителей, которые использовались в проведенных опытах значения таких отношений невелико  $Pr \sim 10^{-2}$ ,  $Sc \sim 10^{-3}$ , следовательно, соответствующие им масштабы малы.

Кроме того, в перечне безразмерных отношений появляются новые группы, характеризующие соотношения между значениями глобальных возмущений в уравнении состояния (плотностные соотношения типа  $R_T = \alpha_T \Delta T / \alpha_S \Delta S$ ) и уравнениях переноса (типа глобального теплового  $Ra_T = g \alpha_T \Delta T L^3 / \nu \kappa_T$  и концентрационного  $Ra_S = g \alpha_T \Delta S L^3 / \nu \kappa_S$  чисел Рэлея).

Больше число дополнительных малых масштабов осложняет проведение теоретического анализа задачи распространения вещества капли в принимающей

жидкости и указывает на необходимость совершенствования методики опытов, которая должна позволять регистрировать общую картину течения и разрешать появляющиеся тонкие и короткоживущие компоненты течений, образующие тонкую воспроизводимую структуру среды. В публикациях в аналитических и численных исследованиях процесса погружения капли для упрощения описания обычно анализируются только два уравнения движения – неразрывности и скорости [36, 81, 99] в предположении осевой симметрии течения и равномерности распределения вещества капли по поверхности каверны и венца.

Длительность всего процесса погружения капли диаметром 0.3...0.5 см, падающей в момент контакта со скоростью 1.0... 2.5 м/с в жидкость составляет несколько миллисекунд, время формирования тонких структур (порядка сотых и тысячных долей см) еще более короткое, что необходимо учитывать при разработке методики опытов.

### **1.7 Требования к методике эксперимента**

Ввиду сложности и скорости изучаемого явления экспериментальные исследования гидродинамики всплеска капли должны проводиться преимущественно оптическими методами прямой визуализации с применением соответствующих оптических систем: макрообъективов и теневых приборов.

Значения характерных масштабов должны учитываться при разработке методики эксперимента: в выборе размеров поля наблюдения, которое должно быть достаточно большим, чтобы содержать все изучаемые компоненты течения, и обладать высоким пространственным и временным разрешением регистрирующей аппаратуры для визуализации мелкомасштабных компонентов течений.

Короткие времена протекания процесса ( $\tau \sim 10^{-3}$  с) обуславливает необходимость больших равномерных световых потоков для регистрации мелкомасштабных течений.

## 1.8 Выводы к первой главе

Наборы размерных параметров задачи гидродинамики всплеска капли формируют как свойства всех сред, участвующих в процессе, так и условия процесса. Отношения размерных параметров формируют набор чисел подобия и группы масштабов длины и времени, среди которых как зависящие только от параметров сред, так и включающие диаметр и скорость капли в момент контакта с принимающей жидкостью.

Диссипативно-капиллярные масштабы длины и времени  $\delta_\gamma^v = v^2 / \gamma$ ,  $\tau_\gamma^v = v^3 / \gamma^2$  оказываются сопоставимыми с толщиной приповерхностного слоя, в котором сосредоточена поверхностная потенциальная энергия, обусловленная анизотропией действия атомно-молекулярных сил на контактных границах, и временем уничтожения поверхностного слоя, за которое происходит высвобождение доступной энергии и преобразование в другие формы. Плотность поверхностной энергии существенно больше плотности кинетической энергии ввиду того, что поверхностная энергия сосредоточена в тонком слое. Таким образом, важную роль в формировании новых быстрых компонентов течений играет коэффициент поверхностного натяжения, входящий в термодинамический потенциал для приповерхностного слоя.

Полная система уравнений, описывающих динамику погружения капли и течения жидкостей, включает уравнения состояния сред, неразрывности, переноса импульса, полной энергии и вещества.

## Глава 2. Методика эксперимента

### 2.1 Традиционные методы визуализации течений при падении капель в жидкость

Исследования гидродинамики всплеска капли традиционно, начиная с первых работ, проводят с применением оптических методов прямой визуализации. Главные достоинства оптических измерений - высокая точность, пространственное разрешение, соизмеримое с длиной световой волны, и наглядность.

Оптические методы, являясь бесконтактными, не искажают поле плотности (температуры, концентрации); практически не имеют инерционных погрешностей, что позволяет исследовать быстро протекающие процессы; обеспечивают более высокую чувствительность и точность, чем другие методы; дают поле показателя преломления, которое путем последующих расчетов преобразуется в поле плотностей (или температур).

К недостаткам оптических методов относятся ограничения, связанные с требованием оптической прозрачности исследуемой неоднородности. Если оптические свойства среды отличны от воздушной, то необходима замкнутая система, причем стекла камеры должны обладать высокими оптическими свойствами. Для регистрации течений, возникающих при падении капли, в первых работах применялось фотографирование с использованием искровых источников света [25] или вспышек [21, 32].

В более поздних работах стали использоваться непрерывные и импульсные лазерные источники света в сочетании с высокоскоростной кино- и видеорегистрацией (быстродействие современных видеокамер достигает 1 млн. кадров/с [85] с выдержкой меньше 100 нс). Частотный спектр зондирующего электромагнитного излучения существенно расширен, и традиционные осветители в оптическом диапазоне были дополнены источниками рентгеновского излучения [41]. По мере повышения точности эксперимента

расширялся список устойчиво воспроизводимых структурных компонентов течений и уточнялись их классификации. Применение коротковолнового излучения позволило определить толщину первичной вылетающей пелены, которая в случае падения капли силиконового масла в силиконовое масло не превышала 0.1 мм [41]. С помощью высокоразрешающей регистрирующей аппаратуры установлено, что первичная пелена может быть и плоской, и закрученной в зависимости от вида жидкостей.

Усовершенствованные осветительные системы и регистрирующие инструменты позволяют более детально изучать процессы, происходящие при столкновении капли с твердыми препятствиями и поверхностями жидкостей, получать данные, необходимые для тестирования все более сложных математических моделей.

В экспериментальных и теоретических исследованиях процессов, сопровождающих погружение и всплеск капли в глубокой жидкости, как правило, используются одинаковые капельные и принимающие жидкости: невязкие [73], вязкие [41], суспензии [40] при различных значениях чисел подобия. Взаимодействие одинаковых по оптическим и физическим параметрам жидкостей не позволяет надежно определить картину переноса вещества капли в принимающую жидкость и в воздух с брызгами. В отдельных работах, посвященных исследованию распространения жидкости капли в толще принимающей жидкости, в капельную жидкость добавлялись жидкие красители [25].

Однако визуализация картины течений при погружении и всплеске капли в подавляющем большинстве работ осуществляется в боковой экспозиции, когда луч зрения направлен параллельно поверхности принимающей жидкости. Такая позиция регистрации не позволяет сформировать представление о полной трехмерной картине распределения вещества капли по деформированной поверхности принимающей жидкости в фазах погружения капли и формирования короны даже при добавлении красителей в капельную жидкость.

Разрабатываемая методика позволяет проводить регистрацию картины течения в широком диапазоне углов между траекторией движения капли и лучом зрения фотоаппарата.

## 2.2 Экспериментальная установка

Наиболее просто реализуемыми и в то же время эффективными методами визуализации картины течений являются методы фото- или видеорегистрации высокоскоростной камерой, которые позволяют одновременно и с достаточно высокой точностью визуализировать в целом всю картину течений, в том числе и быстрых, оценить геометрические параметры объектов исследования, наблюдать отдельные фазы процессов. Методы фотографирования могут использоваться как самостоятельно, для регистрации простых течений, так и в составе сложных экспериментальных комплексов (например, в теневых приборах).

Опыты выполнены на стенде ТБП, входящем в состав комплекса «УСУ ГФК ИПМех РАН», схематическое изображение которого приведено на рис. 2.1, а. Стенд состоит из следующих компонентов: 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 видимого диапазона 5, 6, защитные и отражающие экраны 8, дозатор капель 9. Конкретная реализация установки, вид и параметры ее составных частей зависят от задач экспериментального исследования.

В первых опытах с бесцветными жидкостями (вода, водные растворы спирта и поваренной соли) использовались стеклянные бассейны размерами  $30 \times 30 \times 5$  см и  $30 \times 50 \times 30$  см. Бассейны помещались в зеркальный короб с вырезами для капли и объектива фотоаппарата и стеклянной стенкой для осветителя, что обеспечивало экранирование от воздействия воздушных потоков, уменьшало нагрев и увеличивало освещенность исследуемой области.

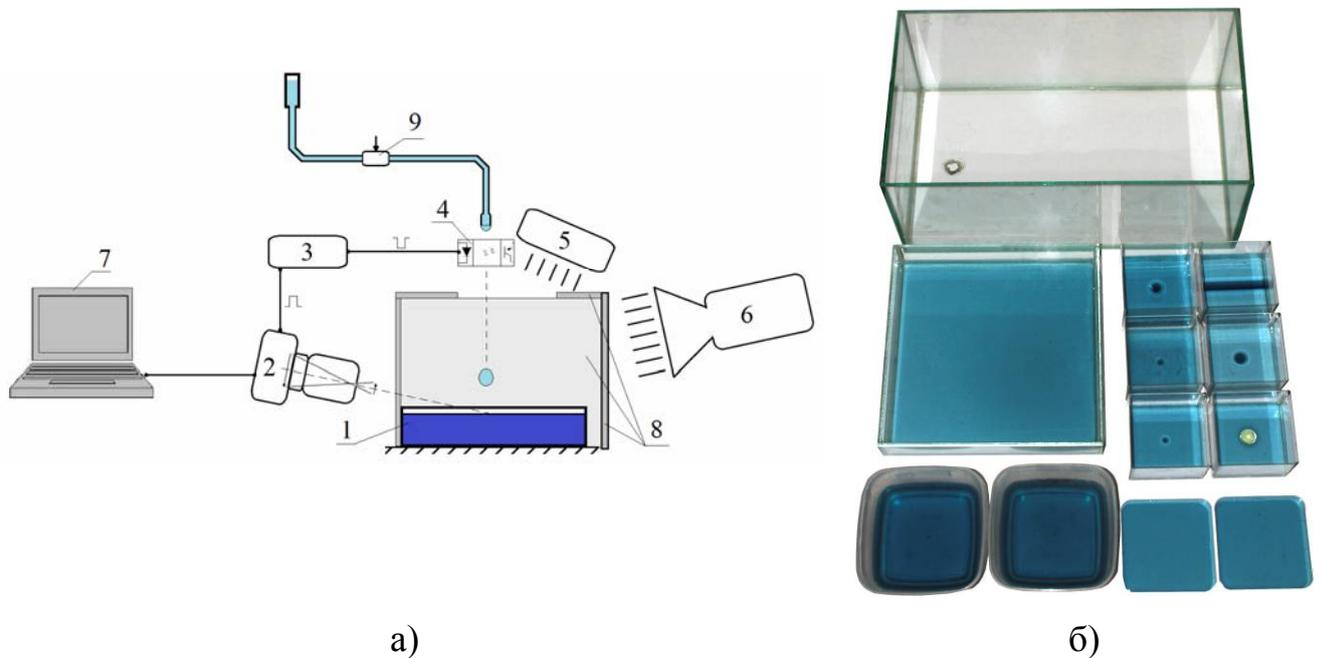


Рис. 2.1 Схема экспериментальной установки: 1 – бассейн, 2 – фото- (видео-) регистратор, 3 – блок управления, 4 – регистратор прохождения капли, 5, 6 – осветители, 7 – компьютер, 8 – защитные стенки, 9 – дозатор.

Опыты с подкрашенными каплями (водные растворы чернил, перманганата калия, медного и железного купороса, молоко, спиртовые растворы бриллиантовой зелени) и несмешивающимися жидкостями (окрашенные подсолнечное и касторовое масла, нефть) проводились с использованием ряда квадратных чашек Петри размером  $12 \times 12 \times 1.5$  см или глубоких емкостей размером  $16 \times 16 \times 8$  см для оперативной смены принимающей жидкости и обеспечения чистоты проведения эксперимента.

Для исследования влияния профиля дна на картину растекания жидкости капли по деформированной поверхности неглубокой жидкости ( $h_l < D$ ) были изготовлены кюветы с полусферическими и коническими углублениями (диаметры основания составляли 10 и 20 мм, угол при вершине  $60^\circ$ ), клиновидным вырезом (с углом раствора  $60^\circ$  и основанием 20 мм) и кювета, на дне которой располагался стеклянный шар диаметром 20 мм. Набор кювет и бассейнов установки ТБП, частично заполненных водным раствором ализариновых чернил, представлен на рис. 2.1, б.

Капельная жидкость помещалась в дозатор 9, который устанавливался на высоте  $H = 30 \div 260$  см над поверхностью принимающей жидкости, что соответствует режиму формирования выраженной обратной струи [32, 81]. С помощью дозатора регулировалась частота падения капель.

Область наблюдения освещалась постоянными источниками света видимого диапазона. Для освещения использовались студийные софиты ReyLab Xenos RH-1000 мощностью 1 кВт 6 и светодиодные источники Optronis MultiLED 5 со световым потоком 7700 лм, которые располагались над кюветами или сбоку от них. Требования к освещению и, следовательно, схема расположения осветительной техники и отражающих поверхностей задавались геометрией и масштабами исследуемых течений. В работе применялись схемы освещения в прямых и в отраженных лучах.

Регистрация картины течений проводилась видеокамерой Optronis CR3000x2, управляемой с компьютера, с частотой съемки от 4 до 40 тыс. кадров/с или фотоаппаратами Canon EOS350D 2 с объективами Canon EFS 18-55 мм и EF 50 мм. Фотоаппараты и видеокамера размещались на штативах с 5 степенями свободы. Настройка видеокамеры или фотоаппарата осуществляется с компьютера 7. Линия визирования регистрирующей аппаратуры в одних опытах проходила вдоль покоящейся поверхности принимающей жидкости, в других – составляла различные углы: незначительные отклонения (до  $5^\circ$ ) в обе стороны,  $20^\circ - 25^\circ$  к горизонту при съемке сверху (для исследования формы венца и распределения вещества капли по его поверхности),  $70^\circ - 75^\circ$  (регистрация сверху) для исследования распределения вещества капли по дну каверны. Расстояние от передней линзы фотоаппаратов до области регистрируемых течений составляла 7 - 8 см в большинстве экспериментов.

Для увеличения изображения использовались реверсивное кольцо JJC RR-EOS диаметром 58 мм и набор макроколец Canon толщиной 12, 20 и 36 мм в различных комбинациях, позволившие разрешать элементы с линейными размерами порядка 10 мкм. Состав набора дополнительных колец объектива определялись исходя из масштабов и местоположения регистрируемых

компонентов течений. Для разрешения воспроизводимых тонкоструктурных компонентов на фотоаппаратах устанавливалась минимальная выдержка  $1/4000$  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. Оптическое прерывание (рассеяние) позволяет детектировать отрыв капли без существенного воздействия на ее форму, состав, заряд и траекторию движения. Принципиальная блок-схема блока управления представлена на рис. 2.2.

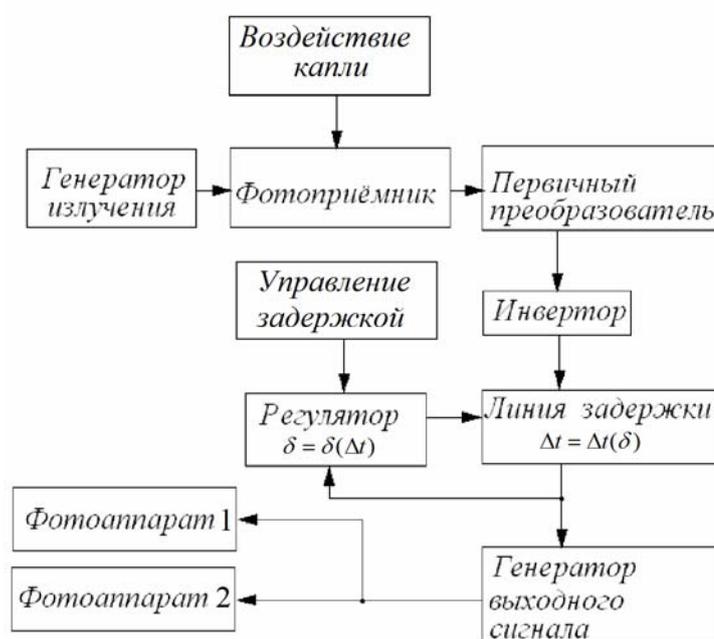


Рис 2.2 Принципиальная схема автоматизированной системы управления фоторегистраторами установки ТБП.

Фотоприемник регистрирует излучение (сигнал), поступающее от генератора излучения. При прохождении капли через оптическую ось генератор-приемник уровень сигнала стремится к нулю. Первичный преобразователь осуществляет усиление сигнала и преобразует его в двоичный код (формирует сигнал высокого +5 и низкого 0 уровней). Инвертор осуществляет преобразование сигнала из низкого уровня в высокий (из 0 в 1) и наоборот. Регулируемая линия задержки используется для обеспечения временного сдвига между моментом отрыва капли и срабатываем фотоаппарата при каждой последующей итерации, что позволяет



На схеме отмечены:

I – клеммы для подключения источника питания,

II – клеммы для подключения фотоаппарата 1,

III – фотоинтерраптор,

IV – контакты разъема внутрисхемного программирования (ISP) через интерфейс SPI,

V – клеммы для подключения фотоаппарата 2,

VI – жидкокристаллический знакосинтезирующий дисплей.

Внутрисхемное программирование реализуется через последовательный интерфейс SPI, выходы которого обозначены на схеме цифрой IV. Коммутация с фотоаппаратами, отмеченными на схеме цифрами II и V, осуществляется транзисторными ключами. Интерфейс для работы оператора с блоком управления реализован на матричной клавиатуре и жидкокристаллическом знакосинтезирующем дисплее (на схеме показан цифрой VI).

Питание блока управления осуществляется от источника постоянного напряжения 5В (на схеме обозначен цифрой I), подключенного к клеммам, или USB-порта компьютера через USB-розетку. Для подавления высокочастотных шумов на питании блока управления применяется полярный конденсатор СЗ. Перезагрузка микроконтроллера осуществляется замыканием ключа J13.

Для реализации чувствительного элемента использовался фотоинтерраптор, который представляет собой источник оптического излучения инфракрасной зоне (светодиод) с длиной волны  $\lambda = 940$  нм и фототранзистор, подключенный биполярному транзистору по схеме с общим эмиттером в едином пластиковом корпусе (рис. 2.4). Фотоприемником служит фототранзистор Q1, преобразующий излучение светодиода LED1 в электрический сигнал. Фототранзистор Q1 соединен с транзистором Q2 по схеме с общим эмиттером (усилительный каскад), что увеличивает чувствительность датчика и при питании датчика от источника постоянного напряжения 5В позволяет получать логическую единицу на выходе.

Блок управления рассчитан на работу с фотоаппаратами Canon линейки EOS и некоторыми аналогичными фотоаппаратами Nikon. 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.

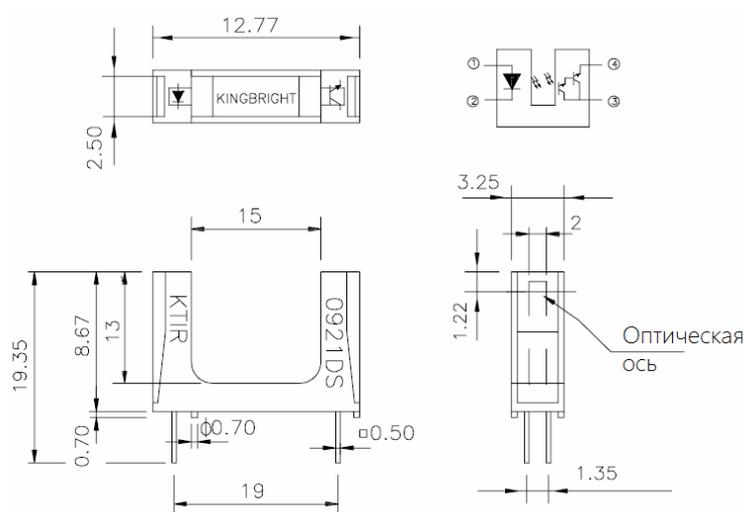


Рис. 2.4. Фотоинтерраптор KTIR 0921DS, принципиальная схема и размеры.

Геометрические характеристики картины течения определялись фотометрическими методами, для масштабирования регистрировалась эталонная сетка с шагом 1,0 мм. Обработка данных проводилась в специальных программах в среде Matlab.

После настройки освещения в принимающую жидкость от дозатора опускался отвес (игла), по которому производилась настройка регистратора на резкость, определялась область резко изображаемого пространства. Для масштабирования изображения осуществлялся контрольный снимок размерной сетки, расположенной в области ожидаемого падения капли. После настройки скорости истечения капельной жидкости, на блоке управления устанавливалось время задержки, определяемое исходя из высоты падения капли, и производился снимок картины течения при столкновении капли с принимающей жидкостью. После коррекции времени задержки процесс повторялся. При загрязнении слоя принимающей жидкости упавшей каплей менялась жидкость в кювете или кювета вместе с жидкостью.

Недостатком метода фотографирования является низкая эффективность – малое число кадров за период протекания процессов (от 1 до 4 кадров/с). В связи

с этим отсутствует возможность получения информации о динамике быстропротекающих процессов. Однако этот недостаток можно частично компенсировать за счет многократного повторения процессов при одинаковых экспериментальных условиях. Так, например, картина течений, инициированных ударным взаимодействием свободно летящей капли с поверхностью подстилающей жидкости, может быть визуализирована путем генерации некоторого числа идентичных капель, последовательно генерируемых с большим временным интервалом при одинаковых экспериментальных условиях. При этом интервал времени между генерацией капель выбирается из расчета затухания всех течений в жидкости, обусловленных воздействием капли.

Параметры разных капель одной жидкости, генерируемых через одно отверстие, и, следовательно, общие параметры течений, инициированные ударным взаимодействием этих капель со слоем жидкости, повторяются достаточно точно, что позволяет осуществить переход от исследования картины течений, инициированных одной каплей, к исследованию картин течений, инициированных последовательностью капель, не нарушая причинно-следственной связи. Таким образом, регистрируя методом фотографирования процессы ударного взаимодействия последовательности капель со слоем жидкости в разных фазах, можно восстановить полную картину течений, т.е. получить последовательность кадров в хронологическом порядке. При этом временной интервал между соседними по времени кадрами может быть сколь угодно мал, что позволяет исследовать короткоживущие компоненты течений. Многократно повторенные опыты показали высокую повторяемость тонких компонентов течений, в том числе следа удара капельки на поверхности погружающейся 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.

Разработанная методика позволяла снимать фотографии и производить видеосъемку капель диаметром от 2 до 5 мм, с разрешением до 10 мкм, а также определять скорость погружения в диапазоне  $U = 2 \div 3.5$  м/с с погрешностью не более 1%.

Достоинствами разработанной методики для регистрации мелкомасштабных короткоживущих компонентов течений является:

1. адаптивная установка с мощными источниками постоянного света позволяет снимать при любой ориентации главного светового потока и оси наблюдения и регистрировать группы стримеров;
2. возможность проведения регистрации течений в любой момент времени с точностью до 1 мкс;
3. сохранение невозмущенности поля наблюдения и повышение светового потока за счет использования защитных и отражающих экранов;
4. адаптивность параметров эксперимента к условиям опытов за счет автоматизированного управления;
5. высокое разрешение ( $\sim 10$  мкм) визуализации короткоживущих компонентов течений.

### **2.3 Теневая визуализация течений, сопровождающих погружение капли в жидкость**

Для исследования внутренних течений прозрачной жидкости, газов и плазмы широкое применение получили теневые методы, которые основаны на явлениях поглощения, рассеяния света, изменения показателя преломления, что в свою очередь приводит к изменению скорости распространения света и, следовательно, деформации световой волны [110]. Так как показатель преломления является оптическим показателем состояния среды, связан с плотностью, то перераспределение освещенности в плоскости изображения позволяет осуществлять визуализацию неоднородностей и делать заключения о характере и некоторых параметрах исследуемой неоднородности.

Перераспределение освещенности реализуется посредством введения дополнительной диафрагмы, приводящей к фазовым или амплитудным изменениям части светового пучка, что является одной из характерных особенностей теневых методов, отличающей теневые методы от способов, основанных на изучении свечения или поглощения света, в которых не ставится никакой дополнительной диафрагмы, и от интерференционных и поляризационных методов, в которых фазовые или поляризационные изменения вносятся в весь световой пучок. С развитием теневых методов появлялись другие визуализирующие диафрагмы различной формы (нож Фуко, фазовый нож, криволинейная диафрагма и штриховая решетка).

Визуализация течений осуществлялась с помощью теневого прибора ИАБ-458. Вследствие зависимости коэффициента преломления световых лучей от плотности среды бассейн с плоскими стенками, заполненный линейно-стратифицированной жидкостью, эквивалентен оптической призме, поворачивающей лучи на угол  $\varphi$ . Осветительная и приемная части расположены в одной вертикальной плоскости напротив друг друга. Компенсация отклонения лучей осуществлялась поворотом теневого прибора на соответствующий угол.

Оптическая схема экспериментальной установки приведена на рис. 2.5. Методом последовательного вытеснения снизу бассейн 15 с высококачественными оптическими иллюминаторами 14 заполнялся стратифицированной по плотности (солености) жидкостью с помощью гидросистемы по традиционной схеме, включающей два накопительных бака 13, смеситель и соединительные шланги. Установленное над бассейном устройство вертикальных перемещений датчика (сканер), позволяет смещать его по вертикали с постоянной скоростью на расстояние до 50 мм.

Оптическая система включает источник света 1 (лампу накаливания); 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*.

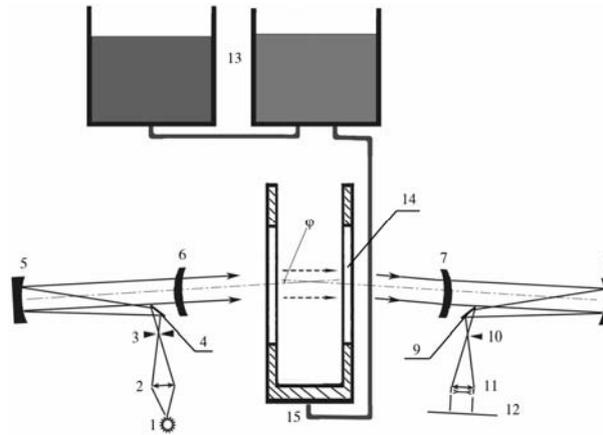


Рис. 2.5. Оптическая схема экспериментальной установки ТВП.

Эксперименты выполнены в лабораторном бассейне размером  $70 \times 25 \times 70$  см, заполненном непрерывно стратифицированным раствором поваренной соли NaCl (концентрация линейно меняется с глубиной). Кинематические вязкости раствора и воды ( $\nu_{\text{в}} = 0,01 \text{ см}^2/\text{с}$ ) отличаются незначительно.

#### 2.4 Высокоразрешающий датчик электропроводности

Измерительный преобразователь электрической проводимости используется для изучения процессов в стратифицированных по плотности средах, как в лабораторных условиях, так и в Мировом океане. Особый интерес для исследования представляют внутренние волны, которые играют важную роль в общей динамике глубокого океана, атмосферы и других природных систем [111]. Для изучения тонкой структуры течений, образованных в жидкости погружением капли, необходимы высокое пространственно-временное разрешение измерительных преобразователей.

Оптические (теньевые) инструменты в лабораторных условиях часто используются в сочетании с датчиком электропроводности. Стратификация и особенности конструкции преобразователей существенно влияют на обтекание

чувствительного элемента и ухудшают их динамические характеристики. Динамические свойства датчиков оцениваются при следующих видах входного воздействия: гармонические колебания в среде с однородным градиентом плотности; резкое смещение на небольшую высоту или перемещение измерительного преобразователя по высоте с постоянной скоростью. В последнем случае нормированный входной сигнал представляют как

$$u(t) = \begin{cases} 0, & t < 0; \\ (v/\eta)t, & 0 \leq t \leq T_c; \\ 1, & t > T_c, \end{cases} \quad (2.1)$$

где  $v$  – скорость перемещения чувствительного элемента по высоте;  $\eta$  – смещение;  $t$  – время;  $T_c$  – длительность сигнала. При указанных выше воздействиях определяют передаточные функции  $H(w)$  и переходные характеристики  $h(t)$ , позволяющие в дальнейшем описывать работу измерительного преобразователя в заданных условиях [112].

Чувствительный элемент датчика представляет коаксиальную ячейку: внешний электрод – никелевый капилляр диаметром 0,8 – 1 мм отделен изолирующей вставкой от внутреннего (платиновая или золотая проволока диаметром 0,3 мм). Капилляр (длиной 30 мм) закреплен в трубке из нержавеющей стали (диаметр 4 мм и длина 50 см) для возможности монтажа в конструкциях бассейна. Рабочий объем измерительного преобразователя – небольшая область у торца чувствительного элемента в зоне контакта электродов с жидкостью. Пространственное разрешение преобразователя составляет не более 1 мм.

В качестве источника сигнала в чувствительном элементе служит блокинг-генератор с управляемой амплитудой выходного сигнала, значение которого зависит от уровня напряжения на управляющем входе. Блокинг-генератор формирует импульсы длительностью 0,5 мкс с частотой следования 1 кГц (скважность  $Q = 2000$ ) и частотой заполнения 1 МГц. Схема работает в режиме постоянного напряжения, который позволяет производить линейное преобразование полной проводимости микроэлектродов в амплитуду выходного

сигнала. Сигнал с электродов подается по высокочастотному кабелю на один из входов нуля-органа через пиковый детектор. На второй вход нуля-органа поступает стабильное опорное напряжение от источника, а на его выходе образуется управляющее напряжение, пропорциональное сигналу рассогласования. Управляющее напряжение меняется так, что сигнал рассогласования стремится к нулю, при этом на выходе дифференциального усилителя формируется напряжение, пропорциональное полной проводимости электролитической ячейки (чувствительного элемента), в диапазоне  $-10\dots+10$  В. Импульсный метод измерений электрической проводимости позволяет существенно уменьшать влияние электрохимических процессов и повысить точность измерений [113]. Блок схема электронной части преобразователя приведена на рис.2.6.

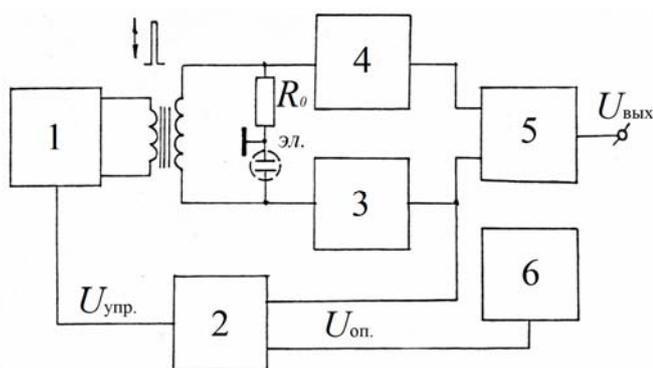


Рис. 2.6. Преобразователь УЭП на основе метода импульсного зондирования.

1 – генератор импульсов с управляемой амплитудой выходного сигнала, 2 – нуль-орган, 3, 4 – пиковые детекторы, 5 – дифференциальный усилитель, 6 – источник стабильного напряжения.

Рабочий диапазон преобразователя заключен в интервале от  $-2$  до  $+40^{\circ}\text{C}$ , при изменении удельной электропроводности в интервале  $0,5 - 10$  См/м и обеспечивает при этом погрешность не более  $5 \cdot 10^{-4}$  См/м, порог чувствительности  $5 \cdot 10^{-5}$  См/м и быстродействие  $0,03$  с.

Указанные особенности конструкции и работы преобразователя дают возможность использовать его при исследованиях мелкомасштабных процессов в

небольших бассейнах в широком диапазоне градиентов плотности среды  $\Lambda_p$  (период плавучести в жидкости  $T_b = 2\pi\sqrt{\Lambda_p/g} = 4\dots 20$  с,  $g$  – ускорение свободного падения).

Эксперименты выполнены в лабораторном бассейне размером  $70\times 25\times 70$  см, заполненном непрерывно стратифицированным раствором поваренной соли NaCl (концентрация линейно меняется с глубиной). Общий вид экспериментальной установки ТВП представлен на рис. 2.7. Кинематические вязкости раствора и воды ( $\nu_b=0,01$  см<sup>2</sup>/с) отличаются незначительно. В качестве источника возмущений в среде (излучателя) использованы диски из нержавеющей стали или оргстекла радиусом 3 и 6 см. Излучатель закреплен на стержне, соединенном с электродвигателем через гибкий вал и понижающий редуктор. Электродвигатель подключен к источнику постоянного тока (до 24 В) с регулируемой частотой вращения от 1 до 100 мин<sup>-1</sup>.

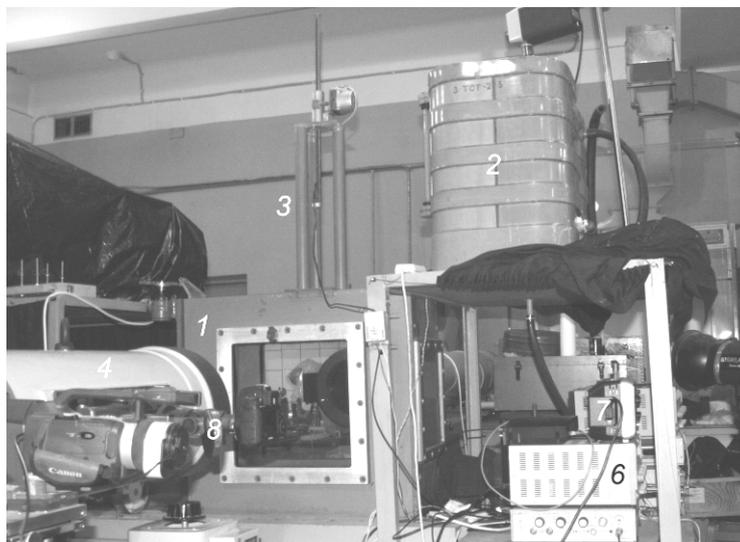


Рис. 2.7. Общий вид экспериментальной установки ТВП установки: 1) бассейн; 2) баки для создания стратификации; 3) стойка сканирующего механизма; 4) теневой прибор ИАБ – 458; 5) электронный блок датчика электропроводности; 6) источник питания; 7) регистрирующее устройство (осциллограф); 8) фотоаппарат.

Результаты экспериментов, выполненных при горизонтальном расположении плоскости диска, приведены на рис. 2.8. Чувствительный элемент располагался на расстоянии 7 см от оси диска. Период плавучести и погрешность ее определения составили соответственно  $T_b = 7$  с и 2,5 %. Линейная скорость вращения кромки диска составляла 0,25 м/с. Регистрограммы (рис. 2.8) приведены для двух положений измерительного преобразователя относительно зоны перемешивания: сигнал преобразователя, установленного вблизи вращающегося диска (рис. 2.8, а), и на некотором удалении, в поле внутренних волн (рис. 2.8, б).

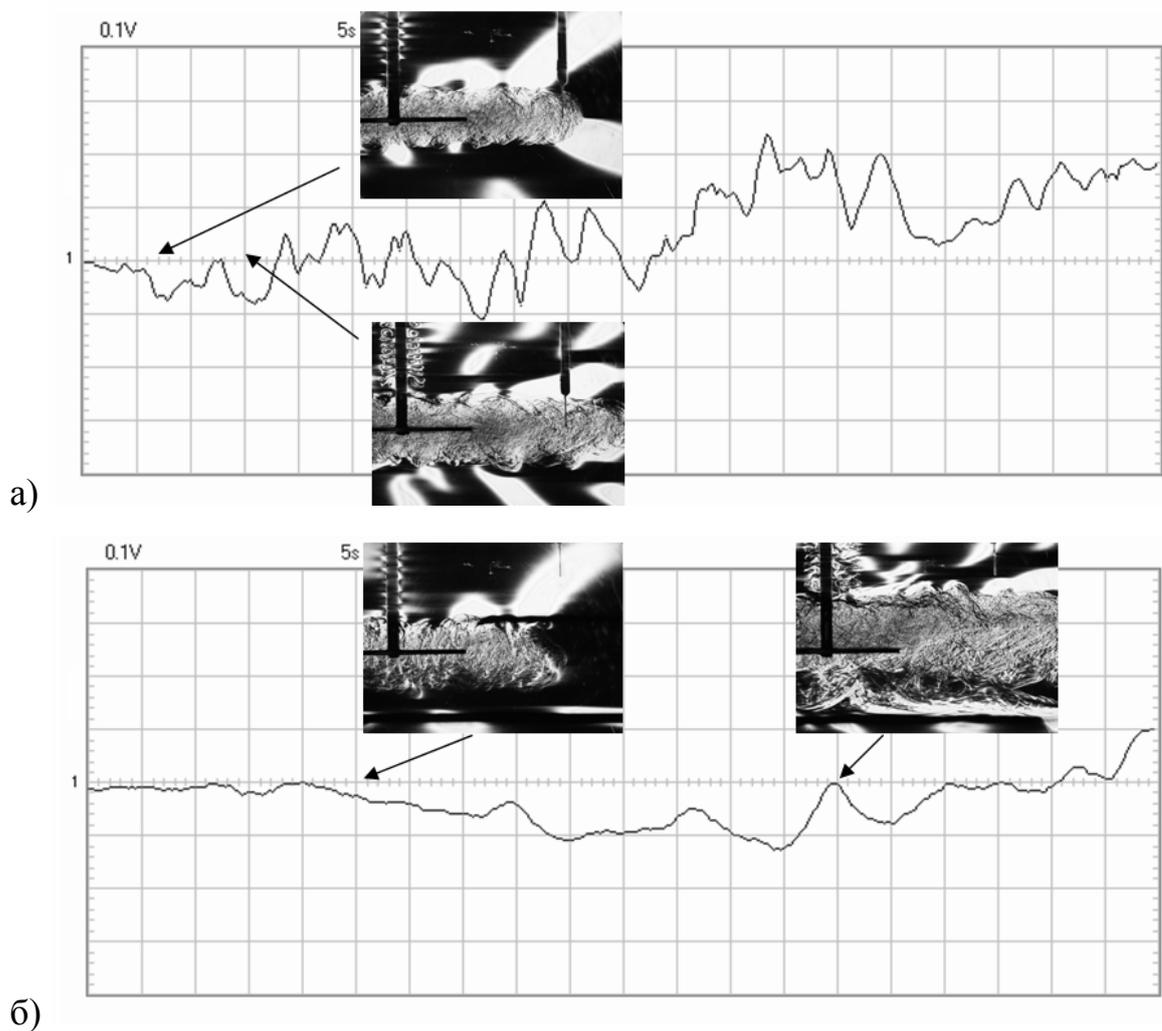


Рис. 2.8. Преобразователь электрической проводимости 2 в потоке перемешиваемой жидкости (а) и вне потока (б) – регистрируются только внутренние волны.

В первом случае в сигнале присутствуют мелкомасштабные возмущения, кривая на рис. 2.8, б более регулярная. Вторжение частично перемешанной тонкоструктурированной жидкости около диска сопровождается генерацией внутренних волн, которые в теневом изображении визуализируются темными и светлыми полосами.

Оценка динамических характеристик выполнялась при вертикальном перемещении датчика в рабочей среде с постоянной скоростью 3 мм/с. Стратификация среды во всех случаях была около 7 с, градиент плотности  $\partial\rho/\partial z = 1,4 \cdot 10^{-3}$  г/см<sup>4</sup>. При вертикальном смещении измерительного преобразователя до 5 мм время реакции не превышает 5 с (рис. 2.9).

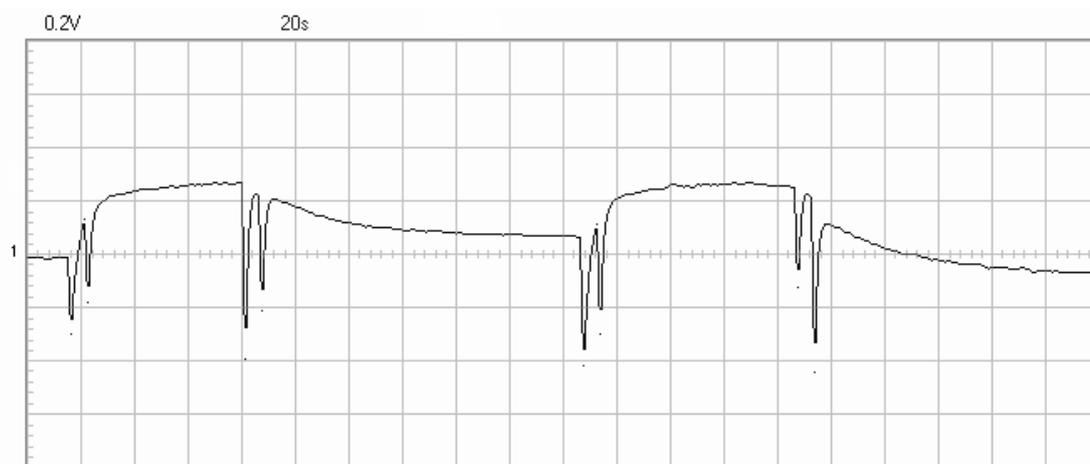


Рис. 2.9. Выходной сигнал датчика в динамическом режиме  
(вертикальное смещение)

Таким образом, вертикальное смещение частиц жидкости в слоях между темными и светлыми полосами (гребнями и впадинами внутренних волн) не превышает 0,1 мм. Скорость перемещения слоев по горизонтали составляет 1 мм/с. Пространственное разрешение преобразователя не меньше 0,1 мм при скорости смещения перемешанной области относительно чувствительного элемента около 3 мм/с.

## 2.5 Выводы ко второй главе

Экспериментальные исследования гидродинамики всплеска капли, ввиду сложности геометрии течений, на первом этапе целесообразно проводить, используя оптические методы прямой визуализации, в сочетании с регистраторами поверхностных волн и датчиками (например, электропроводности). Методика позволяет, в дополнение к геометрии течений, фиксировать значения таких параметров, как электропроводность, которая может быть пересчитана в соленость и плотность.

Разработанные с использованием методов импульсного зондирования, датчики электропроводности обладают высокими пространственным и временным разрешением. Конструкция чувствительных элементов датчика позволяет свести к минимуму тепловое воздействие на исследуемые компоненты течений и стабилизировать электрохимические процессы на открытых электродах.

Регистрация динамики течений осуществляется с использованием высокоскоростных видеокамер, удовлетворяющих требованиям временного разрешения задачи. Отдельные стадии процесса погружения капли, содержащие тонкоструктурные компоненты течений, регистрировались фотоаппаратом последовательно для разных капель одной жидкости в тех же условиях. Синхронизация фотоаппарата и отрыва капли осуществлялась управляющим блоком, разработанным в лаборатории механики жидкостей ИПМех РАН.

Применение специальных оптических инструментов (реверсивных и макро-колец) позволяет удовлетворить требованиям к пространственному разрешению, а использование теневых методов – регистрировать картину внутренних течений, инициированных погружением капли, без введения маркирующей примеси (трассеров).

### **Глава 3. Экспериментальные исследования картины течений, инициированных погружением свободно падающей капли в покоящуюся жидкость**

#### **3.1 Основные компоненты течений**

В большинстве работ, начиная с первых публикаций [31], картина всплеска, сопровождающего падение капли в спокойную воду, фотографировалась сбоку для регистрации формы выступающего из воды венца и кумулятивной струи. Повышение разрешающей способности регистрирующей аппаратуры, яркости источников света, изменения положения луча зрения позволяют увидеть новые детали даже в хорошо изученной картине течения, возникающего в процессе погружения капли чистой воды в спокойную воду и последующей эволюции характерных структурных элементов.

В картине эволюции течений, вызванных погружением капли в принимающую жидкость, в режиме формирования выраженной центральной кумулятивной струи традиционно выделяются: первичная кольцевая пелена с семейством стримеров [42], каверна, форма и динамика которой исследована в большом числе работ [21, 71], и растущий венец с краевым шевроном. С вершин зубцов шеврона выбрасываются последовательности мелких капелек – брызги [72]. На боковых поверхностях венца [73] и вокруг него [74] на более поздних стадиях процесса наблюдаются система кольцевых капиллярных волн. В ходе погружения капли излучаются высокочастотные акустические сигналы (короткие пакеты), которые регистрируются и в жидкости, и в воздухе [75].

После заполнения каверны и растекания венца в принимающей жидкости остается кольцевая впадина сложной геометрии (розетка), в центре которой постепенно формируется обратная струя, как достаточно толстая (кумулятивная [81]), так и тонкая – стример [1]. С вершин выступающей струи в воздух выбрасываются отдельные крупные капли, сравнимые по размеру с первоначальной [31]. Характер течений зависит от многих параметров задачи, и в

первую очередь от размера капли и скорости в момент контакта (или высоты свободного падения). Классификации наблюдаемых режимов течения приведены в [81].

Основные структурные элементы, характеризующие процесс погружения свободно падающей капли в глубокий слой принимающей жидкости, иллюстрирует серия фотографий, приведенная на рис. 3.1 (длина метки на всех фотографиях – 1 см).

В процессе погружения верхняя 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 отдельными струйками – стримерами (рис. 3.1, *а*, зарегистрировано 20 стримеров). С вершин стримеров последовательно выбрасываются мелкие капельки (брызги).

В основном, пелена и стримеры развернуты наружу. Однако на рис. 3.1, *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 [114, 115].

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 венца, количество зубцов на шевроне существенно сокращается (на рис. 3.1, *б* – 12 зубцов). С вершин зубцов выступают короткие стримеры слабokonической формы, с которых периодически выбрасываются отдельные капельки.

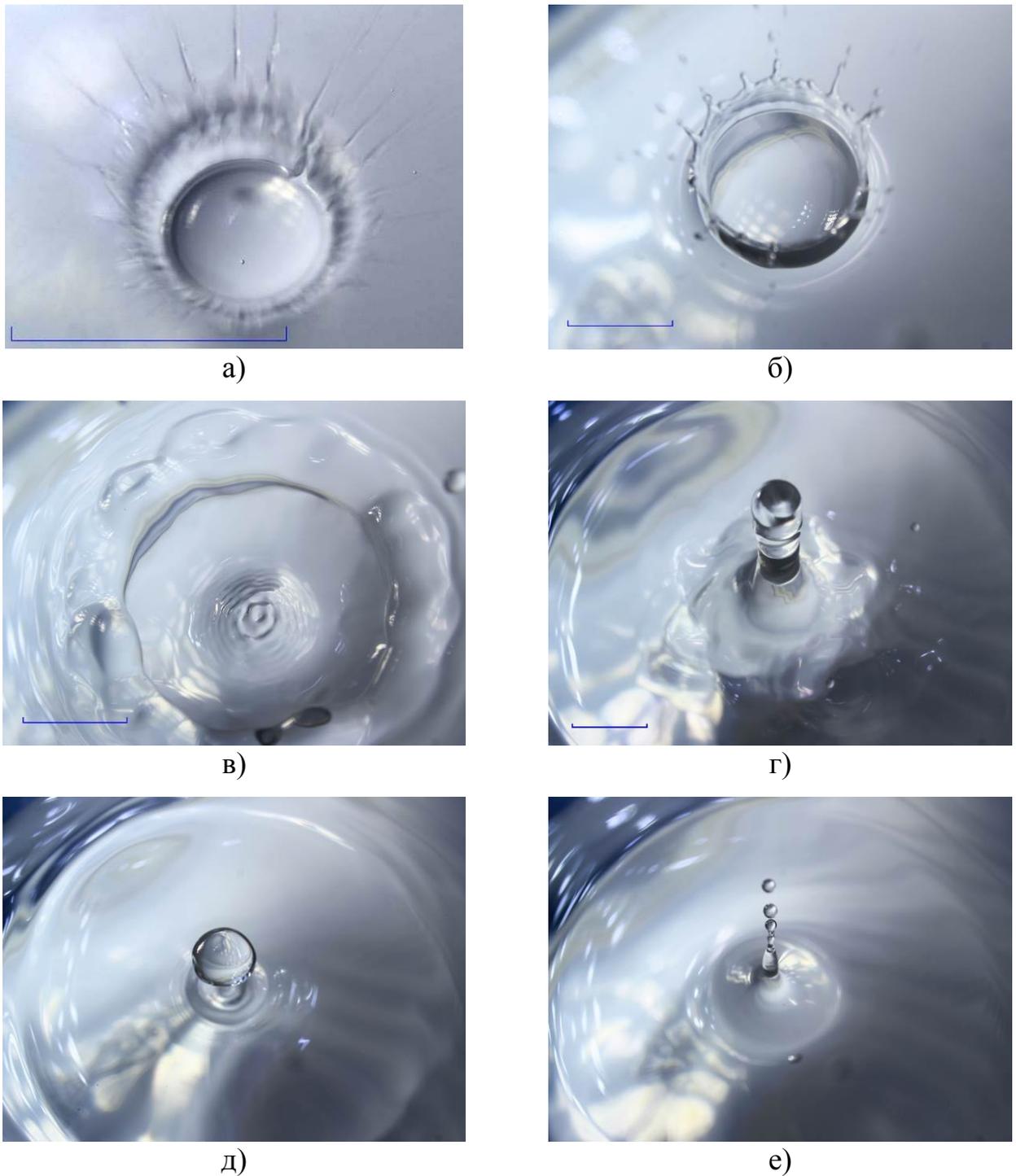


Рис. 3.1. Основные фазы процесса погружения капли чистой воды в воду ( $h_f = 7$  см,  $H = 80$  см,  $D = 0.42$  см): *a* – капля на дне каверны с венцом и стримерами, *б* – венец с зубчатым шевроном, *в* – каверна с капиллярными волнами, *г* – кумулятивная струя на пьедестале, *д* – вторичная капля, падающая в остаток каверны погружившейся кумулятивной струи, *е* – тонкая возвратная струйка (центральный стример). Длина метки на рис. 3.1, *a*, *б*, *в*, *г* составляет 1 см. Линия визирования составляет  $75^\circ$  к горизонту.

От шеврона сбегает капиллярные волны, которые постепенно покрывают все внутренние поверхности венца и каверны. Пространственно-временная структура волн на венце исследована в [73]. 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 [74].

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 покрыта семейством кольцевых капиллярных волн (рис. 3.1, 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, центральная цилиндрическая часть (темная поверхность на рис. 3.1, г) 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.

Опадающая кумулятивная струя втягивается в толщу жидкости с образованием конической впадины, окруженной системой кольцевых капиллярных волн (рис. 3.1, 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 [1, 75].

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. 3.1, е).

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

### 3.2 Динамика погружающейся капли. Скорость линии контакта

Схема течения при первичном всплеске капли с соответствующими экспериментальными фотографиями приведены на рис. 3.2. В момент контакта за короткое время  $\Delta t_s \sim 10^{-10}$  с (диссипативно-капиллярный масштаб времени) происходит уничтожение поверхностных слоев толщиной порядка размера нескольких размеров молекул  $\delta_s \sim 10^{-8}$  см, который соотносится с диссипативно-капиллярным масштабом, и выброс из области слияния отдельных тонких стримеров (рис. 3.2, б). При этом в выражении для термодинамического потенциала Гиббса

$$dg_s = -sdT + VdP + \sigma dS_b + \mu_n dN_n \quad (1.12)$$

исчезает дополнительный член, зависящие от химического потенциала  $\mu_n$  и концентрации соответствующих компонентов  $dN_n$  [107, 108], а также и частично член, описывающий энергию поверхностного натяжения.

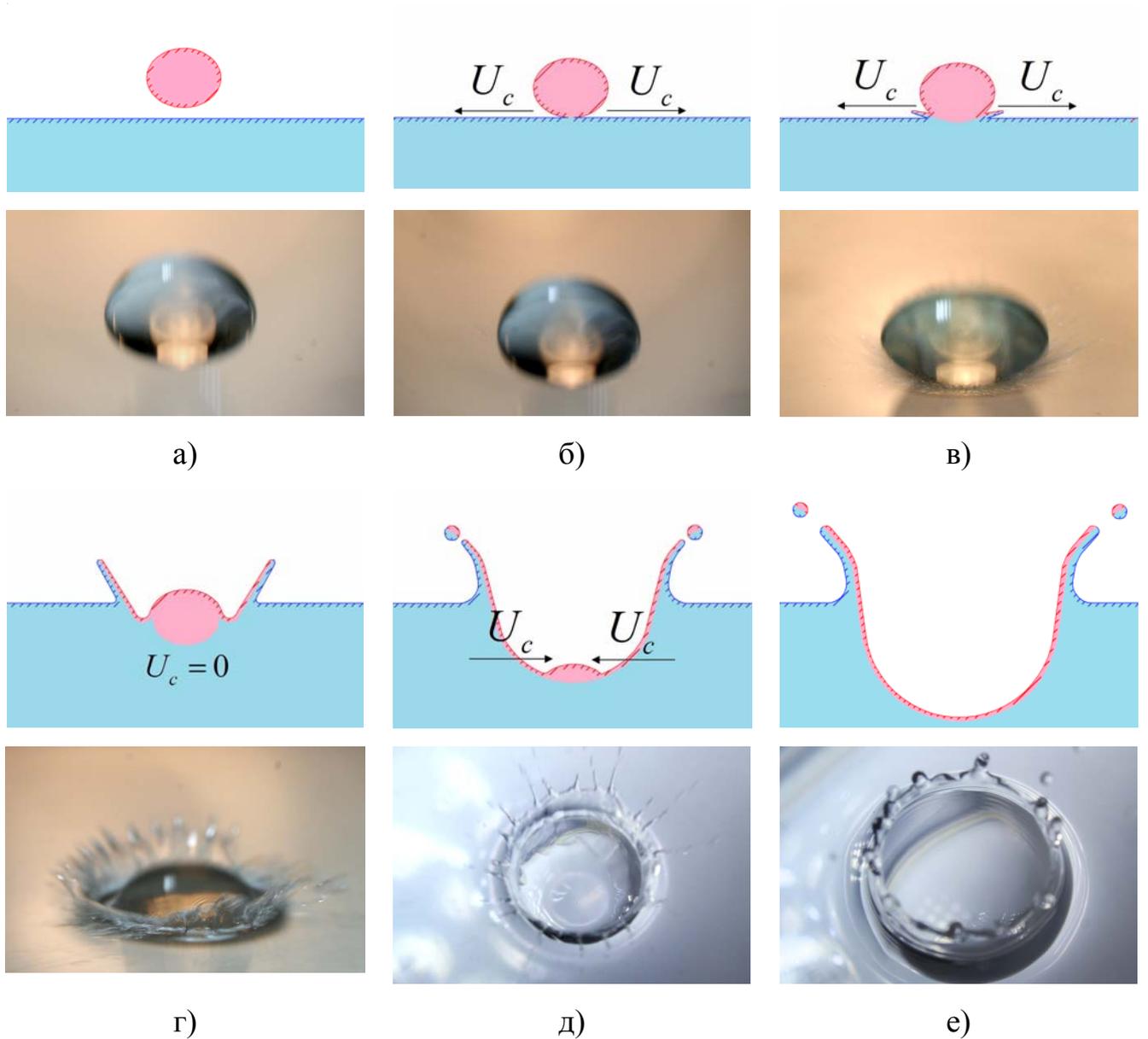


Рис. 3.2. Схемы и фотографии течений, возникающих при погружении капли в глубокую жидкость. Линия визирования на фотографиях составляет: а-г)  $-15^\circ$ , д, е)  $-75^\circ$  к горизонту.

За более длительное время  $\Delta t_\sigma = \delta_\sigma / U \sim 10^{-8}$  с происходит слияние жидкостей (уничтожение приповерхностных слоев) в пятне первичного контакта погружающейся капли с принимающей жидкостью толщиной  $\delta_\sigma \sim 10^{-6}$  см. Преобразование доступной потенциальной поверхностной энергии в другие формы энергии сопровождается формированием течений, повышением

температуры и давления в области слияния. При этом термодинамический потенциал приобретает типичную для толщи жидкости форму [116].

$$dg_s = -sdT + VdP$$

Из области контакта в радиальном направлении разлетается пелена брызг и стримеров, окружающих область контакта (рис. 3.2, в).

Линия контакта растёт, скорость движения контактной границы  $U_c$  изменяется по мере погружения капли, как показано на рис. 3.3 для капли, имеющей эллиптическую (сплюснутую) форму с полуосями  $a = 2.3$  мм,  $b = 1.5$  мм. Уничтожение поверхности в пятне контакта радиусом  $6 \cdot 10^{-4}$  см (зона I на рис. 3.3) происходит со скоростью, превышающей скорость звука в воде. Далее скорость линии контакта стремительно падает (зона II) и при достижении радиуса  $27 \cdot 10^{-4}$  см не превышает скорости звука в воздухе.

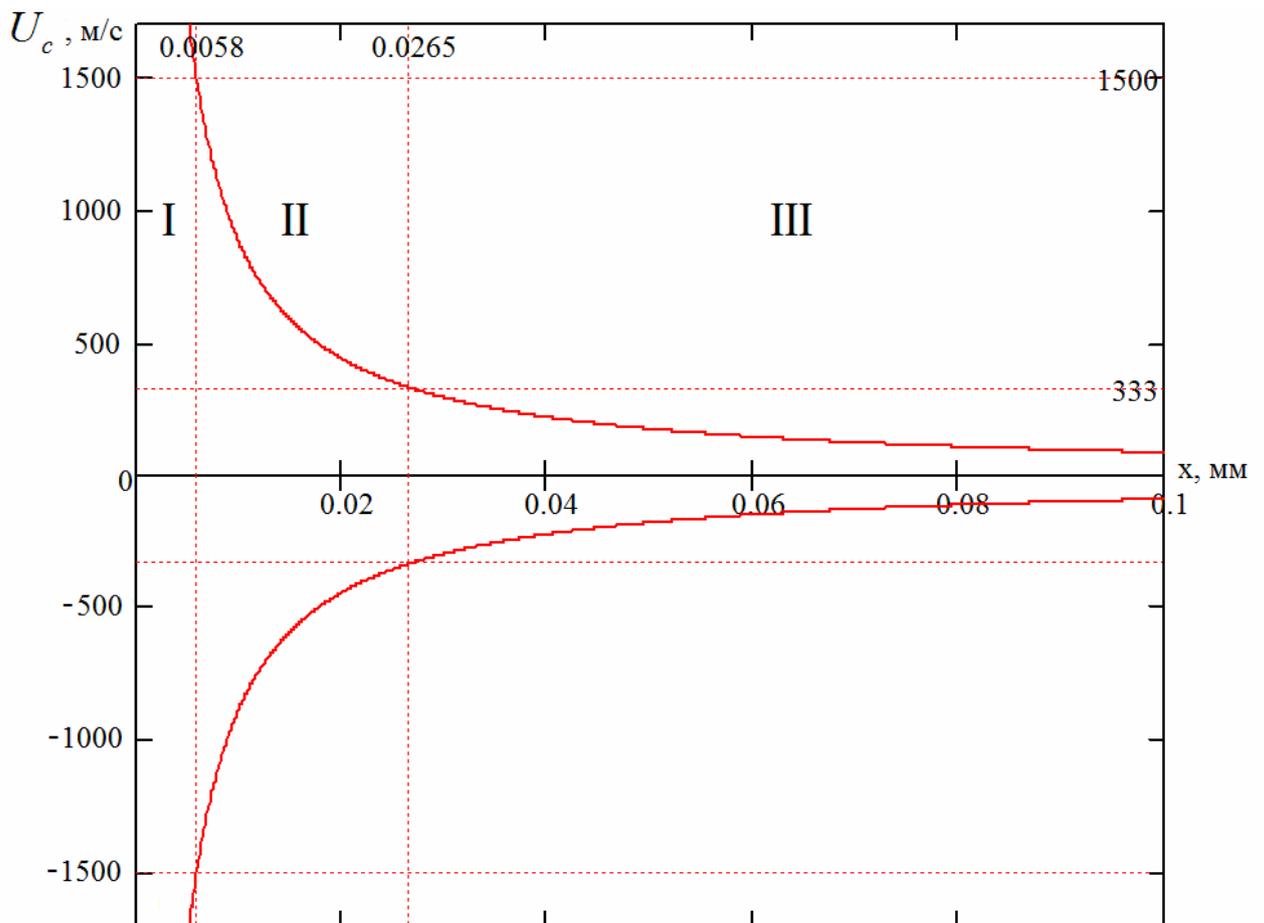


Рис. 3.3. Изменение скорости линии контакта капли с принимающей жидкостью

По мере дальнейшего погружения капли в жидкость (продолжительностью  $\tau \sim 10^{-3}$  с) характер передачи энергии изменяется – свободная энергия непрерывно поступает лишь в узком кольце контакта приповерхностного слоя капли с принимающей жидкостью, что предопределяет форму растущего венца (рис. 3.2, г). Между линией контакта капли с принимающей жидкостью образуется углубление – каверна. Скорость продвижения линии контакта стремится к нулю (рис. 3.3). При погружении капли на четверть скорость линии контакта не превышает скорости погружения капли, а при погружении наполовину, изменяет свой знак – линия контакта начинает двигаться по направлению к капле (рис. 3.3, д) – и возрастает, приближаясь к вершине капли. На дне каверны остается небольшая часть капли (на фотографии диаметр линии контакта капли с дном каверны составляет 0.54 см, поверхность каверны неровная, ребристая), с зубьев шеврона венца отрываются вторичные капли.

После слияния остатка капли с принимающей жидкостью поверхность растущей каверны становится гладкой (фотография на рис. 3.2, е), прекращается поступление энергии к венцу, что приводит к его спаданию, появлению на его поверхности капиллярных волн.

Отдельные фотографии и график смещения верхней кромки капли воды диаметром  $D = 0.42$  см, свободно падающей с высоты  $H = 40$  см, при подлете и в процессе погружения в принимающую жидкость приведены на рис. 3.4 ( $t = 0$  соответствует моменту касания капель поверхности подстилающей жидкости). Характерная продолжительность фазы погружения капли составляет  $\Delta t = 2$  мс. На интервале  $-0.0014 < T < 0.001$  с капля движется со скоростью  $U = 2.5$  м/с (расчетная скорость в пренебрежении сопротивлением воздушной среды 2.8 м/с). Расстояние от верхней кромки капли до невозмущенной поверхности жидкости  $S$ , см на рис. 3.3. аппроксимируется линейной функцией  $S(t) = -0.25t + 0.42$ ,  $[t] = \text{мс}$ , СКО на этом участке составляет  $\Delta = 0.0005$  см.

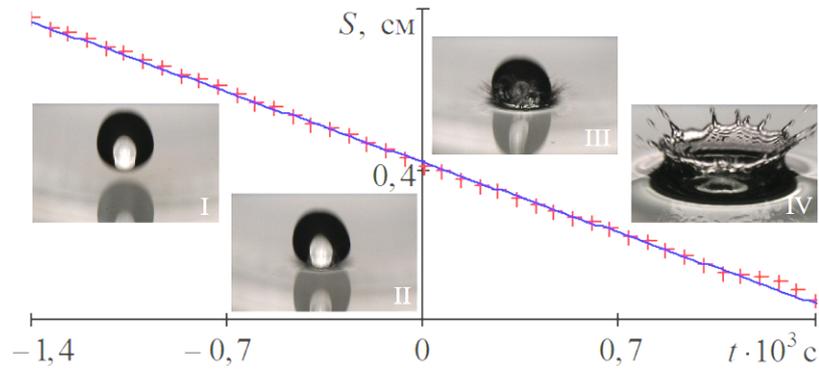


Рис. 3.4. Движение верхней кромки капли воды в области контакта с принимающей жидкостью

Систематические отклонения экспериментальных точек от аппроксимирующей линии 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).

При подлете капля имеет вытянутую по вертикали форму (рис. 3.4, вставка I) (степень вытянутости характеризует: отношение большей оси к меньшей  $a/b = 1.12$ ), отклонение главной оси капли от вертикали около  $6^\circ$ . Четкие изображения капли и ее тени позволяют установить положение невозмущенной поверхности, которое в дальнейшем используется для оценки расстояний.

В момент касания из области контакта капли с поверхностью принимающей жидкости (рис. 3.4, вставка II) разлетается тонкая кольцевая пелена, окруженная веером стримеров, с вершин которых срываются брызги.

Постепенно капля продавлиывает поверхность принимающей жидкости и формирует каверну, окруженную выступающим венцом (рис. 3.4, вставка III). С заостренных вершин изрезанной верхней кромки венца (шеврона) выбрасываются последовательно брызг (стримеры). Со временем растет высота стенок короны, увеличивается и угол наклона стримеров к горизонту (рис. 3.4, вставка IV). По стенкам короны вниз сбегает система капиллярных волн [73].

### 3.3 Циклические эффекты в выбросе брызг

При уничтожении свободных поверхностей наблюдается ряд циклических эффектов в выбросе мелких каплей (рис. 3.5). 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.

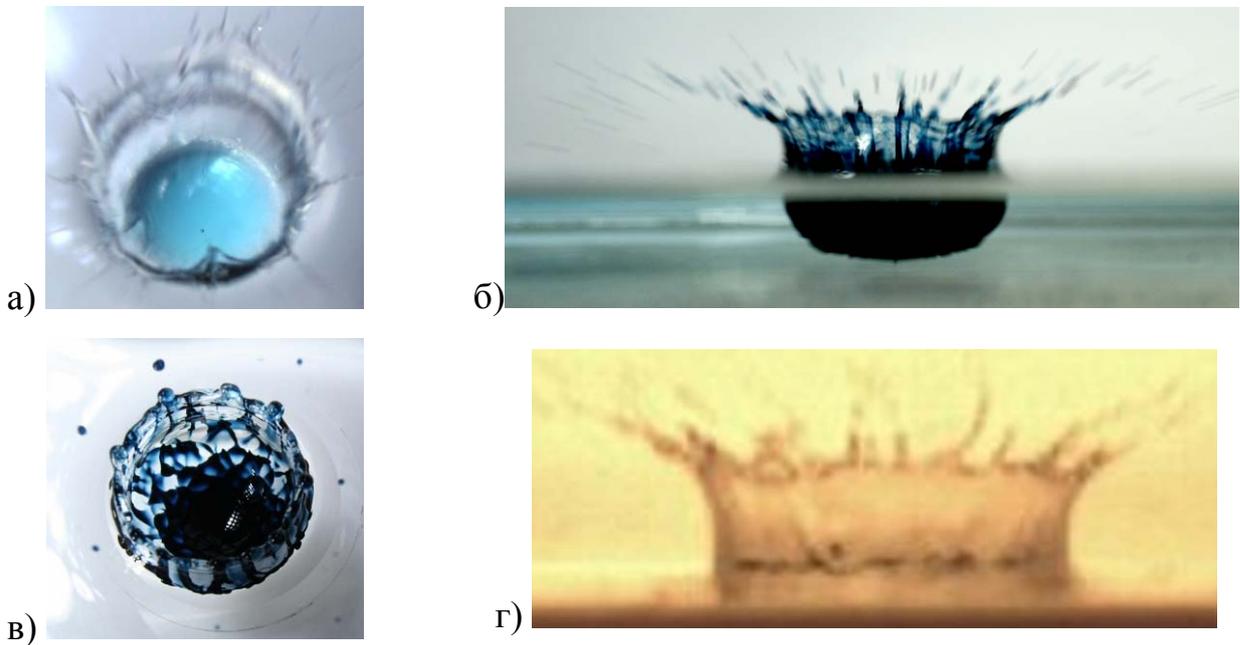


Рис. 3.5 Циклические эффекты в выбросе мелких брызг в фазе первичного контакта: а) кольцевые структуры брызг на поверхности погружающейся капли (капля водного раствора медного купороса погружается в воду, вид сверху), б) набор стримеров (капля раствора чернил погружается в воду, вид сбоку), в) зональная структура капельных облаков, г) ранее полученная фотографии вылета мелких брызг [73].

Методика эксперимента позволила впервые получить четкие картины последовательного выброса семейства стримеров. Первые группы стримеров вылетают настильно (под углом  $10^\circ$  на рис. 3.5, б), зубья шеврона с

отделяющимися крупными брызгами располагаются под углом  $45^\circ$  к горизонту. Зональная структура капельных облаков указывает на существование радиальных периодических движений, почти однородных по азимутальной переменной.

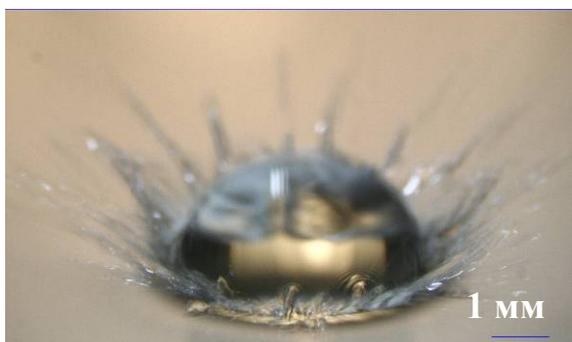
Попадание мелких брызг на криволинейную поверхность погружающейся капли генерирует группы капиллярных волн, периодически расположенных по линии контакта жидкостей. Форма фронта волны, которая определяется величиной и направлением скорости капельки относительно принимающей поверхности, однозначно определяет направление траектории движения источника (рис. 3.5, а). Здесь в силу свойств дисперсионного уравнения капиллярных волн в картине течения выражены опережающие возмущения – дуги, располагающиеся перед источником (в отличие от гравитационных волн, которые отстают от источника).

Зональность картины течений выражается и в выбросе вторичных капель с шеврона венца (рис. 3.5, в). Здесь в фазе спадания венца шеврона, образованного над поверхностью глубокой воды погружением капли раствора чернил диаметром  $D = 0.42$  см, свободно падающей с высоты  $H = 80$  см, регистрируется 6 вторичных капелек. Синхронный характер вылета капель с различных стримеров указывает на существование волнового процесса на возмущенной поверхности шеврона.

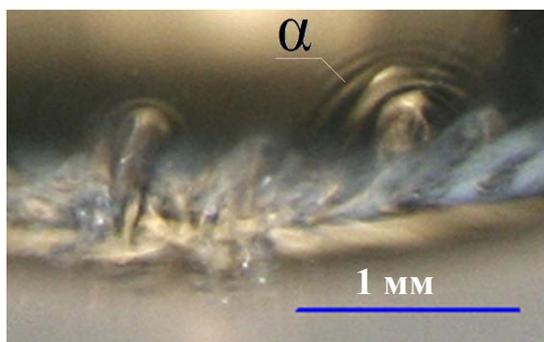
### **3.4 Капиллярные волны на поверхности погружающейся капли и разлетающиеся брызги**

Типичная картина течений на стадии частичного погружения капли при равных значениях коэффициентов поверхностного натяжения  $R_\sigma = 0$  (капля воды погружается в слой воды) показана на рис. 3.5, а (волновой рисунок на вершине погружающейся капли представляет собой перевернутое изображение части растущего венца, расположенной позади капли). Неоднородности на передней поверхности погружающейся капли в области линии контакта – пакет периодических возмущений, окружающих область падения маленькой капельки.

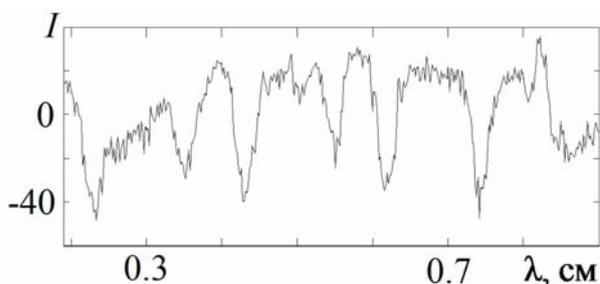
Увеличенное изображение участка поверхности капли, на которой зарегистрированы возмущения, (рис. 3.5, б) позволяет четко определить периодические возмущения как группу капиллярных волн  $\alpha$ . Ориентация волнового следа, вызванного ударом мелкой капельки, позволяет выделить направление на источник – порождающий стример, который присутствует на переднем плане изображения. Мелкие брызги движутся от области контакта к вершине остатка погружающейся капли. Скорость волн определялась по измерениям расстояний между гребнями в последовательности волновых поверхностей возмущения  $\alpha$  на рис. 3.5, б.



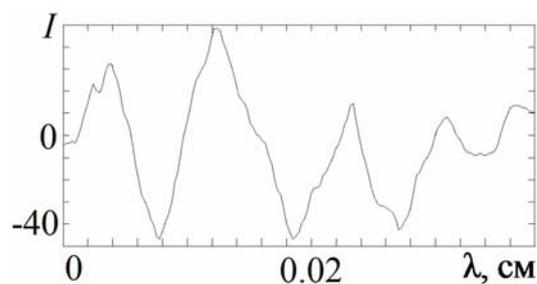
а)



б)



в)



г)

Рис. 3.5. Капиллярные волны на поверхности капли воды (погружение в воду  $R_{\sigma} = 0$ ): а, б – фото капли и увеличенный фрагмент поверхности с группой волн  $\alpha$ ; в, г – относительные флуктуации освещенности кромки венца и группы волн  $\alpha$ .

Длина волны  $\lambda$  определялась фотометрическим методом по изменению яркости в группе волн  $\alpha$  (рис. 3.5, г) и составила  $\lambda_1 = 0,009$  см,  $\lambda_2 = 0,011$  см,

$\lambda_3 = 0,008$  см,  $\lambda_4 = 0,005$  см. Монотонное убывание  $\lambda$  по мере удаления от точки первичного контакта типично для капиллярных волн.

Из дисперсионного уравнения [97] без учета диссипации  $\omega^2 = k^3 \sigma / \rho$  следует, что фазовая скорость для волн на поверхности капли  $c = \sqrt{2\pi\gamma/\lambda}$ . Таким образом, для волн, отмеченных на поверхности погружающейся капли (рис. 3.5, б) фазовые скорости равны соответственно:  $c_1 = 2.34$  м/с,  $c_2 = 2.11$  м/с,  $c_3 = 2.48$  м/с,  $c_4 = 3.13$  м/с, что соотносится со скоростью свободного падения капли в момент контакта  $U = 2.5$  м/с.

Для количественной оценки распределения стримеров вдоль видимого участка окружности пелены ( $120^\circ$ ) определялось распределение интенсивности света  $I$  в относительных единицах (рис. 3.5, в). Минимумам заостренной формы на кривой соответствуют вершины шеврона, с которых выбрасываются последовательности брызг (стримеры). Результаты фотометрии изображений (рис. 3.5, в) показывают, что расстояния между стримерами на поверхности венца лежат в диапазоне от 0.7 до 1.6 мм.

Капля водного раствора поваренной соли (плотность  $\rho = 1.18$  г/см<sup>3</sup>), погружающаяся в слой воды (рис. 3.6, а, б,  $R_\sigma = -0.014$ ), окружена высокой пеленой брызг, переменная высота достигает 1.2 мм. Пелена имеет сложную внутреннюю структуру, из нее вылетают отдельные редкие брызги, длина штриха которых составляет 3 мм.

Сложная картина течений на поверхности капли указывает на большое число падающих капелек – источников капиллярных волн. Группы капиллярных волн 1-5 имеют вытянутые к вершине части капли оголовки (области, в которых длина волн принимает наименьшее значение), следовательно, движение источников капиллярных волн происходит к вершине остатка капли. Длина волн группы 2 убывает от 0.013 до 0.003 см, а группы 3 – от 0.008 до 0.004 см. Волны групп 3 и 4 пересекаются. Направления распространения волн групп 3 и 4 пересекаются под углом  $24^\circ$ .

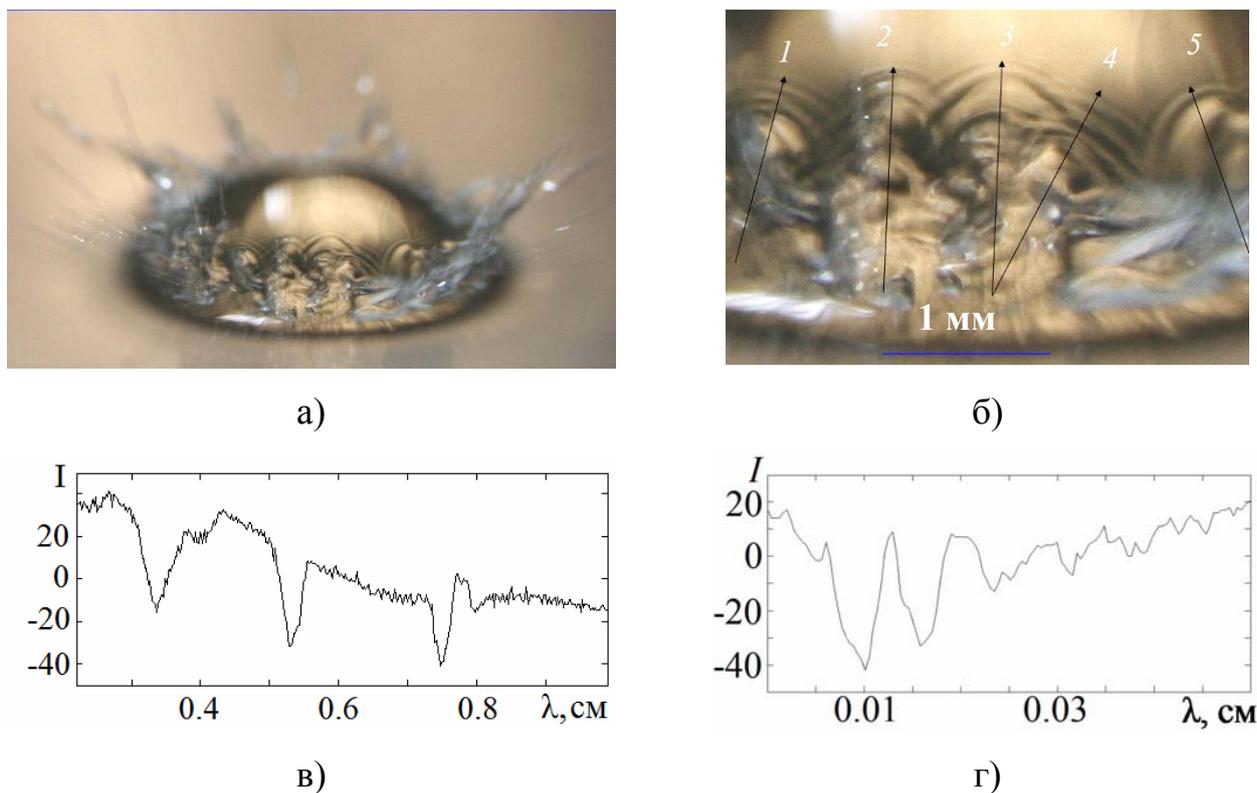


Рис. 3.5. Волны на поверхности капли водного раствора поваренной соли (погружение в воду  $R_\sigma = -0.014$ ): *a*, *б* – фото капли и увеличенный фрагмент (1-5 – группы капиллярных волн); *в*, *г* – относительные флуктуации освещенности кромки венца и группы волн  $\alpha$ .

Первичные капиллярные волны распространяются по поверхности капли со скоростями 3-4 м/с, последующие – со скоростями 2.5-3 м/с (рис. 3.6, *з*). Струйки соленой воды более толстые, чем пресной, искривленные, разлетаются в широком угловом диапазоне. На исследованной видимой области шеврона (рис. 3.6, *в*) было зарегистрировано три стримера, расстояния между которыми составляют 0.2 и 0.22 см. Первичные брызги вылетают непосредственно из области контакта погружающейся капли с принимающей жидкостью, последующие, более крупные – с вершин зубцов шеврона растущей короны.

При взаимодействии капли воды и водного раствора этанола (рис. 3.7, *a*; концентрация  $C = 40\%$ ,  $R_\sigma = -0.46$ ) на поверхности капли также наблюдались капиллярные волны от ударяющих стримеров. Картина течений на поверхности капли более простая: источники капиллярных волн редкие и находятся на

большом расстоянии друг от друга, так что группы капиллярных волн почти не взаимодействуют друг с другом.

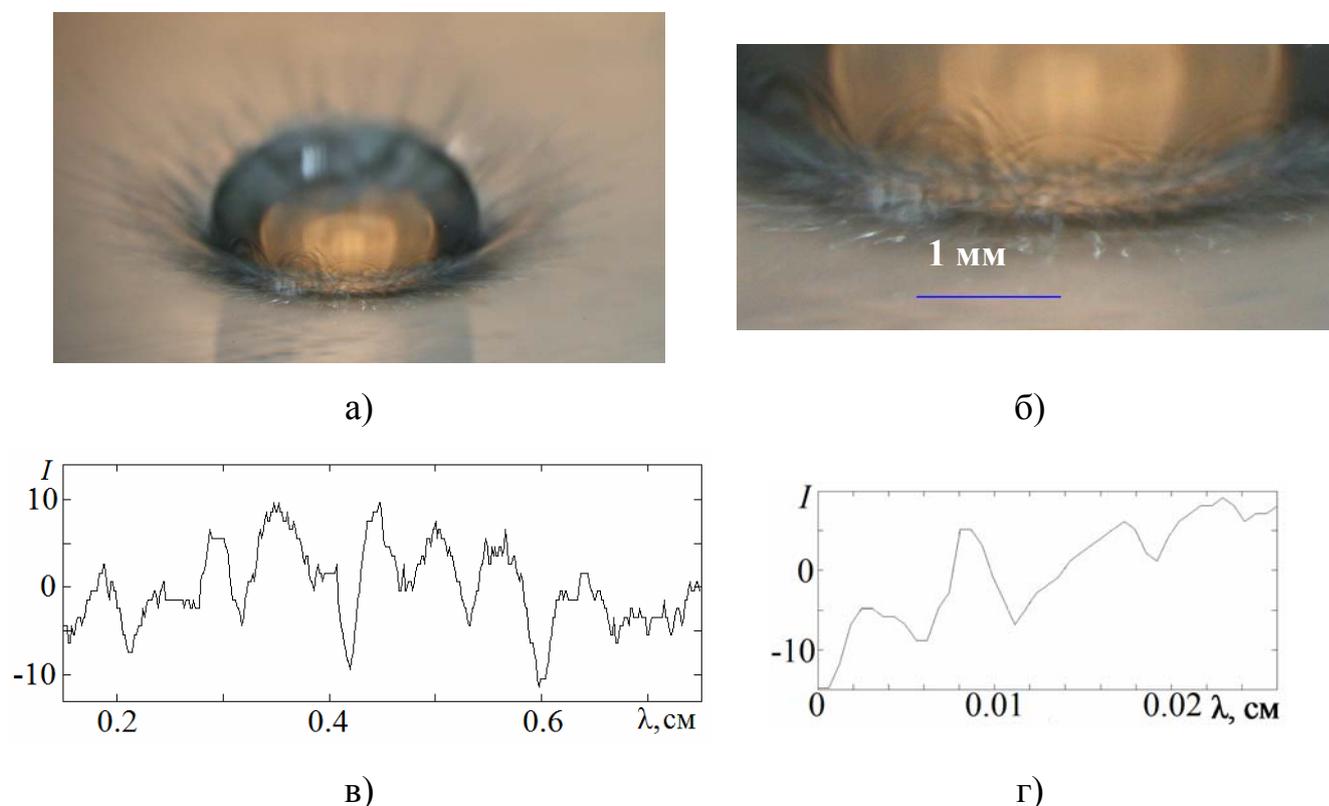


Рис. 3.7. Волны на поверхности капли воды (погружение в 38% раствор спирта  $R_{\sigma} = -0.46$ ): *а*, *б* – фото капли и увеличенный фрагмент; *в*, *г* – относительные флуктуации освещенности кромки венца и волн  $\alpha$ .

Длины капиллярных волн, представленных на рис. 3.7, *б*, находятся в диапазоне от 0.005 до 0.008 см, а фазовые скорости – от 2.4 до 3 м/с. Всплеск характеризуется высокой плотностью стримеров (сравнимой с картиной всплеска капли воды), широким диапазоном направлений вылета мелких брызг и стримеров. На видимой части венца (рис. 3.7, *в*) различаются 10 вершин, расстояния между которыми составляют от 0.4 до 1 мм.

В картине течений при погружении капли воды в подсолнечное масло (рис. 3.8, *а*,  $R_{\sigma} = -0.38$ ) отсутствуют окружающие каплю стримеры и брызги. Капиллярные волны генерируются вдоль всей линии контакта погружающейся капли с принимающей жидкостью (рис. 3.8, *б*). Их длина, полученная из

распределения освещенности вдоль распространения волн (рис. 3.8,  $z$ ), составляет от 0.008 до 0.012 см, а фазовые скорости – 2-2.5 м/с.

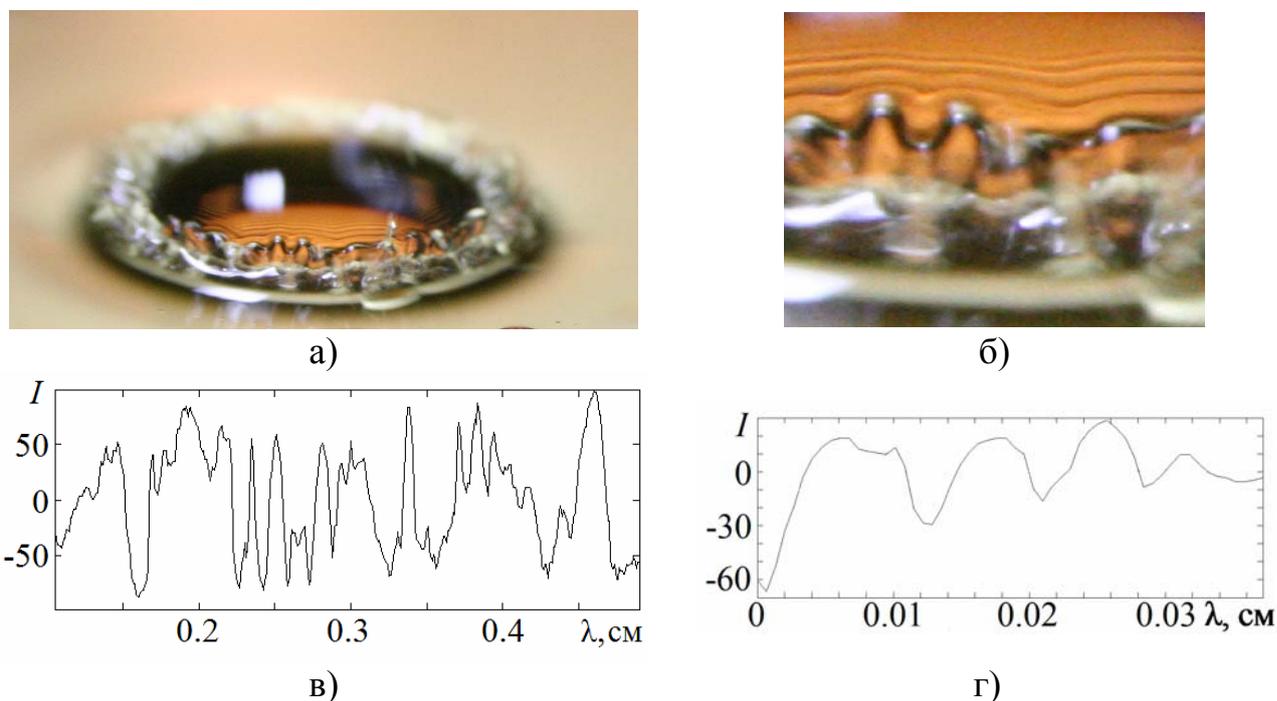
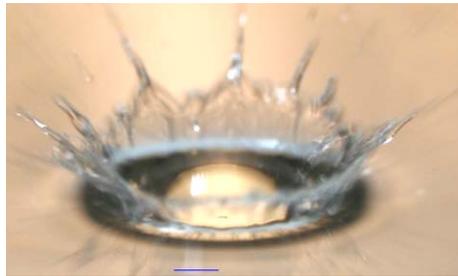


Рис. 3.8. Волны на поверхности капли воды (погружение в подсолнечное масло  $R_{\sigma} = -0.42$ ):  $a$ ,  $b$  – фото капли и увеличенный фрагмент;  $в$ ,  $г$  – относительные флуктуации освещенности кромки венца и волн  $\alpha$ .

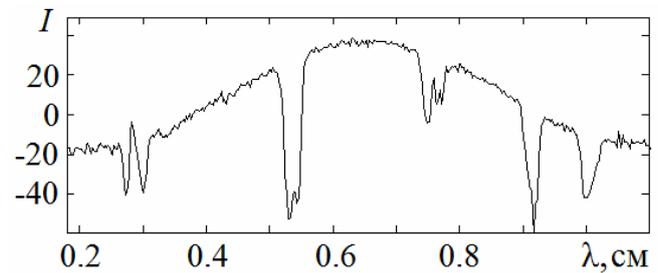
Результат фотометрии периодических структур на передней (видимой) части капли вдоль линии контакта представлен на рис. 3.8,  $b$ , где максимумы освещенности соответствуют вершинам внутренней части венца, причем на видимой части капли насчитывается 10 вершин, как и при погружении капли воды в раствор этанола. Расстояния между вершинами составляют от 0.025 до 0.05 см.

Короткие капиллярные волны на поверхности капли этанола, падающей в слой воды (рис. 3.9,  $a$ ,  $R_{\sigma} = 0.46$ ), отсутствуют, следовательно, брызги на нее не попадают. Число стримеров в формирующемся венце относительно небольшое, на анализируемом участке зафиксировано 5 стримеров на расстоянии от 0.08 до 0.26 см друг от друга (фотометрия на рис. 3.9,  $b$ ). Длина струй варьируется от 0.07

до 0.27 см, а их отношение к толщине, взятой на полувысоте, составляет 5.3, 13, 16.5, 7, 3.4 соответственно (отсчет струек ведется слева направо).



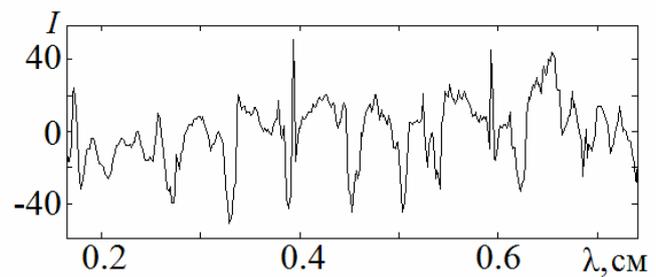
а)



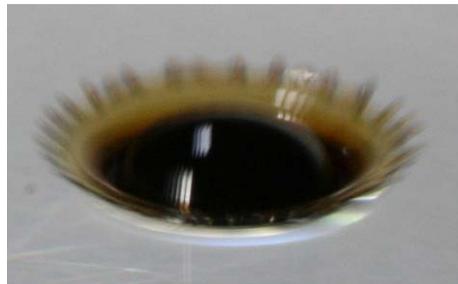
б)



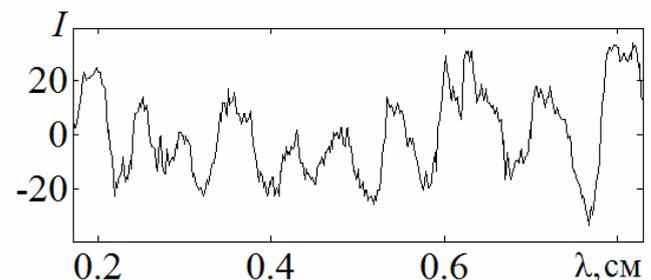
в)



г)



д)



е)

Рис. 3.9. Гладкие поверхности капля водного раствора этанола (а), окрашенного подсолнечного масла (в) и нефти (д) (погружение в воду  $R_{\sigma} = 0.46, 0.38, 0.42$ ): б, г, е – относительные флуктуации освещенности кромок венцов (а, б, в).

Капиллярные волны на поверхности погружающейся капли не возникают при падении капли масла в воду (рис. 3.9, в,  $R_{\sigma} = 0.38$ ), которое растекается по каверне и попадает на внутреннюю поверхность венца. В картине течений выражены две группы цилиндрических стримеров. Одну из них составляют более тонкие и длинные стримеры, вылетающие настильно на ранней стадии погружения капли. Вторая, позднее формирующаяся группа, включает более

толстые и короткие стримеры, соединенные тонкой пленкой. На поверхности толстых стримеров наблюдаются следы масла. Окраска внутренней части венца и стримеров указывает на участие обеих несмешивающихся жидкостей - и подстилающей воды, и масла капли, в их формировании. В целом прозрачный венец незначительно выступает над невозмущенной поверхностью жидкости, что позволяет хорошо рассмотреть внутреннюю поверхность каверны.

В распределении освещенности вдоль видимой части задней кромки венца, представленной на рис. 3.9, *з*, регистрируется 11 регулярно расположенных стримеров, среднее расстояние между которыми составляет 0.06 см.

Для всплеска капли нефти при ударе о поверхность воды (рис. 3.9, *д*,  $R_c = 0.42$ ) также характерно наличие однородных цилиндрических стримеров на кромке венца и отсутствие капиллярных волн на поверхности капли. По количеству выступов на участке венца (и расстояний между ними) картина течений аналогична возникающей при падении капли масла. Однако в ней отсутствует первичная группа тонких стримеров, вылетающих настильно.

В момент касания капель поверхности принимающей жидкости начинается передача в жидкость вещества, энергии и импульса подлетающей капли, а также уничтожение соприкасающихся свободных поверхностей. При этом доступная потенциальная поверхностная энергия в тонкой области слияния трансформируется во внутреннюю энергию, что вызывает локальный скачек давления и температуры. Совместное действие гидродинамических (соприкосновение поверхностей) и термодинамических факторов формирует вылетающие из области контакта тонкую кольцевую пелену, веер стримеров и брызги. Траектории разлета брызг находятся в широком угловом диапазоне, который определяется геометрией и динамикой столкновения поверхностей жидкостей, а также действием поверхностных сил, которые зависят от отношения коэффициентов поверхностного натяжения контактирующих сред.

Проведенные опыты показали, что часть вылетающих брызг достигает поверхности погружающейся капли, если значения относительного коэффициента поверхностного натяжения контактирующих сред  $R_c$  меньше или равны нулю.

Область контакта перемещается по поверхности капли и формирует группу коротких капиллярных волн (для капелек воды, ударяющих по поверхности погружающейся капли воды длина волны составила 0.011 см и уменьшалась к вершине капли). Отдельные мельчайшие брызги и вызванные ими капиллярные волны на поверхности капли наблюдались уже в первые моменты контакта с принимающей жидкостью.

### 3.5 Эволюция формы каверны и венца

Более детально эволюцию формы каверны, образующейся в глубокой воде в результате падения капли водного раствора ализариновых чернил диаметром  $D = 0.42$  см, свободно падающей с высоты  $H = 48$  см, иллюстрирует серия фотографий, приведенных на рис. 3.9 (вид сбоку). 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.

В начальной фазе равномерно окрашенные боковые стенки каверны имеют цилиндрическую, а дно – почти сферическую форму с несколькими небольшими выступами (рис. 3.10, *а*), один из которых диаметром 0.43 мм располагается на дне в центре, а другой, диаметром 0.42 мм – сбоку справа.

В фазе погружения венца (рис. 3.10, *б*) максимальный диаметр каверны составляет 11.7 мм, глубина 6.8 мм, ее цилиндрические стенки переходят в слабokonические. Одновременно растут и выступы, присутствующие на рис. 3.10, *а*. Опускающиеся с венца капиллярные волны [73] деформируют стенки и дно каверны (рис. 3.10, *в*), на ее контуре появляются вогнутые участки. На поздней стадии каверна принимает коническую форму с плоским дном (рис. 3.10, *г*). Мелкие выступы расплываются и трансформируются в окрашенные струйки. В данной традиционной проекции тонкая структура картины течения не визуализируется в силу интегрирования в направлении луча зрения.

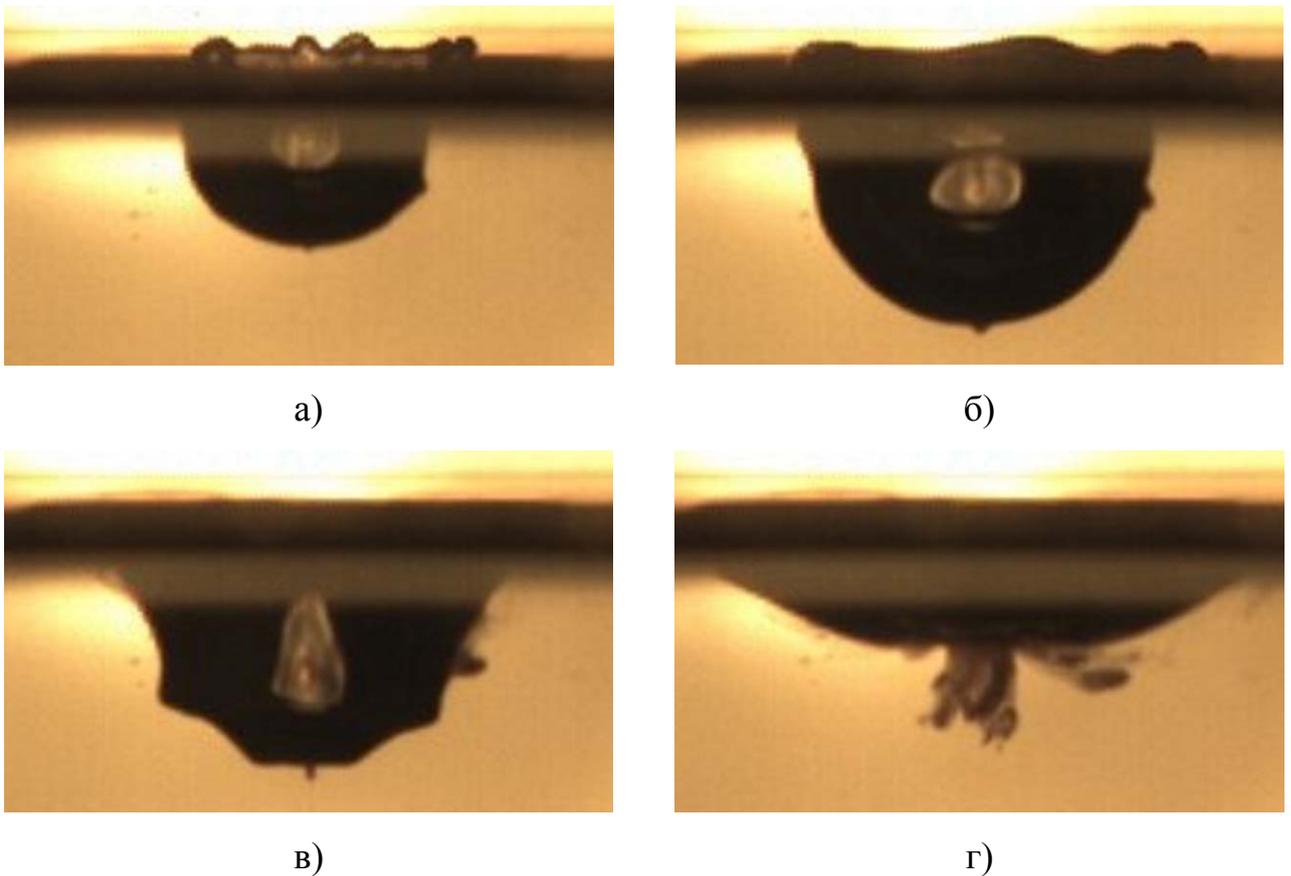


Рис. 3.10. Форма каверны, образующейся в результате падения капли раствора чернил в воду ( $h_i = 4.5$  см,  $H = 48$  см,  $D = 0.42$  см,  $U = 2.5$  м/с, вид сбоку): а – г –  $t = 3, 9.8, 18.7, 25$  мс

На графике изменения размеров каверны (рис. 3.11) выделены четыре участка: начальный интенсивного роста I продолжительностью 9 мс, стабилизации размеров II (9-16 мс), наполнения каверны III (16-24 мс), формирования поверхностной впадины IV (24-60 мс). Глубина каверны, форма которой меняется во времени под действием сил различной природы (гравитационных, инерционных, капиллярных) на начальном участке  $t < t_1$  растет, затем стабилизируются в интервале  $t_1 \div t_2$ , и немонотонно убывает при  $t > t_2$ .

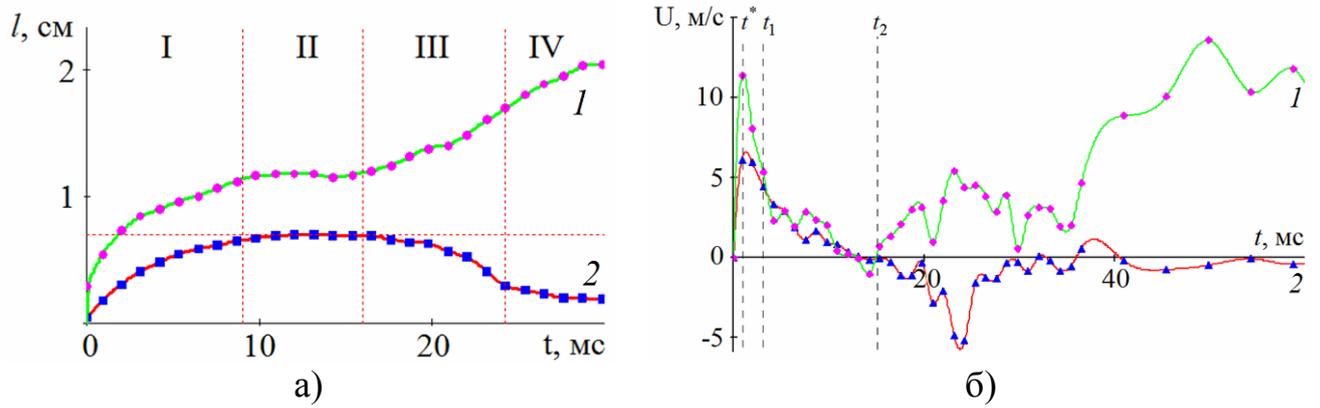


Рис. 3.11. Геометрия каверны – размеры (а) и скорость их изменения, (б):

1 – диаметр; 2 – глубина

На участке I, III, IV вариации диаметра и глубины каверны аппроксимируются степенными функциями вида:  $d_I(t) = a_I(t - k_I)^{N_I}$ ,  $h_I(t) = b_I(c^*t - l_I)^{M_I}$ ,  $[d] = [h] = \text{см}$ , где  $a_{I-III} = 3.3, 500, 52$ ,  $b_{I-III} = 3.4, 2.4, 0.002$ ,  $N_{I-III} = 0.2, 1.5, 1$ ,  $M_{I-III} = 0.3, 0.33, -0.9$ ,  $k_{I-III} = 0, 0.015, 0$ ,  $l_{I-III} = 0, -0.024, 0.02$ ,  $[t] = \text{с}$  ( $c^* = 1$  везде, за исключением спадающего участка кривой 2 на рис. 3.11, а на временном интервале от 16 до 24 мс, где  $c^* = -1$ ). На участке III, после фазы стабилизации, диаметр каверны вновь начинает линейно расти со временем, при этом ее глубина убывает.

Эволюция венца, образованного над поверхностью глубокой воды при погружении капли воды диаметром  $D = 0.4$  мм, свободно падающей с высоты  $H = 40$  см, представлена выборками из видеофильма (рис. 3.12), иллюстрирующими разные фазы развития венца: образование пелены брызг и стримеров (а), трансформация кольца брызг в цилиндрический венец с шевроном, с вершин которого эжектируются мелкие брызги и стримеры (б), завершающий этап формирования венца, характеризующийся максимальной высотой цилиндрической части венца ( $h$  на рис. 3.12, в), и этапы разрушения венца с увеличением угла наклона стенок венца и размеров отделяющихся вторичных капель, капиллярными волнами, на поверхности венца, динамика которых подробно рассматривалась в [73]. Линиями 1 и 2 на рис. 3.12, в обозначены

уровни венца, на которых измерялись диаметры шеврона венца (1) и тела венца у основания (2).

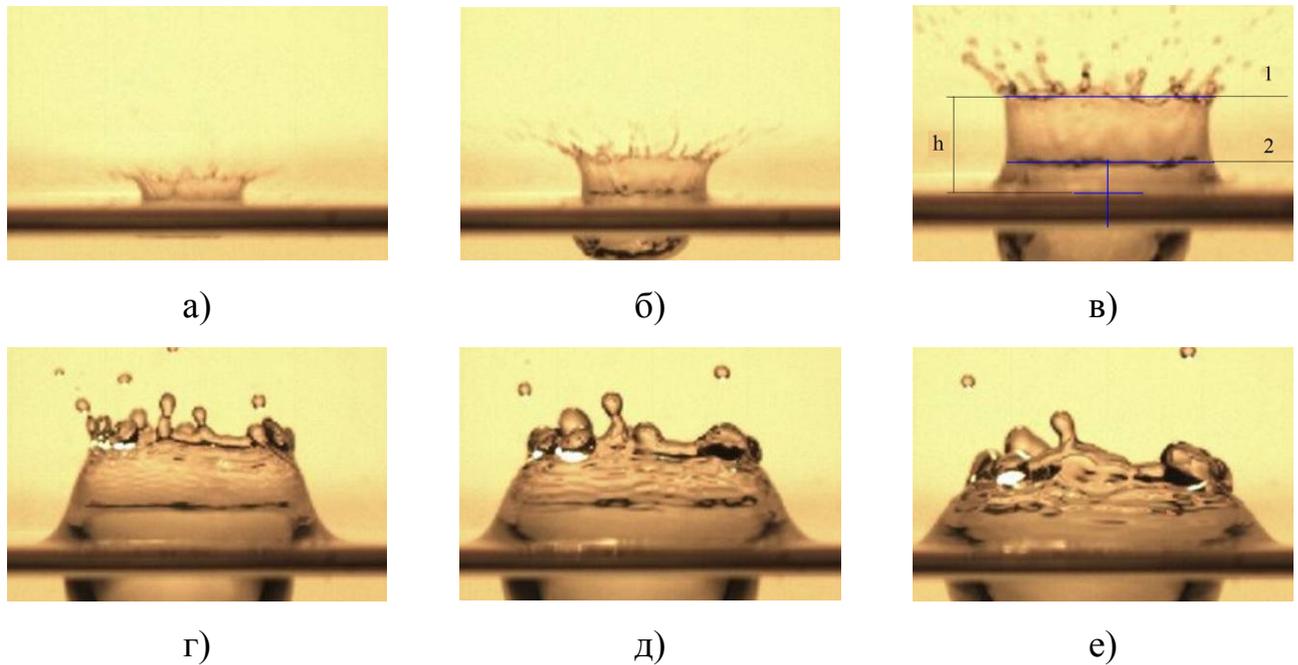


Рис. 3.12. Эволюция формы венца, образованного при погружении капли воды в воду: а-е) –  $t = 0.25, 1.5, 4, 15.3, 24, 32.3$  мс.

Диаметры венца у основания (рис. 3.13, а, кривая 1) и около шеврона (кривая 2) со временем увеличиваются, причем у основания – более равномерно. Кривая 1 изменяется монотонно, а на кривой 2 четко выражены два участка: краткий начальный I ( $0 < t < 1.5$  мс) с быстрым немонотонным увеличением и продолжительный с линейным ростом на интервале 1.5 – 40 мс, что связано с трансформацией кольцевой пелены брызг в венец с шевроном. Переход в зону III характеризует изменение отношения диаметров венца – диаметр у основания становится больше, стенки венца забиваются внутрь.

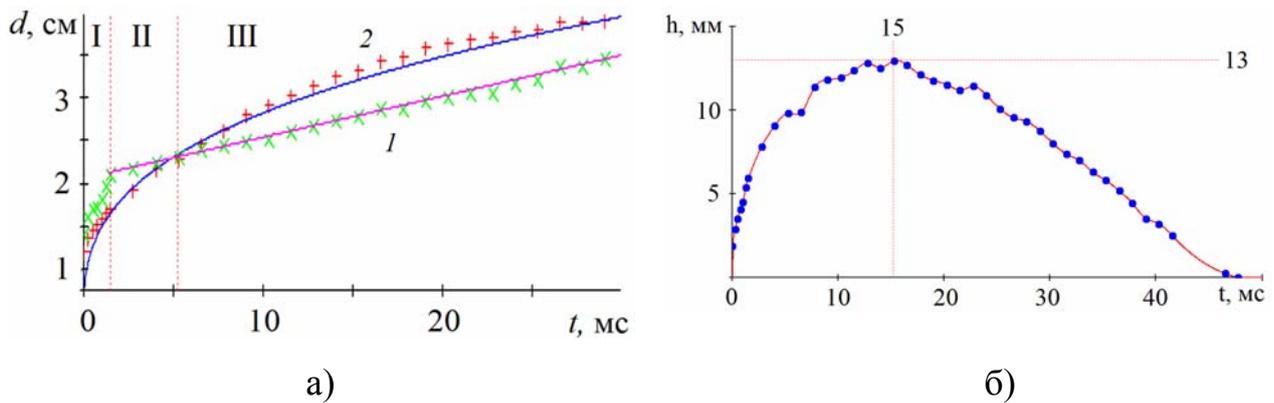


Рис. 3.13. Вариации размеров венца: а) диаметров на шевроне (1) и у основания (2); б) высоты венца  $h$ . Границы интервалов I, II:  $t = 1.5, 5.25$  мс

Изменение венца со временем (рис. 3.13, б) характеризуется быстрым ростом до критической отметки  $t_{cr} = 15$  мс от соприкосновения капли с поверхностью принимающей жидкости, когда достигается максимальная глубина каверны  $h = 13$  мм, и, далее, линейным убыванием до нуля. Временная отметка  $t_{cr}$  в эволюции венца совпадает с временной меткой  $t_2$ , обозначающей на рис. 3.11, б время достижения каверной максимальной глубины с изменением знака скорости дальнейшей эволюции, а также достижение минимальной скорости эволюции диаметра каверны у поверхности принимающей жидкости, после чего диаметр каверны начинает линейно возрастать. Таким образом, временная отметка  $t_{cr}$ , полученная при анализе эволюции венца и каверны в двух независимых экспериментах при равных условиях, обозначает переход из фазы роста (развития венца и каверны) к фазе разрушения венца и захлопывания каверны.

### 3.6 Выводы к третьей главе

Методами высокоскоростной съемки и фоторегистрации в режиме формирования центральной кумулятивной струи были выделены традиционно изучаемые компоненты течений, наблюдаемые при первичном контакте свободно падающей капли с принимающей жидкостью, а также сопутствующие тонкоструктурные компоненты.

При отрыве от сопла дозатора в капле остаются объемные осцилляции, которые сохраняются до соприкосновения с принимающей жидкостью; форма капли при контакте с поверхностью принимающей жидкостью влияет на геометрию последующих течений. При соприкосновении капли с принимающей жидкостью и последующем ее погружении деформация происходит лишь в зоне слияния, непогруженная часть капли остается недеформированной и не меняет скорости движения. Существенные отклонения от линейного движения наблюдаются в завершении процесса погружения, когда над поверхностью принимающей жидкости остаются около 5% от диаметра капли.

Уничтожение свободной поверхности происходит по всей площади пятна контакта капли с принимающей жидкостью, а затем доступная потенциальная поверхностная энергия поступает только в узкое кольцо контакта. Выделяемая при слиянии энергия трансформируется в поверхностную и кинетическую энергию новых компонентов течений (пелены стримеров и брызг), а также во внутреннюю энергию среды. Ввиду изотропии действия давления (скалярной величины) стримеры разлетаются из области контакта в широком угловом диапазоне и могут попадать на поверхность погружающейся капли.

Мелкие брызги, образующие капиллярные волны, попадают на поверхность капли при отрицательных и нулевых значениях относительной разности коэффициентов поверхностного натяжения контактирующих жидкостей  $R_{\sigma}$ . Число ударов брызг о поверхность капли растет с увеличением разности коэффициентов поверхностного натяжения сред. По мере погружения капли диаметр брызг растет. Отдельные мельчайшие брызги и вызванные ими капиллярные волны на поверхности капли при  $R_{\sigma} < 0$  наблюдались уже в первые моменты контакта с принимающей жидкостью.

Эволюция венца и каверны аппроксимируется простыми степенными и линейными функциями. На их поверхностях визуализируется сложная структура фазовых поверхностей капиллярных волн со сложной структурой фазовых поверхностей.

## **Глава 4. Распределение вещества капли в принимающей жидкости**

Вопрос о распределении вещества капли в принимающей жидкости ставился еще в первых работах [24, 25]. Для возможности визуализации картины распределения в вещество капли добавлялись красители. Вопрос о том, что происходит с жидкостью капли при погружении в жидкость, ставится и в [117]. Для ответа на этот вопрос капля окрашенной щелочи падала в сосуд, наполненный кислотой с целью нейтрализации щелочи и исключения окрашивания каплей принимающей жидкости. В теоретических работах и численных моделях течения, образованные погружающейся каплей, предполагались осесимметричными, а распределение жидкости капли по поверхности короны – равномерным [38, 39]. В соответствии с этим предположением визуализация в экспериментальных исследованиях производилась в вертикальной плоскости [117, 118].

В отдельных работах отмечаются нерегулярности в распределении вещества капли на поверхности принимающей жидкости [72, 119], однако систематического изучения картины течения в горизонтальной плоскости не проводилось.

Разработанная методика позволяет детально проследить эволюцию картины течения при погружении капли (глава 3).

### **4.1 Линейчатые структуры в картине распределения вещества капли при погружении каплей жидкости, смешивающейся с принимающей жидкостью**

Высокоразрешающая регистрация картины течения, вызванного погружением в глубокую жидкость свободно падающей капли вещества, отличного по оптическим свойствам от принимающей среды позволила надежно установить, что вещество капли распределяется по стенкам венца неравномерно, а формирует тонкие линейчатые элементы – волокна, расположенные вертикально по всей внутренней поверхности венца и разделенные зонами, не содержащими

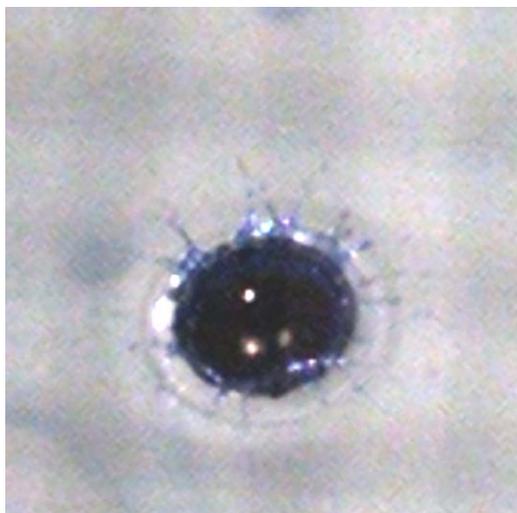
вещество капли [120, 121]. В классической постановке эксперимента (линии визирования направлены вдоль поверхности жидкости) линейчатые элементы зарегистрированы лишь на поверхности венца. Регистрация течений под большим углом к горизонту ( $70^\circ$ - $75^\circ$ ) позволяет визуализировать пространственную структуру картины распределения вещества капли по дну каверны, которая ранее систематически не исследовалась.

В проведенных экспериментах растворы ализариновых чернил, окрашенного спирта, глицерина, солей (медный и железный купорос, перманганат калия, поваренная соль), уксусной кислоты и молоко (3% жирности) погружались в чистую и подкрашенную глубокую воду; синие ализариновые чернила падали в молоко, молочные сливки и подсолнечное масло. Все эксперименты проводились в режиме формирования выраженной кумулятивной струи (высота падения  $H = 40 \div 80$  см, диаметры капель  $D = 3 \div 4.5$  мм). В экспериментах значения традиционных безразмерных чисел, используемых в ряде работ для определения режима течений, лежали в диапазоне: числа Рейнольдса  $Re = 150 \div 10^4$ , Фруда  $Fr_d = 140 \div 200$ , Вебера  $We_d = 400 \div 1000$ , Бонда  $Bo = 2.4 \div 3.4$ , Онезорге  $Oh = 18 \cdot 10^{-4} \div 17 \cdot 10^{-2}$ .

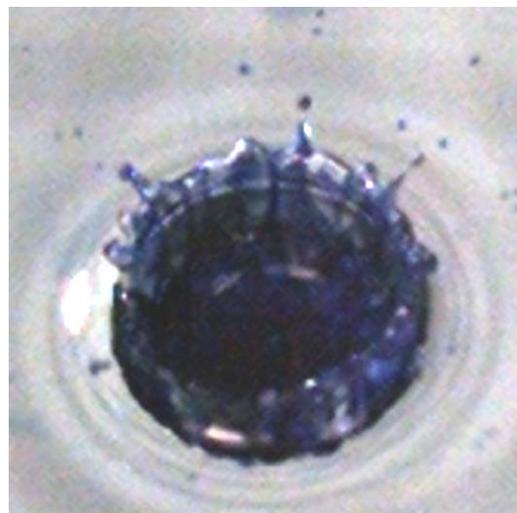
Общие свойства сложной эволюционирующей картины распределения поступающего вещества по поверхности принимающей жидкости иллюстрируются выборками из видеогаммы процесса погружения окрашенной синими ализариновыми чернилами капли воды в чистую воду (рис. 4.1). При первичном контакте из области соприкосновения окрашенной капли с водой вылетает тонкая кольцевая пелена, к внешней кромке которой примыкает семейство тонких радиальных струек (рис. 4.1, *a*).

В ходе погружения капли на внутренней поверхности венца и растущей каверны формируется сложный линейчатый многоярусный рисунок, основным элементом которого служат тонкие окрашенные волокна. В верхней части растущего венца (рис. 4.1, *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

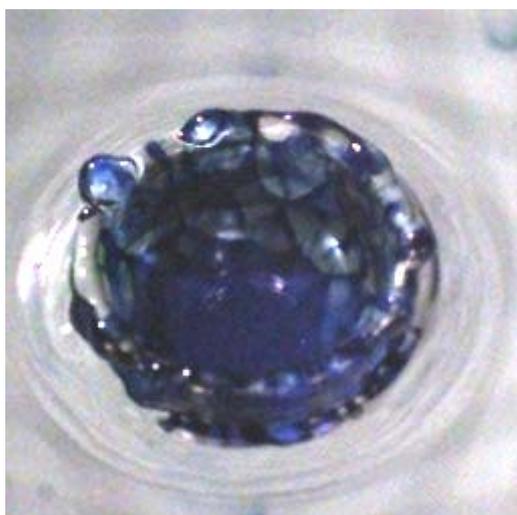
окрашенных волокон, достигающих вершин зубцов, попадает в вылетающие капельки. Некоторые окрашенные линии остаются в теле венца и переходят на его внешнюю кромку.



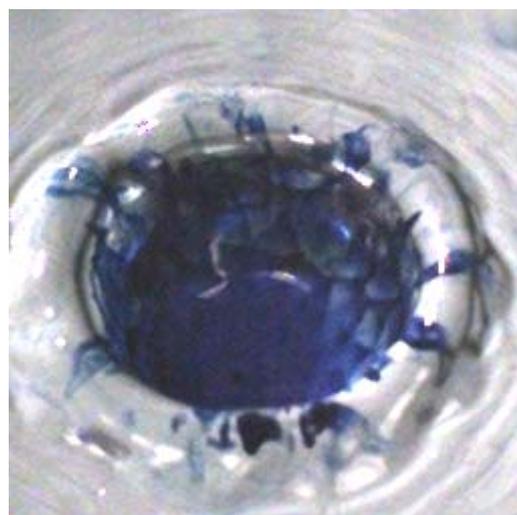
а)



б)



в)



г)

Рис. 4.1. Эволюция картины распределения вещества капли по поверхности каверны и венца ( $h_1 = 21$  см,  $H = 40$  см,  $D = 0.42$  см):  $a - z - t = 0.7, 3.13, 14, 24$  мс

В следующем ярусе высотой 0.14 см волокна расположены наклонно. Некоторые из них образуют простые геометрические фигуры – преимущественно треугольники и четырехугольники.

По мере роста высоты стенок венца первый ряд параллельных полосок дополняется новыми ярусами – вначале с треугольными фигурами, затем – кольцевым ободком, заполненным многоугольниками. Семейство вертикальных линий на верхнем слое венца контактирует с вершинами треугольников подстилающего ряда (рис. 4.1, в).

Под первым ярусом сетчатого орнамента располагается следующий, 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, или четкой сеткой.

В дальнейшем распределение красителя по стенкам каверны становится еще более сложным. На верхней кромке венца со сглаженными зубцами шеврона сохраняются и окрашенные, и чистые участки воды. Внутренняя поверхность каверны покрывается диффузным слоем красителя, в котором выделяются окрашенные волокна, образующие узоры из фигур с четко очерченными углами (рис. 4.1, г). Высота верхних ярусов составляет 0.75 см. Среди заполняющих фигур представлены треугольники (близкие к правильным или равнобедренным, длина сторон верхнего ряда – 3 мм, оснований – 3.3 мм), а также четырехугольники со стороной 3.1 и 3.5 мм.

В линейчатой структуре распределения вещества капли по внутренней поверхности каверны (смешивающиеся жидкости) выделяется три масштаба. Первый из них определяет длину структур и прямо пропорционален скорости капли  $\delta_l = U \cdot t$ , другой – диссипативно капиллярный – определяет толщину слоя  $\delta_\gamma^v = v^2 / \gamma$  (толщина поверхностного слоя  $\Delta = \delta_{\gamma 1}^{v1} + \delta_{\gamma 2}^{v2}$ , где 1 и 2 – взаимодействующие среды) и ширину линейчатых структур  $\delta_w$ .

Для оценки универсальности эффекта филаментизации вещества капли (примеси) в принимающей жидкости, наблюдаемого при погружении капли водного раствора ализариновых чернил, были проведены серии опытов с каплями спиртового раствора бриллиантовой зелени, молока и водных растворов

неорганических солей (перманганата калия, медного и железного купороса, подкрашенной поваренной соли), погружающихся в чистую воду. Всего было проведено около 500 опытов. Выделены общие элементы и особенности картины распределения вещества.

### **Водный раствор ализариновых чернил**

Серия фотографий, более детально иллюстрирующих эволюцию и тонкие компоненты линейчатой картины распределения вещества, возникающей на деформированной поверхности принимающей жидкости при погружении капли водного раствора синих ализариновых чернил в воду (концентрация  $C=1:4$ ), приведена на рис. 4.2 (левый столбец I – полная фотография, правый II – вырезки с коэффициентом увеличения 4:1). В данных опытах капли диаметром  $D=0.42$  см свободно падали с высоты  $H=48$  см. Визуализация картины течения производилась под углом  $20^\circ$ - $25^\circ$  к горизонту.

Анализ пространственного распределения вещества капли по поверхности венца осуществлялся методом фотометрии картины течения вдоль видимых участков пелены стримеров и венца, которые составляли  $120^\circ$ . Исходя из распределения интенсивности света вдоль анализируемой кривой, соответствующей поверхности пелены или венца на заданной высоте от принимающей жидкости, оценивались пространственные распределения и толщины стримеров, заострений шеврона и окрашенных структур венца. По оси абсцисс откладывалось положение на анализируемой кривой в см, а по оси ординат – яркость пикселя изображения в относительных единицах. Положению исследуемых структур соответствуют заостренные минимумы на графиках распределения интенсивности света. Размерная метка на рис. 4.2 имеет значение 1 см.

Фотометрия картины всплеска, соответствующей времени  $t=0.27$  с от касания капель поверхности принимающей жидкости (рис. 4.2 а), показала наличие большого числа сдвоенных пиков на графике распределения

освещенности изображения по кромке пелены брызг, окружающих каплю (на рис. 4.2, а в видимой части пелены было определено 14 стримеров).

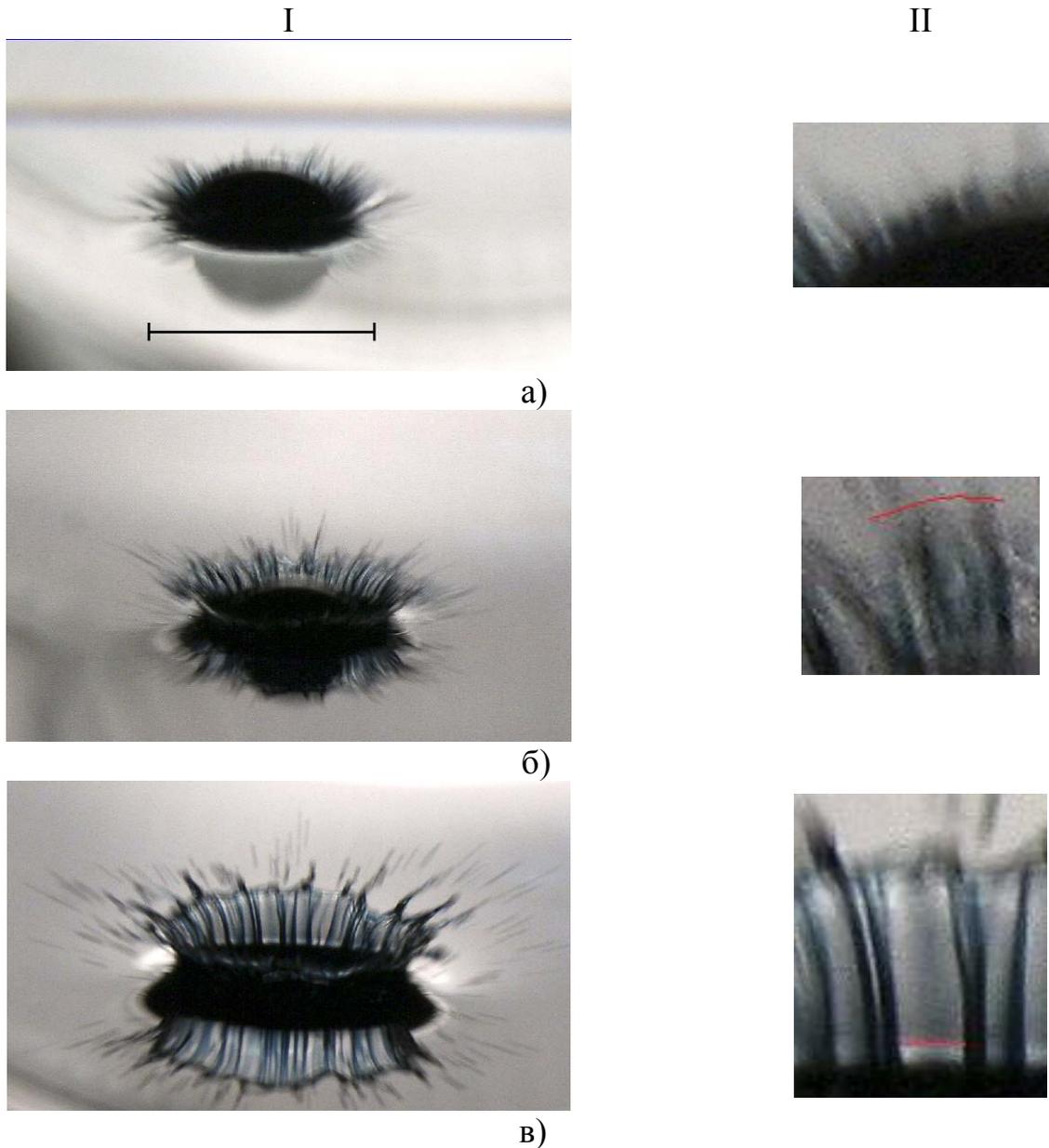


Рис. 4.2. Пелена стримеров и линейчатое распределение вещества капли по поверхности формирующегося венца (капля чернил падает в слой воды). Линия визирования – под углом  $20^\circ$  к горизонту.

На следующем изображении всплеска (рис. 4.2, б), соответствующем времени  $t = 0.4$  мс от удара, отмечено 17 стримеров, формирующих стенки венца. Пелена брызг более плотная, в ее формировании задействована подстилающая жидкость, представляющая собой неокрашенные светлые участки в пелене брызг. Окрашенные структуры в системе стримеров ориентированы под различными

углами, некоторые из них сливаются. На врезке рис. 4.2, б представлен участок венца с неразрешенными окрашенными стримерами.

Через 0.5 мс от начала процесса ореол брызг трансформируется в корону, состоящую из двух частей: цилиндрический венец и шеврон (рис. 4.2, в). На видимой части внутренней поверхности венца зарегистрированы 16 темных вертикальных полос, разделенных неокрашенной жидкостью. Расстояние между соседними темными полосами варьируется от 0.02 до 0.13 см.

Кроме ярко выраженных окрашенных полос на светлых участках поверхности венца наблюдаются слабоокрашенные участки, которые не идентифицировались как периодические структуры (рис. 4.2, в, столбец II), поскольку определение их границ затруднительно. На всей поверхности венца сохраняются неразрешенные структуры, состоящие из двух-трех окрашенных нитей, представляющих собой филаментизацию периодических структур. На анализируемой части шеврона было зарегистрировано 11 струек, расстояние между которыми варьируется от 0.02 до 0.23 см. Часть струек вылетает из шеврона полностью, часть – разбивается на брызги и формирует вершину шеврона. Положения вылетевших струек совпадает с положением окрашенных нитей на поверхности венца.

Картина всплеска в более поздней фазе ( $t = 0.7$  мс, рис. 4.3, а) сохраняет общее количество полос на видимой части венца (зарегистрировано 15 полос, рис. 4.3, г), однако с ростом венца увеличивается среднее расстояние между ними. Максимальное расстояние при этом составляет 0.09 см. Средняя ширина вертикальных окрашенных структур составляет  $\hat{l} = 0.027$  см.

На поверхности венца появляются новые структуры – группы капиллярных волн, развивающиеся у кромки шеврона между вершинами. На поверхности венца периодические структуры имеют пики в спектре на длинах 0.046, 0.05, 0.084 и 0.11 см (рис. 4.3, в). В формировании вершин шеврона (здесь 8 вершин) участвуют от 2 до 4 нитей толщиной порядка 0.01 см, образующие сетчатую структуру у основания зубцов (рис. 4.3, б). Расстояния между вершинами,

измеренные на кромке шеврона, лежат в диапазоне от 0.06 до 0.27 см, толщина вершин – от 0.04 до 0.06 см.

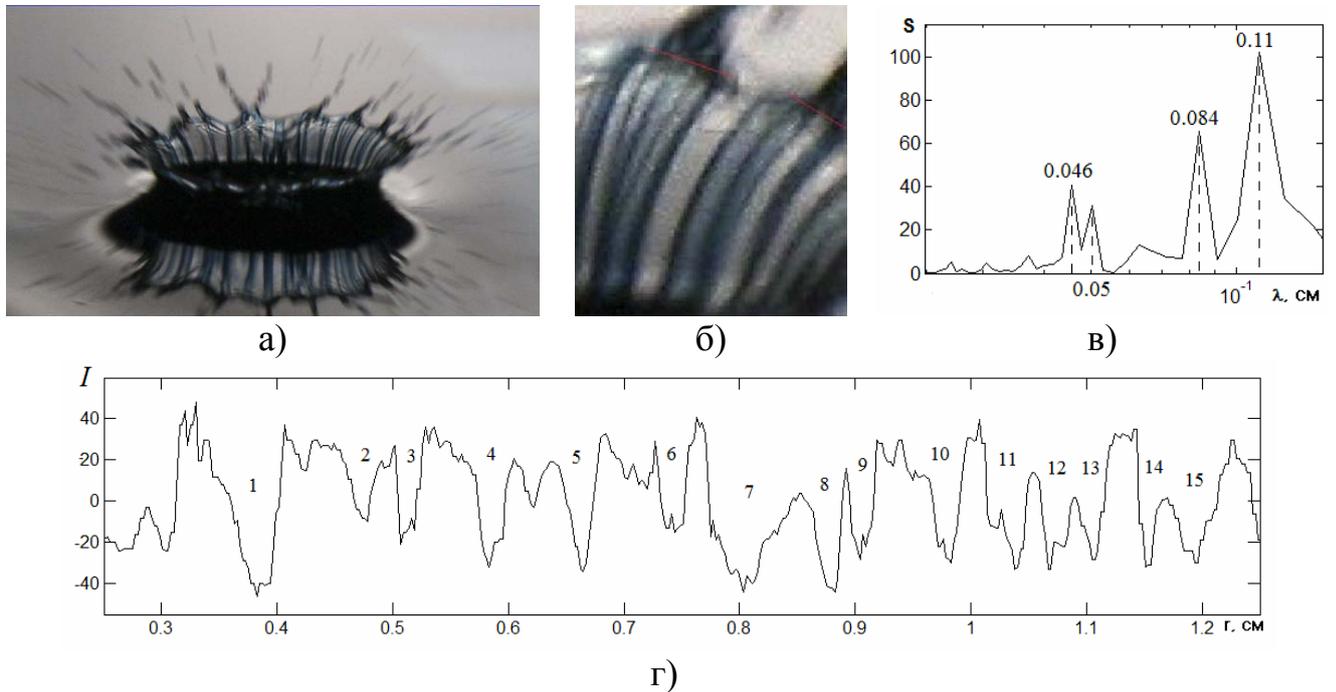


Рис. 4.3. Линейчатые структуры на поверхности венца при  $t = 0.7$  мс. Линейные масштабы:  $\delta_l = U \cdot t = 0.15$  см;  $\delta_\gamma^v = 1.4 \cdot 10^{-6}$  см;  $\delta_U^\gamma = 1.2 \cdot 10^{-3}$  см;  $\delta_U^v = 4 \cdot 10^{-5}$  см,  $\delta_g^\gamma = 0.27$  см.

Картина распределения вещества капли в фазе выраженного венца через время  $t = 1.5$  мс от момента касания представлена на рис. 4.4. Окрашенные тонкие вытянутые волокна подходят к верхней кромке венца, как к вершинам зубцов, так и ко дну гладких впадин (рис. 4.4 а). Они могут касаться поверхности шеврона венца или останавливаться на некотором расстоянии от нее (рис. 4.4, б). В таких случаях краска от коротких волокон поступает к зубцу шеврона с помощью тонких наклонных лигаментов (волокон). Непосредственно под зубцом наблюдается разрыв фазовых поверхностей коротких капиллярных волн (рис. 4.4, б). Толщина отдельных окрашенных волокон (всего 15 волокон расположенных на расстоянии 0.03 – 0.12 см) составляет 0.01 см,. На поверхности венца периодические структуры имеют пики в спектре на длинах 0.08, 0.11, 0.15 и 0.19 см (рис. 4.4 в). Средняя ширина полосчатых структур составляет  $\hat{l} = 0.036$  см, ввиду наличия слившихся (неразрешенных) структур.

На анализируемой трети шеврона венца, приведенного на рис. 4.4, *a* выражены пять зубцов шириной от 0.04 до 0.08 см, расположенные на расстояниях от 0.09 до 0.5 см. С вершин зубцов выбрасываются брызги, капли в которых располагаются ярусами.

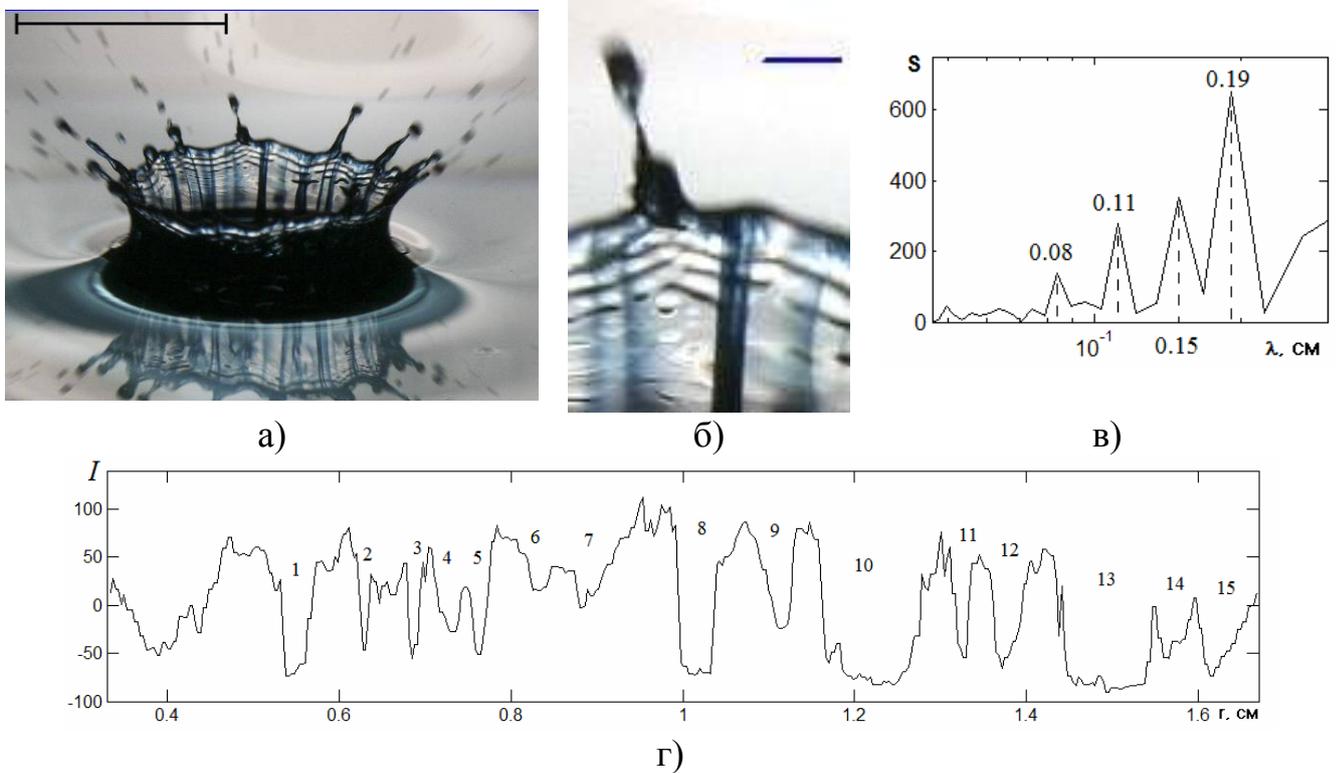


Рис. 4.4. Линейчатые структуры на поверхности венца при  $t=1.5$  мс. Линейные масштабы:  $\delta_l = U \cdot t = 0.38$  см;  $\delta_\gamma^v = 1.4 \cdot 10^{-6}$  см;  $\delta_U^v = 1.2 \cdot 10^{-3}$  см;  $\delta_U^v = 4 \cdot 10^{-5}$  см,  $\delta_g^v = 0.27$  см.

Со временем окраска кромки шеврона становится более плотной (рис. 4.5,  $t=2.5$  мс). Отдельные тонкие нити расплываются под действием течений и молекулярной диффузии на стенках венца, образуя слабоокрашенные полосы и пятна (расстояния между волокнами составляют от 0.02 до 0.14 см). Также регистрируются сверхтонкие волокна минимальной толщины 0.008 см, размытые окрашенные области (толщиной порядка 0.05 см) и вертикальные полосы толщиной до 0.11 см. Средняя ширина полосчатых структур составляет  $\hat{l} = 0.031$  см. Шеврон видимой области венца имеет 8 вершин с расстояниями от 0.13 до 0.44 см и шириной от 0.09 до 0.15 см.

На стенках венца наблюдаются системы гравитационно-капиллярных волн. На первом кадре (рис. 4.4) представлены группы волн длиной 0.033, 0.044, 0.033, 0.033, 0.031, 0.052 см (отсчет от кромки к жидкости) с разрывом фазовых поверхностей. Капиллярные волны постепенно покрывают всю поверхность венца (рис. 4.5, 4.6).

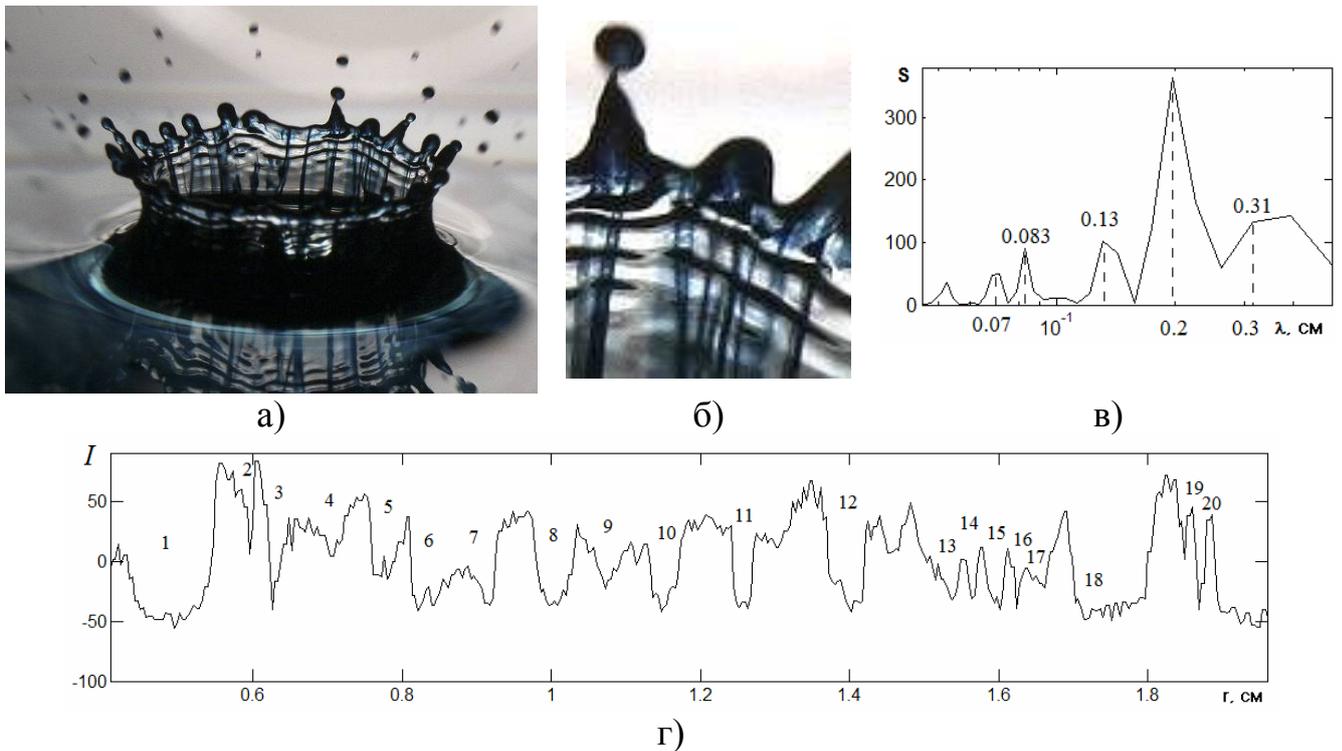


Рис. 4.5. Линейчатые структуры на поверхности венца при  $t = 2.5$  мс. Линейные масштабы:  $\delta_l = U \cdot t = 0.62$  см;  $\delta_\gamma^v = 1.4 \cdot 10^{-6}$  см;  $\delta_U^v = 1.2 \cdot 10^{-3}$  см;  $\delta_U^v = 4 \cdot 10^{-5}$  см,  $\delta_g^v = 0.27$  см.

На венце под вершиной шеврона (рис. 4.6, время 4.1 мс) выделены семь волокон толщиной от 0.005 до 0.035 см. На видимом участке внутренней поверхности венца сохраняется пять окрашенных полос, разнесенных на расстояниях от 0.17 до 0.46 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. 4.6, б). Ранее подобные волновые компоненты не визуализировались.

Постепенно в окрашенной картине наряду с остатками вертикальных волокон появляются горизонтальные кольца с шагом 0.15 см (рис. 4.5, 4.6), возможно вызванные переносом краски с вершины шеврона бегущими к его основанию. Под остатками зубца краска образует сложную сетчатую структуру с размерами ячеек от 0.015 до 0.025 см и толщиной волокон 0.007 – 0.013 см.

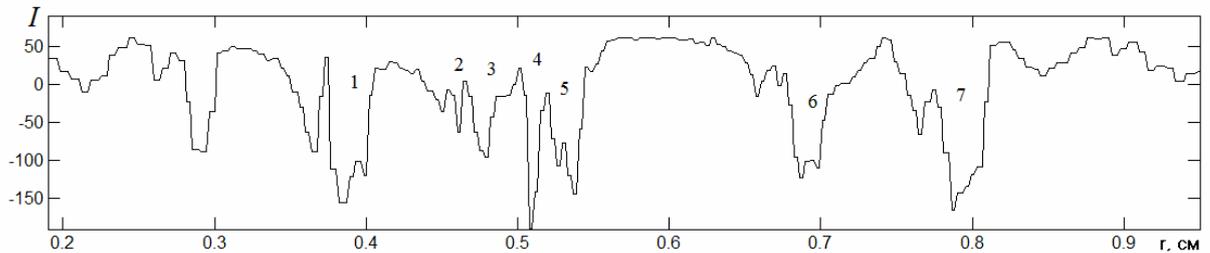


а)



б)

Часть венца под центральным стримером:



в)

Рис. 4.6. Линейчатые структуры на поверхности венца при  $t = 4.1$  мс. Линейные масштабы:  $\delta_l = U \cdot t = 0.78$  см;  $\delta_\gamma^v = 1.4 \cdot 10^{-6}$  см;  $\delta_U^\gamma = 1.2 \cdot 10^{-3}$  см;  $\delta_U^v = 4 \cdot 10^{-5}$  см,  $\delta_g^\gamma = 0.27$  см.

Сравнение фотографий, приведенных на рис. 4.1 и серии 4.2 – 4.6 позволяет сделать вывод, что окрашенные стримеры и последовательности вылетающих с их вершин брызг служат продолжением линейчатых элементов структуры в расширяющейся пелене и стенках венца. Дискретный характер расположения окрашенных волокон толщиной от 0.005 до 0.04 см сохраняется в течение всего времени существования венца. Линейный масштаб тонких окрашенных нитей и полосчатых структур  $\delta_w$  находится в диапазоне между капиллярным и капиллярно-гравитационным масштабами. В пространственных спектрах

вертикальных периодических структур на разных фазах процесса погружения капли устойчиво сохраняется пик на масштабе 0.08 см, однако наиболее выраженным для поздних фаз формирования венца является пик на длине 0.2 см, что немного меньше капиллярно-гравитационного масштаба.

### Падение капли раствора бриллиантовой зелени

Качественные особенности дискретной картины распределения окрашенной растворимой примеси сохраняются в процессе растекания капли спиртового раствора бриллиантовой зелени в воде, значения коэффициента поверхностного натяжения которого меньше, чем у воды ( $D = 0.3$  см,  $H = 50$  см,  $R_{\sigma} = 0.46$ ).

Область первичного контакта капли спиртового раствора бриллиантовой зелени окружена плотным веером разлетающихся стримеров, число которых растет по мере погружения капли (рис. 4.7, а).

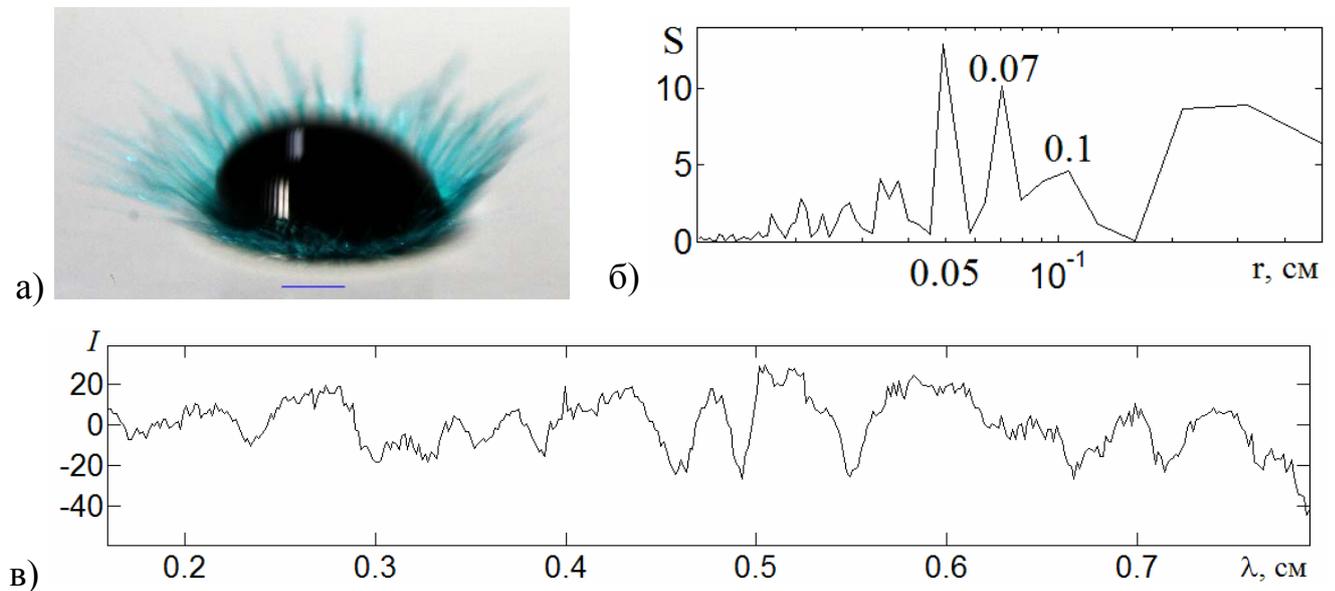


Рис. 4.7 Линейчатые структуры бриллиантовой зелени на поверхности венца при  $t = 0.3$  мс: а) фотография течений, б) пространственный спектр пелены брызг, в) фотометрия пелены. Линейные масштабы:  $\delta_l = U \cdot t = 0.07$  см;  $\delta_v^v = 28 \cdot 10^{-6}$  см;  $\delta_U^v = 5 \cdot 10^{-5}$  см;  $\delta_U^v = 12 \cdot 10^{-5}$  см,  $\delta_g^v = 0.18$  см.

Группы из 11 стримеров, состоящие из двух волокон средней толщиной 0.02 см (отстоящих друг от друга на расстояниях 0.017 см), располагаются на расстоянии 0.04 см (рис. 4.7, в).

Быстро растущий венец более тонкий, чем при падении капли чернил. С заостренных зубцов на его вершине вылетают быстрые и мелкие капельки (рис. 4.8,  $t = 0.4$  мс). Раствор бриллиантовой зелени на поверхности шеврона сосредоточен в тонких длинных волокнах, разделенных слабо окрашенными промежутками. Рассмотрение с большим увеличением показывает, что некоторые толстые полосы состоят из набора тонких волокон.

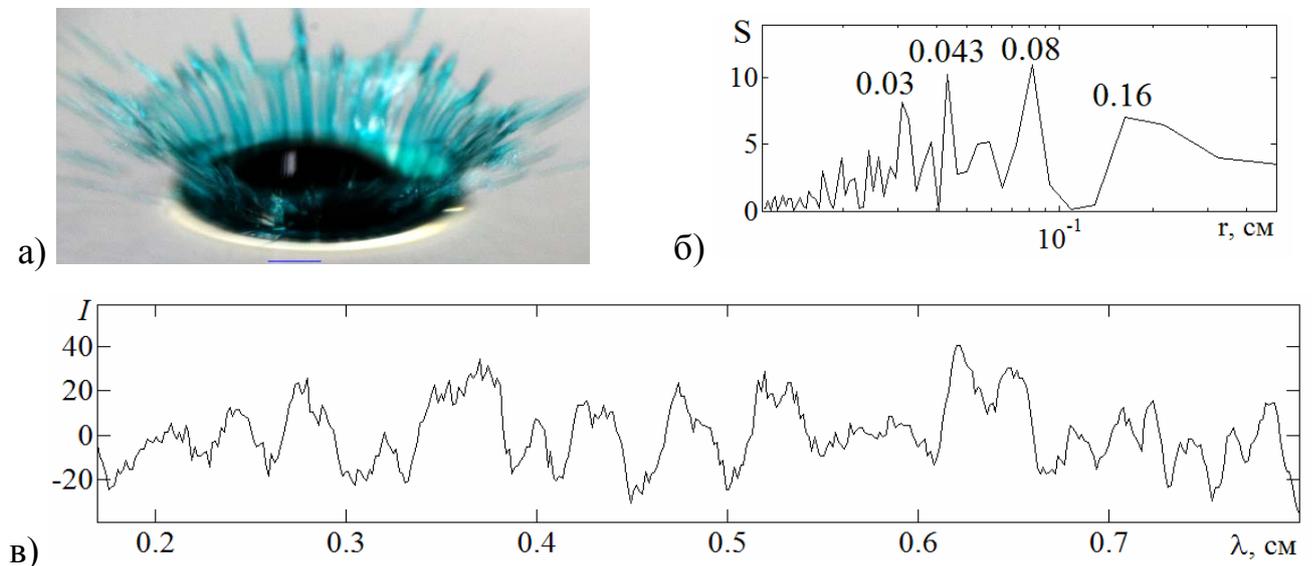


Рис. 4.8 Линейчатые структуры бриллиантовой зелени на поверхности венца при  $t = 0.4$  мс: а) фотография течений, б) пространственный спектр пелены брызг, в) фотометрия пелены. Линейные масштабы:  $\delta_l = U \cdot t = 0.1$  см;  $\delta_{\gamma}^v = 28 \cdot 10^{-6}$  см;  $\delta_U^{\gamma} = 5 \cdot 10^{-5}$  см;  $\delta_U^v = 12 \cdot 10^{-5}$  см,  $\delta_g^{\gamma} = 0.18$  см.

К каждому зубцу шеврона или стримеру, вылетающему в радиальном направлении, подходит одно окрашенное волокно или группа волокон (в большинстве случаев – к его центру, однако в некоторых – к краю или даже между зубцами). Большинство волокон собраны в тесные пары (на задней

поверхности венца выделены 18 окрашенных полос, составляющие 7 пар, с разделением волокон на расстояния от 0.01 до 0.023 см, рис. 4.8, в).

Ширина волокон варьируется от 0.01 до 0.03 см, расстояния между ними – от 0.01 до 0.04 см. Средняя ширина волокон составляет  $\hat{l} = 0.017$  см, что несколько меньше ширины волокон, образующихся при погружении капли чернил (0.027 см). Процентное соотношение такого уменьшения согласуется с уменьшением капиллярно-гравитационного масштаба, однако сами масштабы отличаются на порядок.

В последующей картине течения (рис. 4.9,  $t = 0.5$  мс) окрашенные полосы, образованные двумя тесно расположенными волокнами, становятся еще более выраженными, причем некоторые двойные полосы не разрешаются оптической системой.

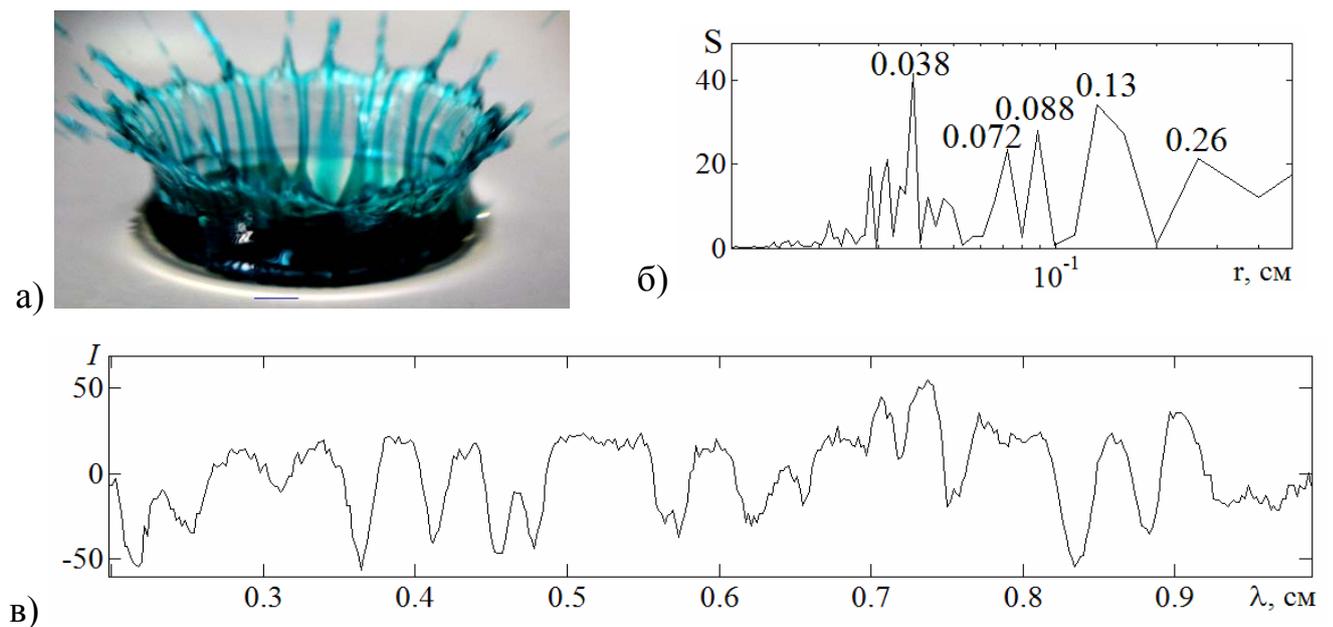


Рис. 4.9 Линейчатые структуры бриллиантовой зелени на поверхности венца при  $t = 0.5$  мс: а) фотография течений, б) пространственный спектр пелены брызг, в) фотометрия пелены. Линейные масштабы:  $\delta_l = U \cdot t = 0.13$  см;  $\delta_U^v = 28 \cdot 10^{-6}$  см;  $\delta_U^y = 5 \cdot 10^{-5}$  см;  $\delta_U^v = 12 \cdot 10^{-5}$  см,  $\delta_g^y = 0.18$  см.

На поверхности венца зарегистрировано 15 полос, среди них 6 – двойные (рис. 4.9, в). Ширина полос варьируется от 0.01 до 0.03 см (среднее значение  $\bar{l} = 0.017$  см). Ширина слабо окрашенных участков между двойными волокнами варьируется от 0.006 до 0.032 см, в то время как расстояние от одной системы двух полос до другой – от 0.03 до 0.07 см (рис. 4.9, в). Ширина тончайших элементов имеет тот же порядок, что и в случае погружения каплей растворов чернил.

Спектральная картина здесь более насыщенная, чем для всплесков капли чернил. Пики пространственного спектра находятся на масштабах 0.038, 0.072, 0.088, 0.13 и 0.26 см. (рис. 4.9, б) Некоторые двойные полосы сливаются в зубьях шеврона венца (8 зубьев расположены на расстояниях от 0.09 до 0.17 см).

Число окрашенных полосок не меняется по мере развития венца (рис. 4.10,  $t = 1.5$  мс): 14 полос шириной от 0.015 до 0.04 см расположены на расстояниях от 0.012 до 0.077 см.

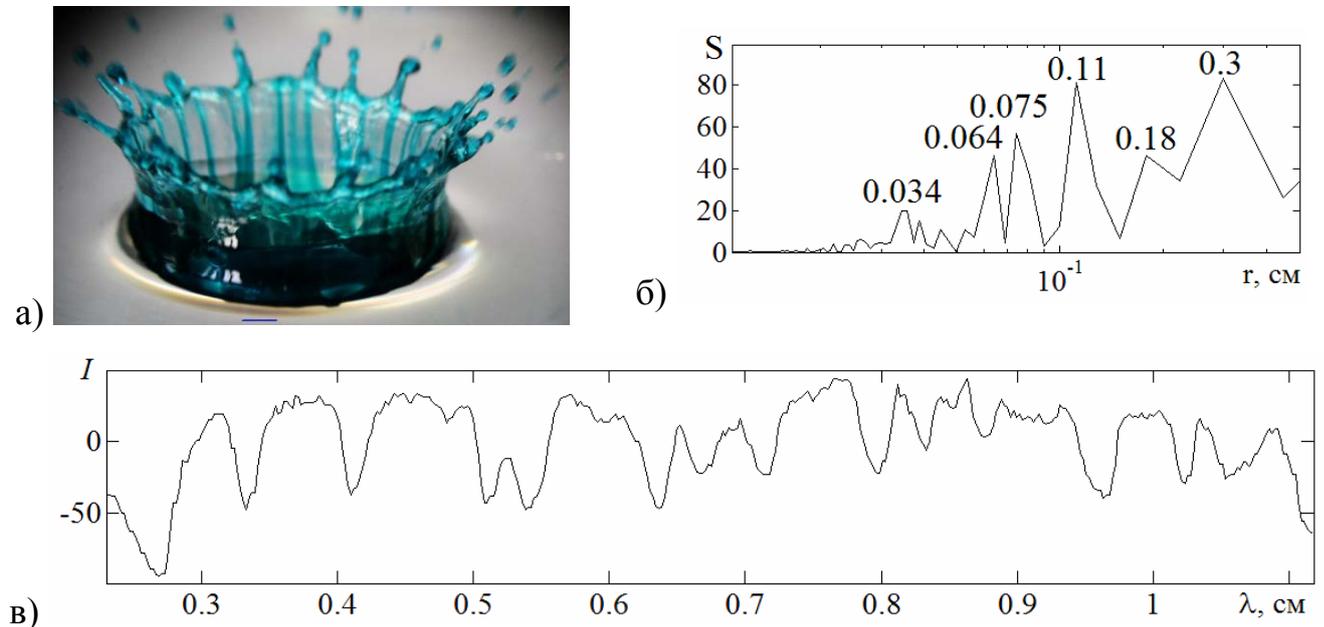


Рис. 4.10 Линейчатые структуры бриллиантовой зелени на поверхности венца при  $t = 1.5$  мс: а) картина течений, б) пространственный спектр пелены брызг, в) фотометрия пелены. Линейные масштабы:  $\delta_l = U \cdot t = 0.38$  см;  $\delta_\gamma^v = 28 \cdot 10^{-6}$  см;  $\delta_U^v = 5 \cdot 10^{-5}$  см;  $\delta_U = 12 \cdot 10^{-5}$  см,  $\delta_g^v = 0.18$  см.

Среднее значение ширины становится несколько больше, чем в опытах, соответствующих более ранним временам:  $\hat{l} = 0.023$  см, а среднее значение ширины промежуточных зон составляет 0.04 см. Границы волокон размываются на некоторых участках с увеличением плотности равномерной окраски поверхности венца. С вершин зубцов шеврона (6 зубцов на расстоянии 0.14 см) продолжают вылетать крупные вторичные капли. Кромка шеврона окрашена неравномерно, большая концентрация пигмента наблюдается в области зубьев. Промежуточные области окрашены слабо или не окрашены вообще.

Вторичные течения в венце постепенно разрушают регулярную картину расположения волокон, которые становятся наклонными и распадаются на отдельные участки, разделенные участками воды. Число целых окрашенных полос постепенно сокращается (на рис. 4.11, а, б – 8 и 5 полос). Горизонтальная фотометрия на полувысоте венца позволила различить 24 окрашенных участка со средним размером 0.024 см (рис. 4.11, в).



д)



е)

Рис. 4.11. Линейчатые структуры бриллиантовой зелени на поверхности венца а) при  $t = 2.5$  мс, б) при  $t = 4$  мс

### **Водный раствор медного купороса**

В типичной картине течения при частичном погружении капли насыщенного раствора медного купороса (массовая доля 18%, плотность  $\rho = 1.2$  г/см<sup>3</sup>) на рис. 4.12, а представлен остаток капли в центре вогнутого дна каверны и разлетающаяся пелена, отделенная от принимающей жидкости кольцевой линией.

В направлении 6 и 8 часов на поверхности погружающейся капли визуализируются группы возмущений – капиллярные волны, обусловленные попаданием брызг.

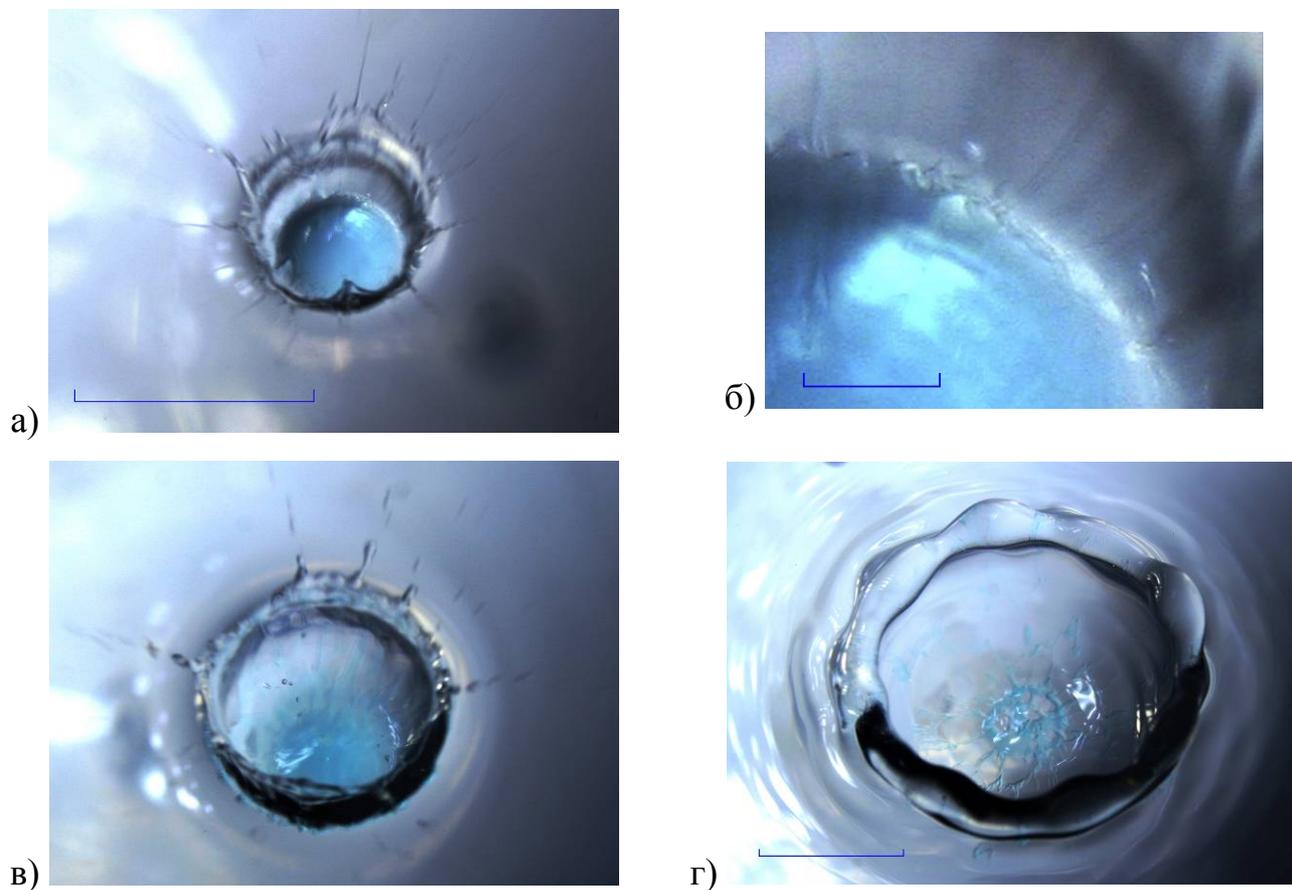


Рис. 4.12. Распределение раствора медного купороса на возмущенной поверхности воды ( $H = 80$  см). Длина маркеров на а), в), г) – 1 см; на б) – 0.1 см.

На увеличенном изображении первой четверти кольцевой впадины (рис. 4.12, б) на линии контакта капли с принимающей жидкостью наблюдаются периодические структуры длиной 0.03 – 0.05 см, из которых в тело формирующегося венца бьют тонкие волокнистые структуры. Ширина отдельных волокон составляет около  $2 \cdot 10^{-3}$  см, что сравнимо с капиллярным масштабом для насыщенного водного раствора поваренной соли.

Со временем стенки каверны и венца принимают цилиндрическую форму, стримеры трансформируются в зубцы сглаженной формы. Угол наклона пелены с изрезанной внешней кромкой к горизонту увеличивается по мере погружения

капли. С вершин заостренных стримеров на кромке пелены вылетают мелкие быстрые капельки. Большинство вторичных капель отрывается с зубьев шеврона наружу – в радиальном направлении от центра каверны, однако, как показано, на рис. 4.12, в отдельные вторичные капли диаметром от 0.08 до 0.2 мм (здесь более 10 капель) летят вовнутрь венца.

Вещество капли на внутренней поверхности венца образует полосчатую структуру с двумя ярусами. Первый ярус длиной 0.15 см примыкает к кромке остатка капли, второй – длиной 0.9 см – образован вертикальными полосчатыми структурами.

В стадии спадания венца окрашенное вещество собирается в волокна, которые образуют на дне каверны сложную ячеистую структуру, состоящей из пяти ярусов, с выраженными кольцевыми и радиальными границами (рис. 4, з). Нижний ярус образуют относительно толстые волокна (порядка 0.03 см); ширина волокон на поверхности остатка шеврона находится в диапазоне 0.005 – 0.01 см. В целом картина распределения вещества капли по деформированной поверхности принимающей жидкости и масштабы структур аналогичны рассмотренным ранее.

### **Перманганат калия**

Еще более сложные дискретные структуры наблюдаются в картине течения, сформированного упавшей каплей насыщенного раствора перманганата калия. На ранней стадии каверна с погружающейся каплей окружены тонкой пеленой, на внешней кромке которой располагаются тонкие окрашенные зубцы – стримеры. С вершин стримеров вылетают мелкие быстрые окрашенные капельки – брызги. Боковая поверхность пелены расчерчена семейством окрашенных полос (рис. 4.13, а), средняя ширина которых на поверхности венца  $\hat{l} = 0.02$  см и увеличивается к остатку остатка капли.

Со временем картина течения усложняется. Стримеры сглаживаются и трансформируются в окрашенные зубцы, с вершин которых вылетают более крупные окрашенные капли. На диффузно окрашенных стенках каверны и венца выделяется три яруса полосчатых структур: первый, высотой 0.15 см, примыкает

к центральному пятну на дне каверны, выше располагаются ярусы высотой 0.16 и 1.3 см. Вещество капли внутри ячеек распределено диффузно. Верхний ярус образуют линейчатые структуры толщиной 0.03 – 0.05 см, на шевроне венца регистрируются волокна шириной 0.007 см. Растущее кольцевое течение окружено расходящимися кольцевыми капиллярными волнами (рис. 4.13, б).

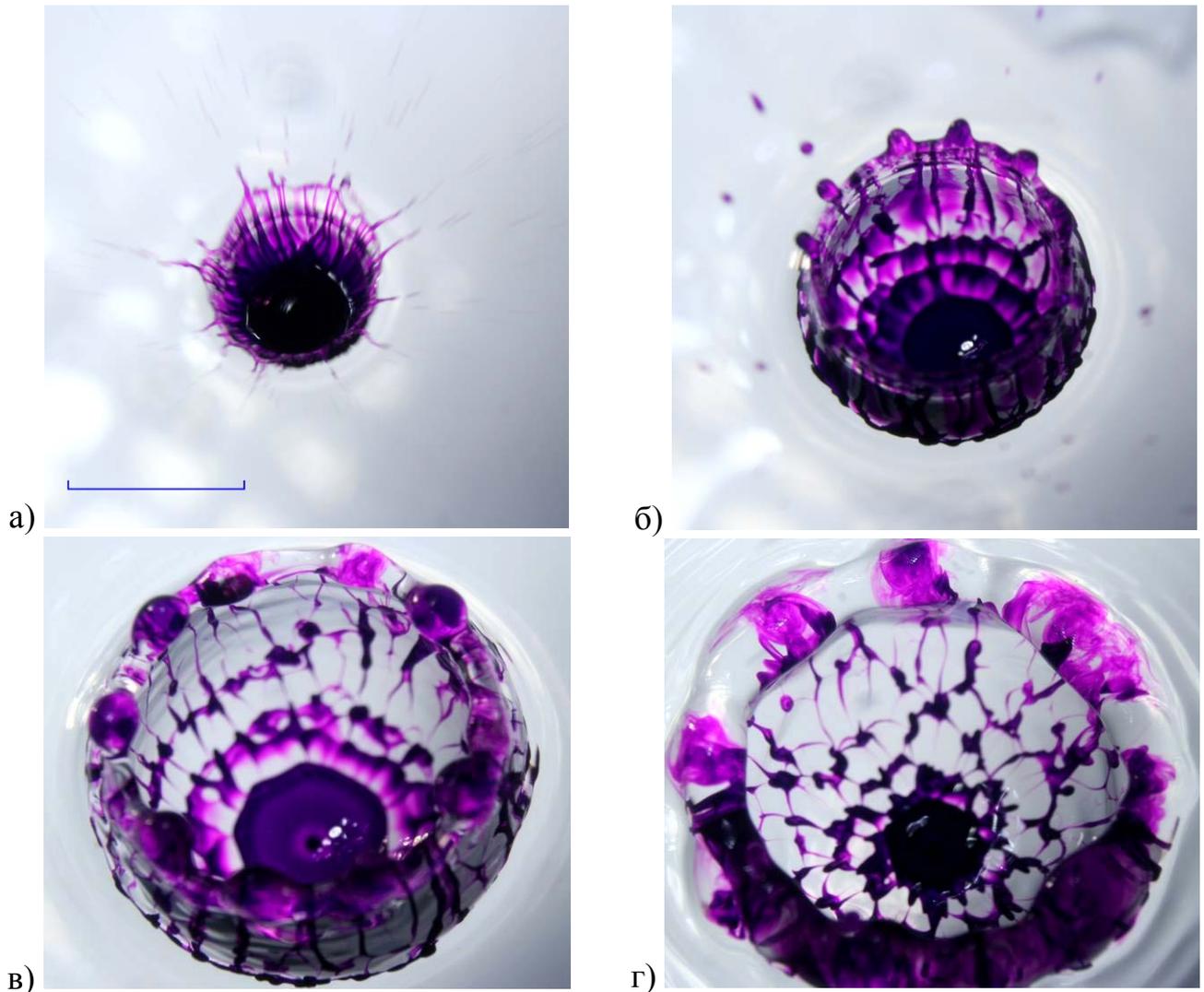


Рис. 4.13. Эволюция картины распределения раствора перманганата калия в воде ( $H = 80$  см,  $h_l = 8$  см). Длина маркера на 4.13, а – 1 см

С увеличением размеров каверны и спаданием венца в картине течения сохраняются отдельные волокна и появляются выраженные кольцевые структуры, плотность окраски которых увеличивается по мере приближения к дну каверны (рис. 4.13, в). По мере роста венца боковые стенки, на которых сохраняются

вертикальные волокна, просветляются, а на его вершине появляются диффузно окрашенные участки. Хотя в структуре течения преимущественно выражены кольцевые элементы, граница плотно окрашенной центральной области становится кусочно-гладкой с выраженными угловыми элементами. Кольцо первого яруса отстает от кромки центрального пятна на 0.17 см, высота второго яруса существенно увеличивается – 0.45 см, длина третьего – 1.3 см. Толщина тонких волокон, образующих сетчатую структуру 0.006 – 0.02 см.

В фазе начала роста кумулятивной струи в центре каверны структура течений еще больше усложняется и измельчается, окраска центральной части кумулятивной струи становится более плотной (рис. 4.13, з). Растущую струйку окружает мелкочаеистая сетка, с заметными кольцевыми границами. Большая часть вещества капли сосредоточена в узлах сетки размерами порядка 0.1 см, которые соединены тонкими волокнами. На остаточной части венца наблюдается периодическая система диффузных пятен красителя.

#### **Водный раствор уксусной кислоты (9%)**

Картина распределения капли водного раствора уксусной кислоты (9%) имеет ряд отличий от рассмотренных ранее. Веер брызг, образующийся при погружении капли, подкрашенной синими ализариновыми чернилами, плотный и гладкий (рис. 4.14, а). Остаток капли не деформирован, поскольку на него не попадают брызги ( $R_{\sigma} = 0.14 > 0$ ).

Со временем развивается венец, на стенках которого наблюдаются несколько полосчатых структур, шириной около 0.03 см, образующих сетчатую структуру с треугольными и четырехугольными ячейками (рис. 4.14, б). Однако сетчатая картина нерегулярная, наблюдаются лишь отдельные фрагменты, число ярусов отличается в разных направлениях от центра каверны, и позднее (рис. 4.14, в) сменяется отдельными волоконными структурами и выраженной линейчатой картиной внутри центрального пятна.

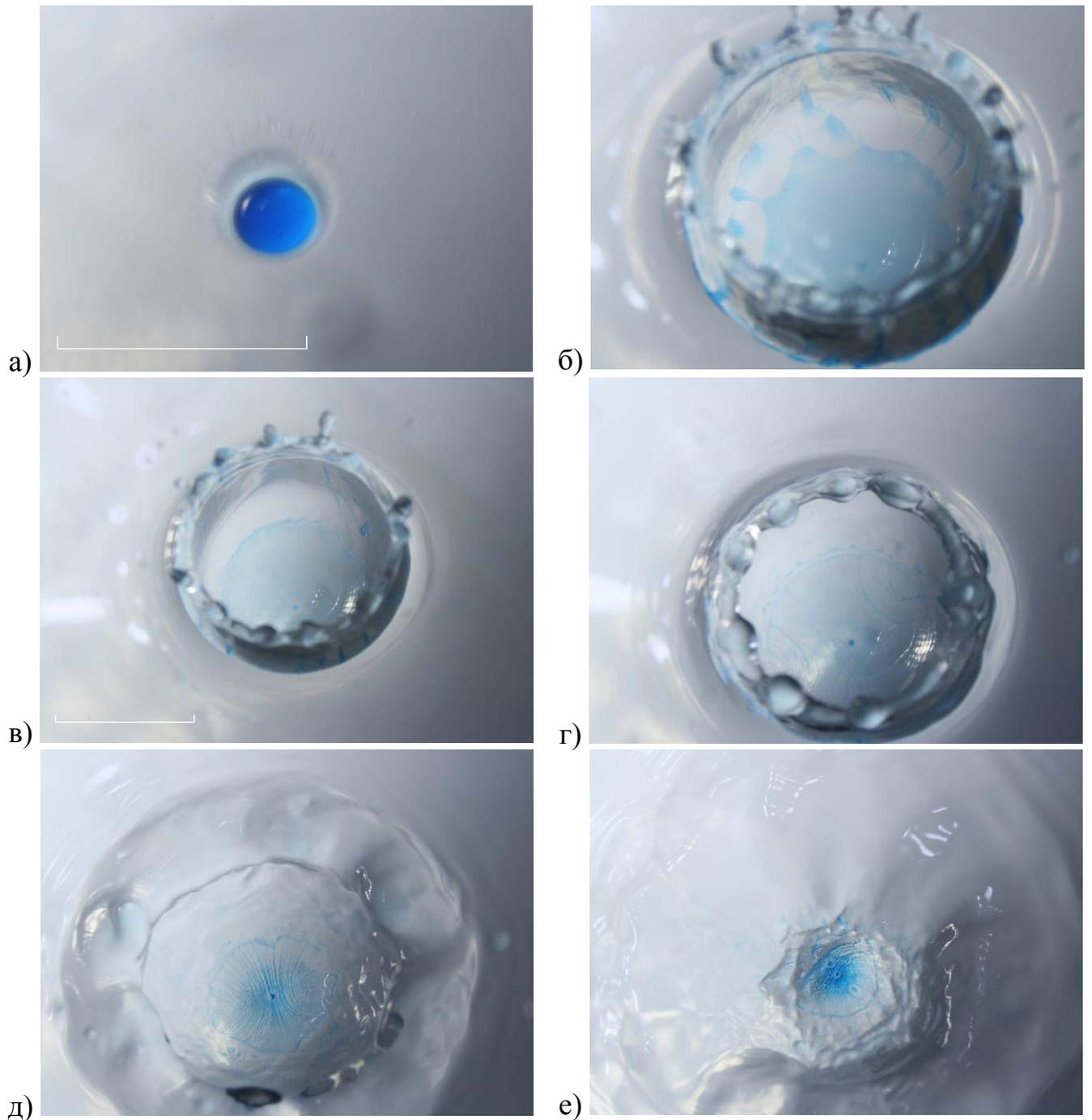


Рис. 4.14. Эволюция течений при погружении капли подкрашенной уксусной кислоты (9%) в чистую воду ( $H = 80$  см,  $D = 0.38$  см,  $h_l = 8$  см). Длина маркера на рис. а, в – 1 см. Линейные масштабы:  $\delta_\gamma^v = 2.6 \cdot 10^{-6}$  см;  $\delta_U^v = 4.8 \cdot 10^{-5}$  см;  $\delta_U^\gamma = 8.7 \cdot 10^{-4}$  см;  $\delta_g^\gamma = 0.23$  см.

Равномерно окрашенное центральное пятно трансформируется в систему дуг (по типу седла), направленных к центру каверны. Радиус кривизны дуг увеличивается по мере приближения к центру пятна (рис. 4.14, г). На расстояниях

0.04 и 0.16 см от системы дуг располагаются кольцевые структуры, повторяющее по форме окрашенную центральную область.

В фазе схлопывания венца окрашенная центральная область начинает сворачиваться, отходящее от нее кольцо разрушается, концентрация центрального пятна увеличивается (рис. 4.14, *д*).

Дуги, объединенные центральным пятном и кольцевой границей, образуют сетчато-линейчатую структуру на вершине зарождающейся кумулятивной струи (обратная картина распределения вещества). Вещество первичной капли собирается на вершине кумулятивной струи во вторичную каплю (рис. 4.14, *е*) при сохранении общего линейчатого рисунка, масштабы которого соизмеримы с масштабами ранее рассмотренных линейчатых структур.

#### **4.2 Тонкая структура картины погружения капель несмешивающихся жидкостей**

Картина распределения несмешивающихся жидкостей по стенкам каверны и венца более однородная в начальных фазах, чем в случае смешивающихся, зависит от значений относительных коэффициентов.

Стенки слоистого венца нефть-вода (рис. 4.15,  $R_p = 0.07$ ,  $R_\sigma = 0.42$ ,  $R_\mu = -0.75$ ) более толстые, зубцы шеврона мелкие и округлые, редкие, медленно вылетающие капельки, более крупные, чем в случае смешивающихся жидкостей. На поверхности брызг присутствуют темные участки нефти и светлые – воды.

Сам венец имеет характерную бочкообразную форму, у его края формируется группа слабых кольцевых капиллярных волн (рис. 4.15, *а*). Со временем зубцы неравномерно расплываются, сохраняя округлые формы. На стенках венца, возникшего в результате падения капли нефти в воду, можно выделить отдельные слабо окрашенные вертикальные полосы (рис. 4.15, *в*).

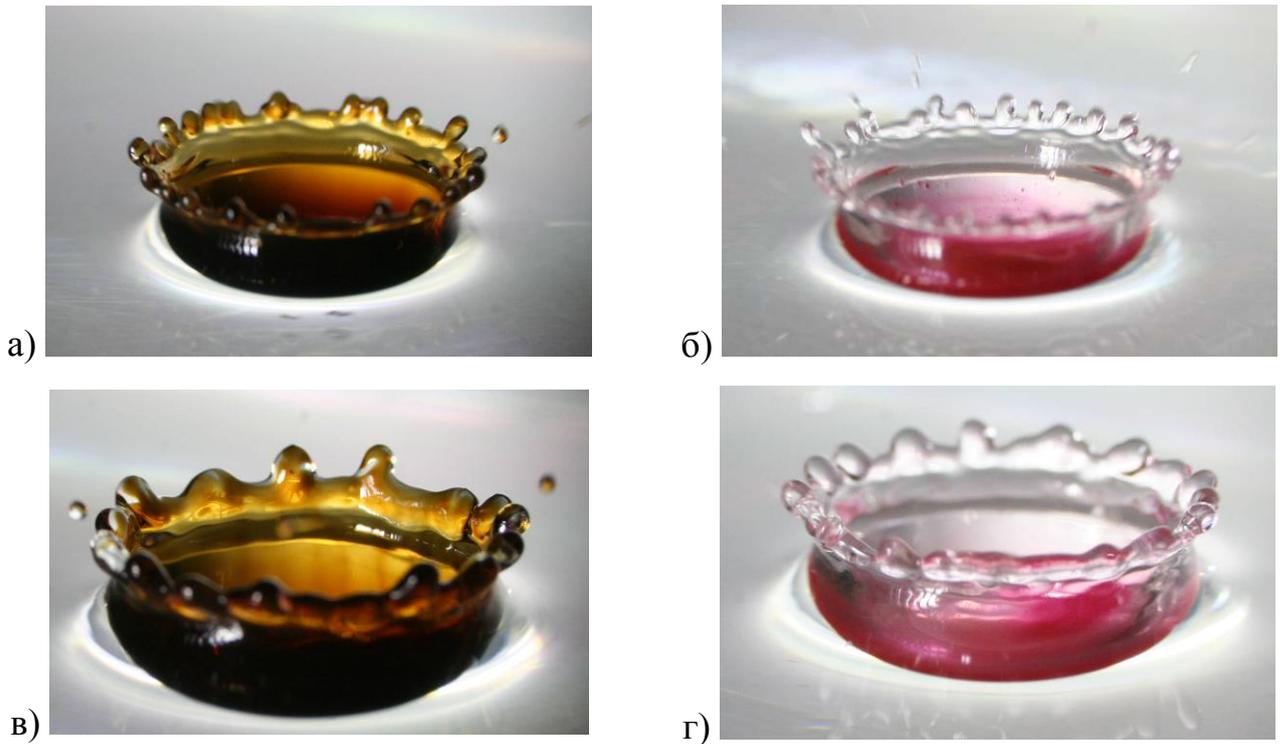


Рис. 4.15. Эволюция картины течения при падении капля несмешивающихся жидкостей ( $D = 0.31, 0.32$  см) в воду в чашке Петри  $h_l = 1.5$  см с высоты  $H = 45$  см: левый и правый столбцы – капли нефти и подсолнечного масла

Подсолнечное масло равномерно распределяется по стенкам каверны (рис. 4.15, б). Зубцы на шевроне имеют столбчатую форму и расположены более часто, чем у нефти ( $R_p = 0.042$ ,  $R_\sigma = 0.38$ ,  $R_\mu = -0.96$ ). Расплывание зубцов шеврона идет быстрее, чем у нефти, сбегаящие капиллярные волны быстро затухают (рис. 4.15, г). Характер дальнейшей эволюции картины течения существенно зависит от степени чистоты свободной поверхности – на запыленной остается компактное масляное пятно, на чистой пятно неограниченно расплывается.

### 4.3 Погружение капль эмульгированных жидкостей и суспензий

Методика опытов позволила более детально проследить картину течений, вызванных падением капли молока (жирность 3.2%) в слабоокрашенную красными ализариновыми чернилами воду ( $D = 0.37$  см,  $H = 45$  см).

В начальной фазе погружения капли молока венец более тонкий, чем у капли с краской, и раскрыт наружу. Зубцы шеврона, равномерно располагающиеся на кромке венца также более тонкие, брызги мелкие (рис. 4.16, а). Фотометрия, взятая по кромке пелены брызг, представлена на рис. 4.26, б. Здесь, в отличие от ранее представленных результатов фотометрии, компонентам течений соответствуют локальные максимумы. Выделяется 12 стримеров, расположенных на анализируемой трети пелены. Толщина стримеров варьируется от 0.01 до 0.05 см (средняя толщина – 0.03 см), располагаются на расстояниях от 0.02 до 0.2 см.

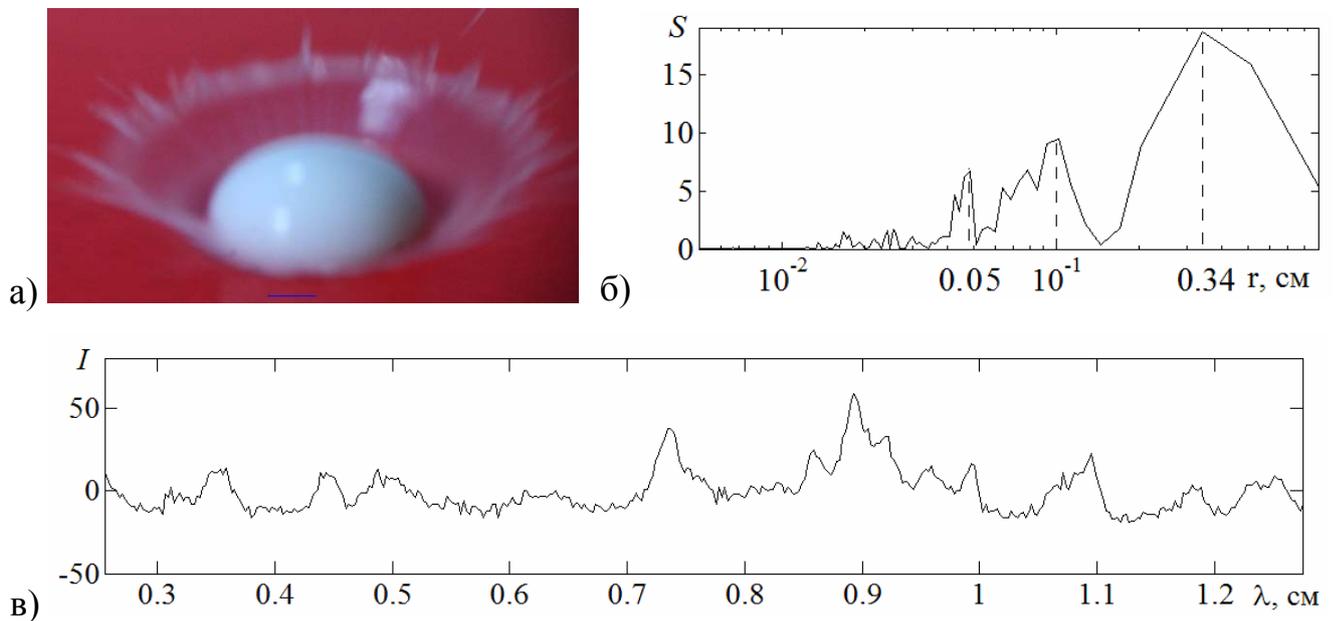


Рис. 4.16. Пелена брызг, образованная погружением капли молока 3.2% жирности в покрашенную воду. Линейные масштабы:  $\delta_V^v = 5.5 \cdot 10^{-6}$  см;  $\delta_U^v = 6.8 \cdot 10^{-5}$  см;  $\delta_U^y = 8.4 \cdot 10^{-4}$  см;  $\delta_g^y = 0.23$  см.

При трансформации пелены брызг в венец ( $t = 0.4$  мс, рис. 4.17) увеличивается степень изрезанность кромки, число стримеров убывает. На границе между сферическим дном и стенками каверны появляется группа вертикальных полосчатых структур – всего 8 со средней толщиной 0.018 см, располагающихся на расстояниях от 0.014 до 0.04 см. волокон (рис. 4.17, в). В спектре выделяется ряд пиков на длинах 0.03, 0.035, 0.04, 0.1 см (рис. 4.17, в).

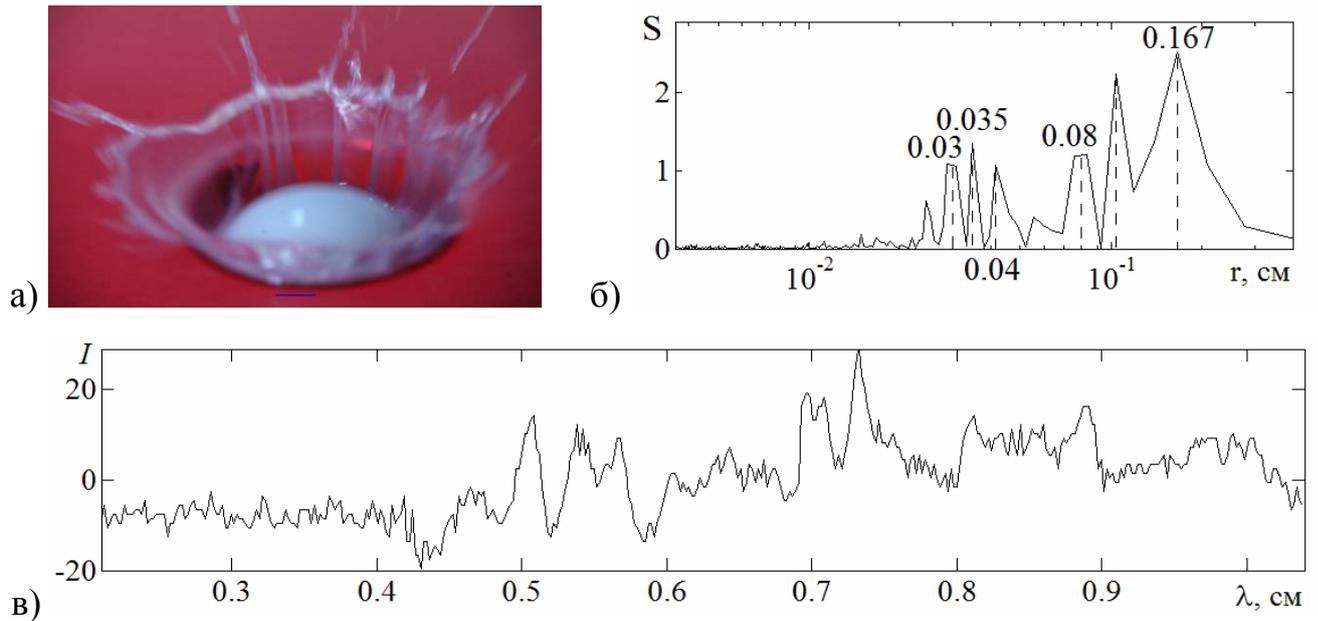


Рис. 4.17. Формирующийся венец при погружении капли молока 3.2% жирности в покрашенную воду,  $t = 0.4$  мс. Линейные масштабы:  $\delta_\gamma^v = 5.5 \cdot 10^{-6}$  см;  $\delta_U^v = 6.8 \cdot 10^{-5}$  см;  $\delta_U^v = 8.4 \cdot 10^{-4}$  см;  $\delta_g^v = 0.23$  см.

Группа равноудаленных капель большего размера присутствует на рис. 4.18. Здесь на поверхности венца (время развития всплеска  $t = 0.5$  с) идентифицированы 16 полосчатых структур (из них пять сдвоенных), состоящих из тонких волокон, толщина которых варьируется от 0.004 до 0.026 см (средняя толщина 0.012 см) при расстояниях от 0.004 до 0.13 см (4.18, в). В спектре пики находятся на длинах 0.07, 0.13 и 0.3 см.

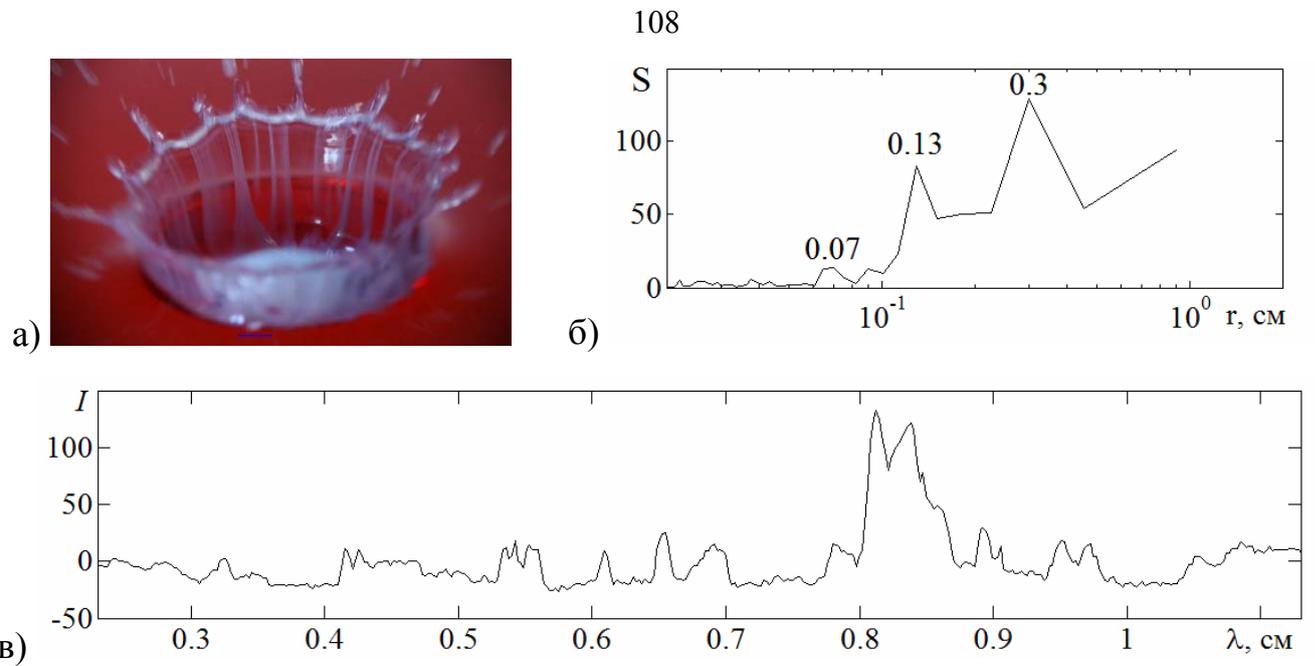


Рис. 4.18. Венец, образованный при погружении капли молока 3.2% жирности в покрашенную воду,  $t = 0.5$  мс. Линейные масштабы:  $\delta_\gamma^v = 5.5 \cdot 10^{-6}$  см;  $\delta_U^v = 6.8 \cdot 10^{-5}$  см;  $\delta_U^\gamma = 8.4 \cdot 10^{-4}$  см;  $\delta_g^\gamma = 0.23$  см.

Окрашенные волокна сохраняют линейную форму, их толщина начинает медленно увеличиваться у дна каверны. Кромка венца наполняется молоком и становится более выраженной (рис. 4.19,  $t = 1.5$  мс). По мере повышения концентрации молока размеры зубцов шеврона увеличиваются, и его кромка отворачивается внутрь венца. Средняя толщина полосчатых структур (здесь 12 полос) составляет  $0.018$  см с расстоянием между структурами от  $0.01$  до  $0.23$  см. (рис. 4.19, в).

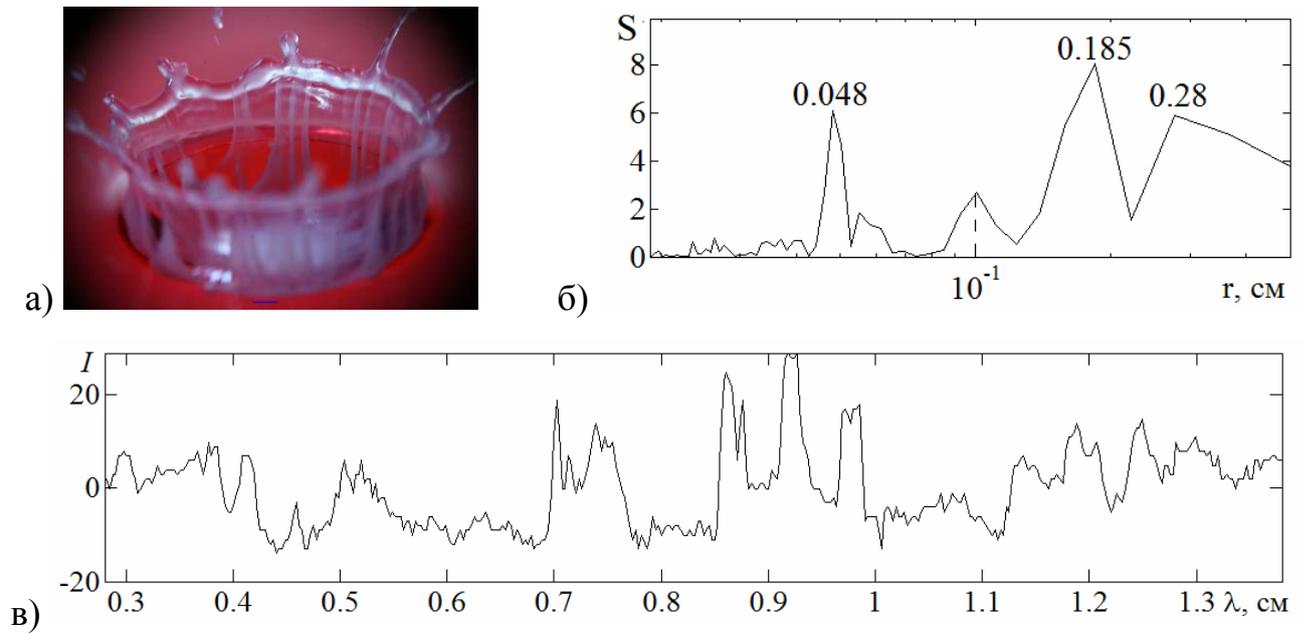


Рис. 4.19. Венец, образованный при погружении капли молока 3.2% жирности в покрашенную воду,  $t = 1.5$  мс .

Постепенно венец разрушается, выступы шеврона сглаживаются, увеличивается длина капиллярных волн на поверхности венца, которые вносят свой вклад в распределение интенсивности света при фотометрии вдоль поверхности венца. На фотографии венца рис. 4.20, а ( $t = 2$  мс) полосы выражены и на передней, и на задней поверхности венца. Край венца постепенно утолщается. Средняя толщина полос составляет  $0.02$  см, расположенных на расстоянии от  $0.04$  до  $0.2$  см.

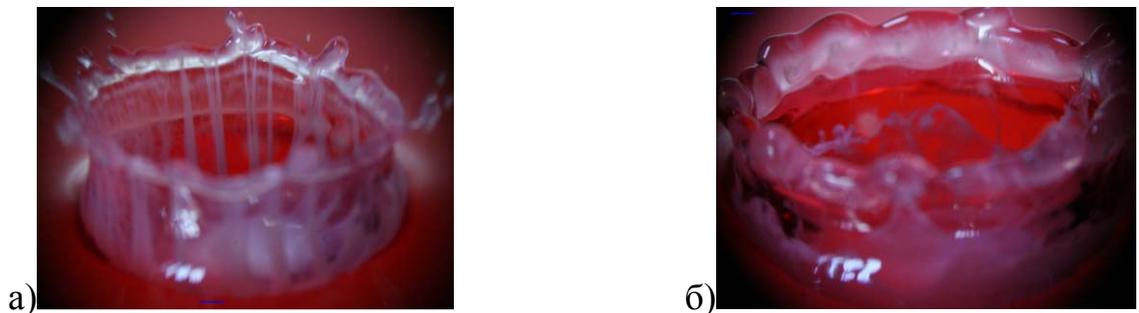
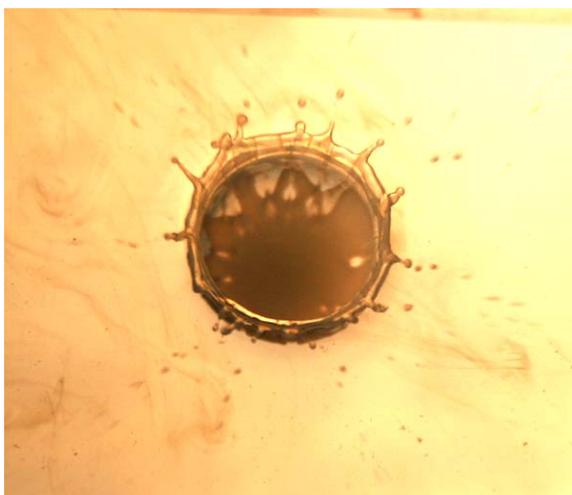


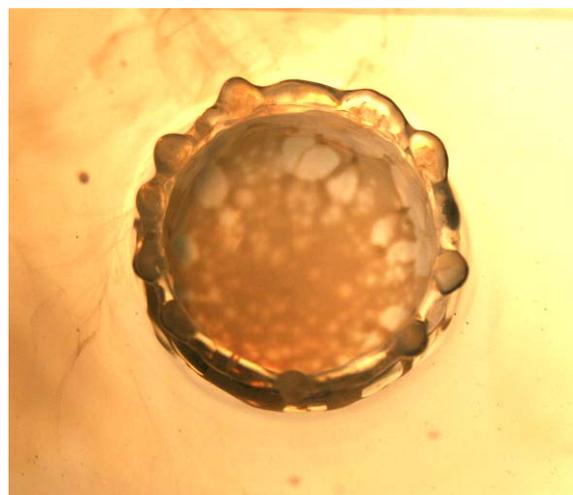
Рис. 4.20. Венец, образованный при погружении капли молока 3.2% жирности в покрашенную воду: а)  $t = 2$  мс , б)  $t = 4$  мс .

На последнем кадре (рис. 4.20, б,  $t = 4$  мс) полосы и сетка распадаются (остается одна полоса). Шеврон венца утолщается, в его узлах отмечены скопления вещества капли. Также вещество капли отмечено у основания венца, где оно формирует сложный рисунок.

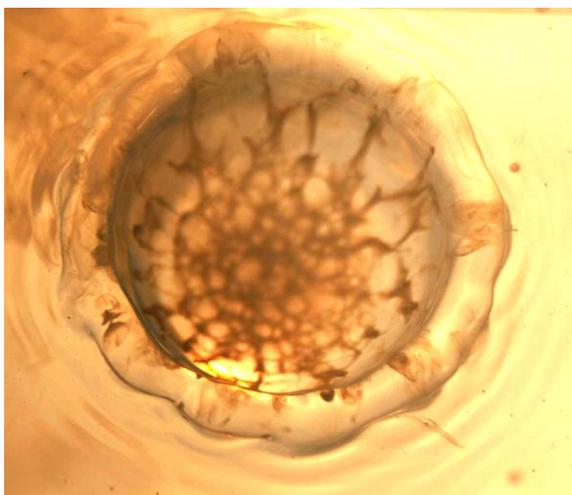
На виде сверху отчетливо выражена сетчатая структура распределения молока, по дну каверны, с которой контактируют волокна на стенках венца (рис. 4.21, а).



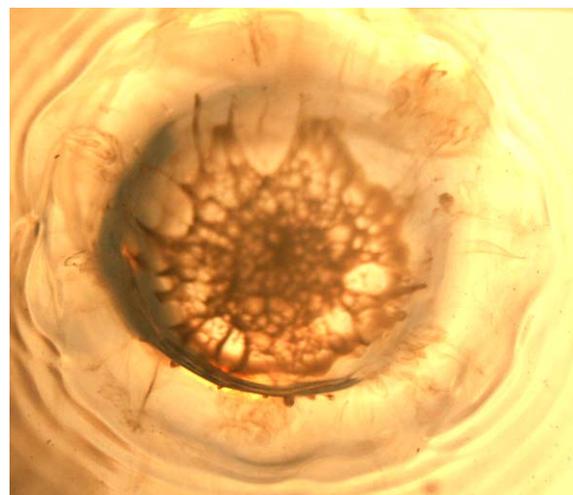
а)



б)



в)



г)

Рис. 4.21. Сетчатые структуры в распределении молока по поверхности каверны в воде ( $h_1 = 15$  см,  $H = 47$  см,  $D = 0.41$  см): а – з –  $t = 2, 10, 20, 28$  мс.

На начальной стадии погружения венца ( $t = 2$  мс) на дне каверны выражена зональная сетчатая структура, включающая треугольные, четырех- и пятиугольные ячейки (рис. 4.21, б,  $t = 10$  мс). Отдельные ячейки, размеры которых уменьшаются к центру каверны, соприкасаются с линейчатыми структурами на боковых поверхностях венца (рис. 4.21, в,  $t = 20$  мс).

В фазе активного расплывания венца (рис. 4.21, г,  $t = 28$  мс) сетчатая структура сохраняется, однако некоторые волокна внешнего яруса дна каверны расплываются и становятся невидимыми. Отдельные волокна доходят до кромки венца, которая оказывается окруженной системой капиллярных волн. Формы фазовых поверхностей таких волн нарушаются вследствие неравномерности расширения дна каверны.

В реальных природных системах капли, выпадающие, например, в виде атмосферных осадков, оказываются неоднородными по своему составу, содержат примеси, твердые взвешенные вещества различной дисперсности (пыль, сажа, металлы). Капли тумана вбирают вредные примеси, в том числе из наиболее загрязненных слоев атмосферы, что приводит к значительному превышению предельно допустимой концентрации загрязняющих веществ в воздухе.

При погружении в чистую воду капли воды, содержащей мелкодисперсные частицы угля (рис. 4.22), на внутренней поверхности короны частицы образуют несколько (от двух до пяти) ярусов сетчатой структуры, включающей трех-, четырех- и пятиугольные ячейки. На дне каверны находится центральное пятно с почти равномерным распределением частиц, на поверхности венца угольный порошок выстраивает четкие линейчатые структуры. Между линейчатыми структурами и внутри ячеек сетки примесь практически отсутствует. По мере роста венца (рис. 4.22, а - в) размер ячеек увеличивается, ячейки становятся более выраженными, границы четкими. При разрушении короны, в центре ее дна образуется ячейка, содержащая темное пятно в центре (рис. 4.22, г).

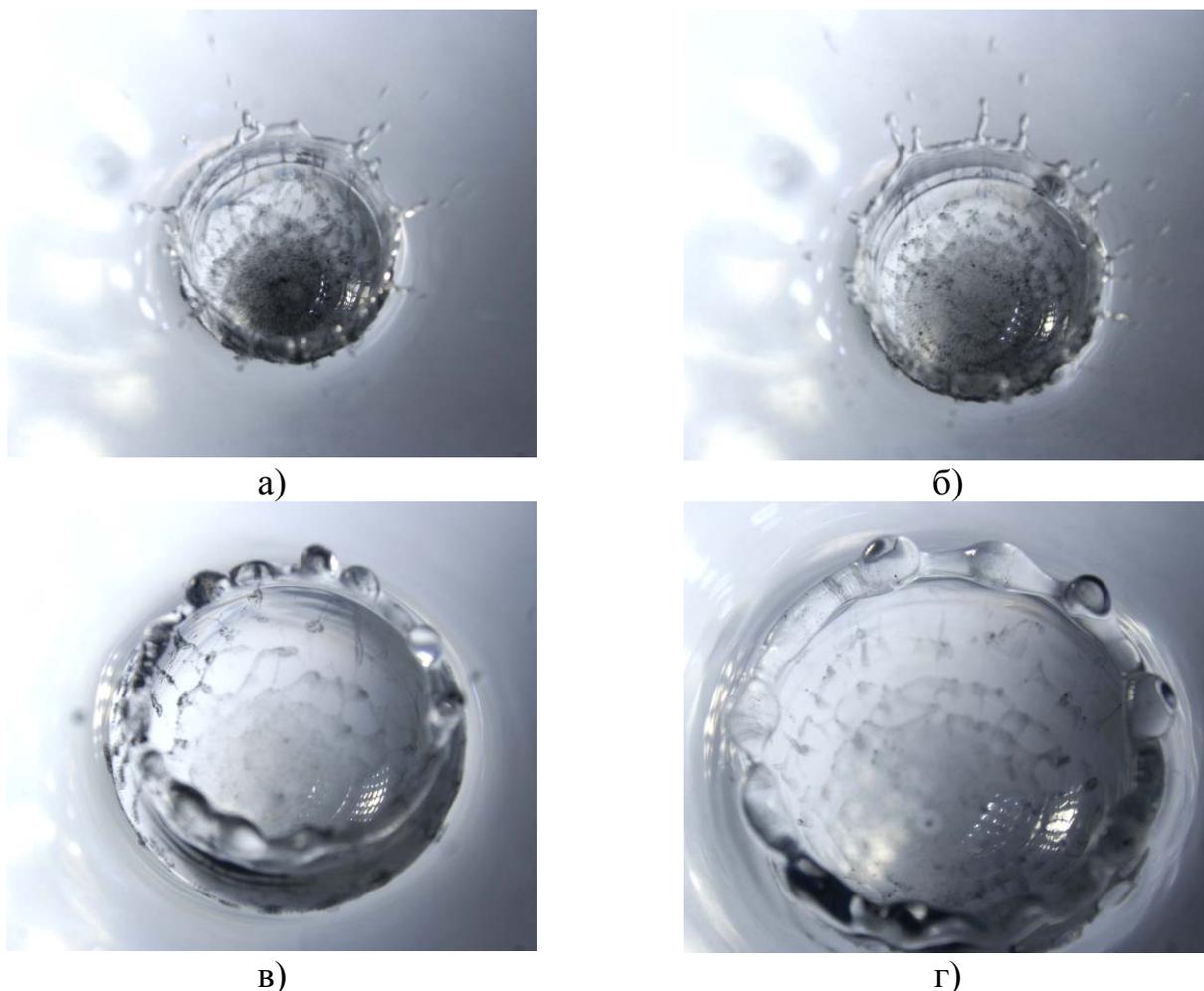


Рис. 4.23. Капля воды, содержащая угольный мелкий порошок, погружается в чистую воду.

Картина распределения мелкодисперсной твердой примеси при добавлении ее в капельную жидкость не имеет принципиальных отличий: примесь собирается в четкие линейчатые структуры, образующие сетку на дне каверны и полосы на внутренней поверхности венца. Внутри ячеек сетки и между полосами на венце примесь практически не обнаруживается. По мере увеличения размеров примеси регулярность картины распределения вещества капли нарушается, примесь более равномерно распределяется по всей поверхности.

В целом картина распределения вещества (эмульсий и суспензий), содержащегося в капле, и линейные размеры формирующихся структур соответствуют картинам и размерам, полученным при взаимодействии смешивающихся жидкостей

#### 4.4 Выводы к четвертой главе

В проведенных опытах впервые систематически визуализирована пространственная структура картины распределения вещества окрашенной капли по поверхности каверны и венца в принимающей жидкости. Капли смешивающихся и несмешивающихся с водой веществ, эмульсий и суспензий погружались в глубокую воду.

В картине распределения смешивающегося с водой вещества выражены линейчатые структуры, которые наблюдаются уже на начальных фазах процесса слияния – при первичном контакте, на растущей каверне и венце, а также на заполняющейся каверне и погружающемся венце, сохраняются до распада кумулятивной струи. Верхний ярус структуры образован вертикальными волокнами, образующимися тонкими окрашенными нитями, толщиной от 0.005 до 0.04 см, которые участвуют в формировании брызг и вершин шеврона. Разделение вертикальных структур на тонкие нити происходит по мере роста короны. Волокна располагаются по всей внутренней поверхности венца и разделены зонами, не содержащими вещества капли

Под верхним ярусом расположены один или несколько ярусов, заполненных многоугольниками (трех-, четырех- и пятиугольниками). На дне каверны краситель собирается в сетку, также составленную из многоугольников, или формирует центральное пятно.

Эволюция картины течений при погружении капель несмешивающихся с водой жидкостей (нефть, подсолнечное масло) также обусловлена быстрым освобождением потенциальной поверхностной энергии, поскольку обе несмешивающиеся жидкости одновременно визуализируются на поверхностях всех элементов течения, включая вылетающие брызги. Однако распределение вещества капли по поверхности принимающей жидкости более равномерное, зубья шеврона более округлые, а число брызг меньше, чем у смешивающихся жидкостей.

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. Быстро передаваемая большая энергия предопределяет геометрию течения, при котором вещество капли распространяется только в тонком приповерхностном слое.

Вещество, молекулярный перенос которого определяется коэффициентом диффузии, имеющим наименьшее значение среди всех кинетических коэффициентов изучаемого процесса, распределяется неравномерно. При этом поверхность венца, которая определяется картиной переноса импульса и механической энергии, остается непрерывной везде, за исключением верхней кромки, где избыток поступающей с растекающейся жидкостью энергии способствует формированию стримеров, выбрасывающих брызги. Как следствие, стримеры, которые образуются на шевроне венца, служат продолжением полосчатых структур, примыкающих к зубцам шеврона.

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.

## Глава 5. Динамика и геометрия течений, образующихся в результате погружения капли в жидкость

Картина распределения вещества капли по внутренним поверхностям венца и каверны представляет собой сетчатую структуру с центральным пятном, ограниченным окружностью  $R_1$  (рис. 5.1). Далее по мере удаления от центра дна каверны располагаются ярусы сетки, количество которых зависит от условий эксперимента и фазы процесса (на схеме приведено пять ярусов  $k = 5$ ). Каждый ярус сетки  $R_i R_{i+1}$  образован ребрами  $f_i$ , в которых концентрируется вещество капли. Ребра образуют ячейки сетчатой структуры (преимущественно трех- и четырехугольные, однако встречаются и пятиугольные), в которых вещество капли диффузно распределено в меньшей концентрации или не обнаруживается вовсе. Внешний ярус сетки образован вертикальными линейчатыми структурами  $f_k$  ( $f_5$  на рис. 5.1), располагающимися на поверхности венца и, частично, каверны. На схеме элементы линейчатой структуры обозначены одной линией, однако, как было показано ранее (глава 4), могут быть образованы несколькими тонкими волокнами.

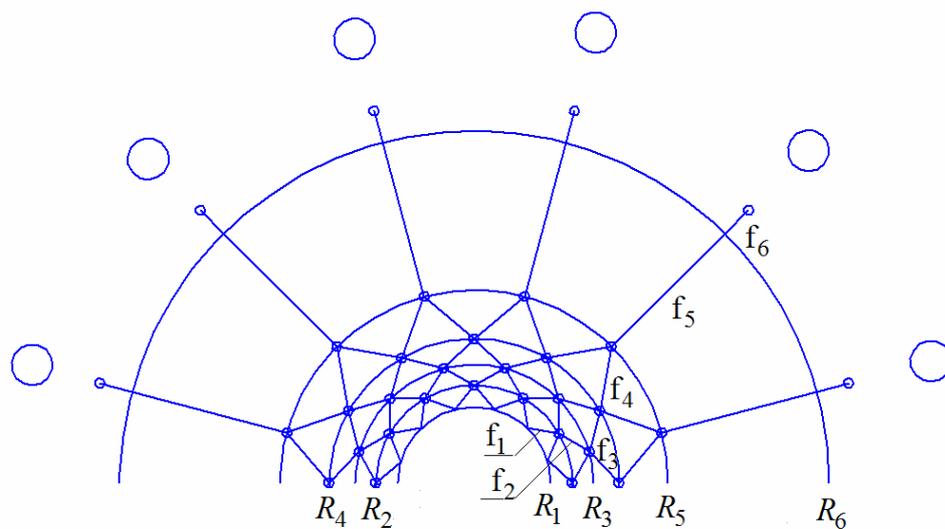


Рис. 5.1. Развертка картины распределения вещества капли по внутренней поверхности короны – схематичное изображение.

Ярусы сетки ограничиваются условными кольцами  $R_i$ , на которых располагаются узлы сетки (узлы повышенной концентрации вещества капли). Кольцом  $R_{k+1}$  ( $R_6$ ) обозначена кромка шеврона венца – граница картины распределения вещества капли. Исходящие из кольца  $R_{k+1}$  линейчатые структуры  $f_{k+1}$  обозначают зубья шеврона, с вершин которых отрываются вторичные капли, также содержащие вещество основной капли. Положения капель и вершин зубьев шеврона также образуют кольцо (зональная структура, отмеченная в главе 3).

Параметрами картины распределения вещества капли служат количество ярусов сетки  $k$ , изменяющееся при условиях опыта и состава жидкостей, диаметры колец  $R_i$  и уровень их целостности (отношение окрашенных участков колец к длине окружности).

### **5.1 Влияние высоты свободного падения капли окрашенной жидкости на картину всплеска**

Высокоэнергетичные столкновения капель воды с водным бассейном (скорость капель от 9.3 до 17.61 м/с, а диаметр капель – около 0.5 см) рассматривались еще в работах [21]. Экспериментально установлено, что если энергия капли превышает некий критический порог, развивающаяся тонкая цилиндрическая плёнка, из которой обычно формируется корона, замыкается над каверной в виде купола и образует пузырь. Как только такой пузырь образован, на его верхушке, в точке закрытия, образуется струя, бьющая вниз. Эта струя, в свою очередь, сталкивается с восходящей струей, формирующейся на дне кратера, и газовая полость становится на какое-то время тороидальной, а затем схлопывается.

С учетом сил тяжести, Стокса и плавучести, действующих на свободно падающую в воздухе каплю воды диаметром  $D = 0.42$  см (в пренебрежении отклонением формы капли от сферической), скорость капли меняется следующим образом.

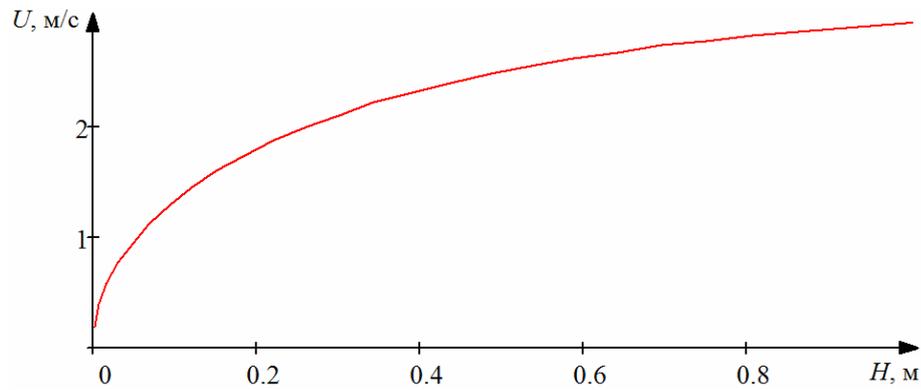


Рис. 5.2. Характер изменения скорости свободного падения капли с высотой падения

Значения скорости капли в момент контакта с принимающей жидкостью, капиллярного масштаба, чисел Вебера и Фруда при различных высотах свободного падения капли, устанавливаемых в экспериментах, приведены в табл. 7. Другие линейные масштабы, приведенные в таблице 2 главы 1, либо не зависят от скорости капли, либо несоизмеримо малы по сравнению с масштабом линейчатых структур и, следовательно, могут не рассматриваться.

Таблица 7.

Высота падения, $H$ см	Скорость, $U$ м/с	Капиллярный масштаб $\delta_U^y \cdot 10^3$ , см.	We	Fr
40	2.34	1.3	320	130
80	2.82	0.92	460	190
100	2.94	0.85	500	210
120	3.02	0.8	530	220
150	3.09	0.76	560	230
200	3.15	0.74	580	240
260	3.17	0.73	586	244

Дискретный характер распределения синих ализариновых чернил в принимающей жидкости сохраняется в широком диапазоне высот падения капли (рис. 5.3). При падении капли с высоты  $H = 100$  см в картине течения в фазах

роста и начала расплывания венца выражены собранные в ярусы треугольные и линейчатые ячейки (рис. 5.3, колонка I). Плотность окраски увеличивается по мере приближения к остатку капли в центре каверны.

С увеличением высоты падения нарастает контрастность зональной структуры, состоящей из элементов разной формы: и линейчатых, и более сложной геометрии (рис. 5.3, колонки II и III). На стенках венца наблюдаются практические свободные от краски ячейки.

При большой высоте падения кольцевая структура распределения красителя, образованная элементами сложной формы, становится преобладающей уже на стадии роста венца (рис. 5.3, колонки IV, V). Под действием сил поверхностного натяжения вершина венца стягивается в купол.

С увеличением высоты падения капли и, следовательно, скорости (энергии) линейчатые структуры сетки на дне каверны становятся более тонкими, вещество капли сохраняется больше в узлах ярусов сетки и картина распределения вещества капли приобретает выраженный кольцевой характер. Кроме того, изменяется направление загиба венца и траектории выброса вторичных капель (внутрь венца). Остальные структурные элементы остаются без существенных изменений.

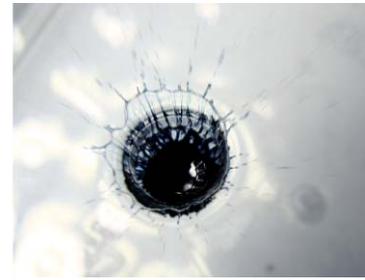
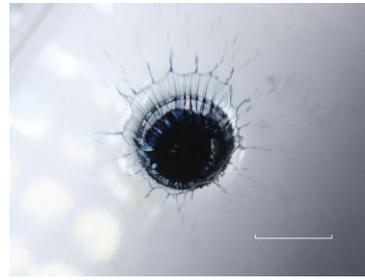
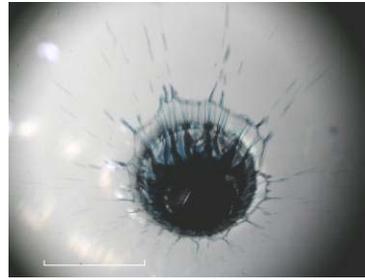
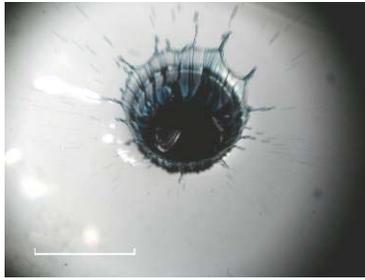
119  
III

I

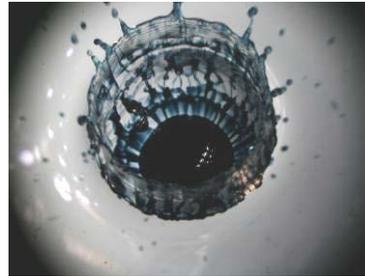
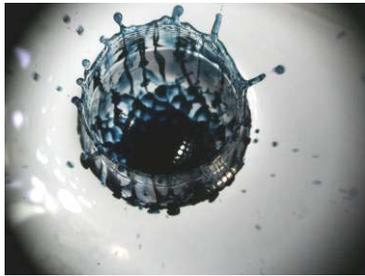
II

IV

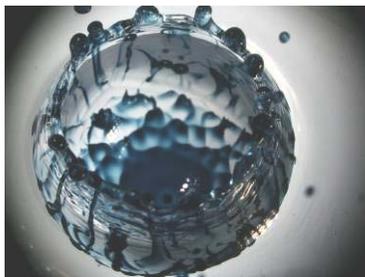
V



a)



б)



B)

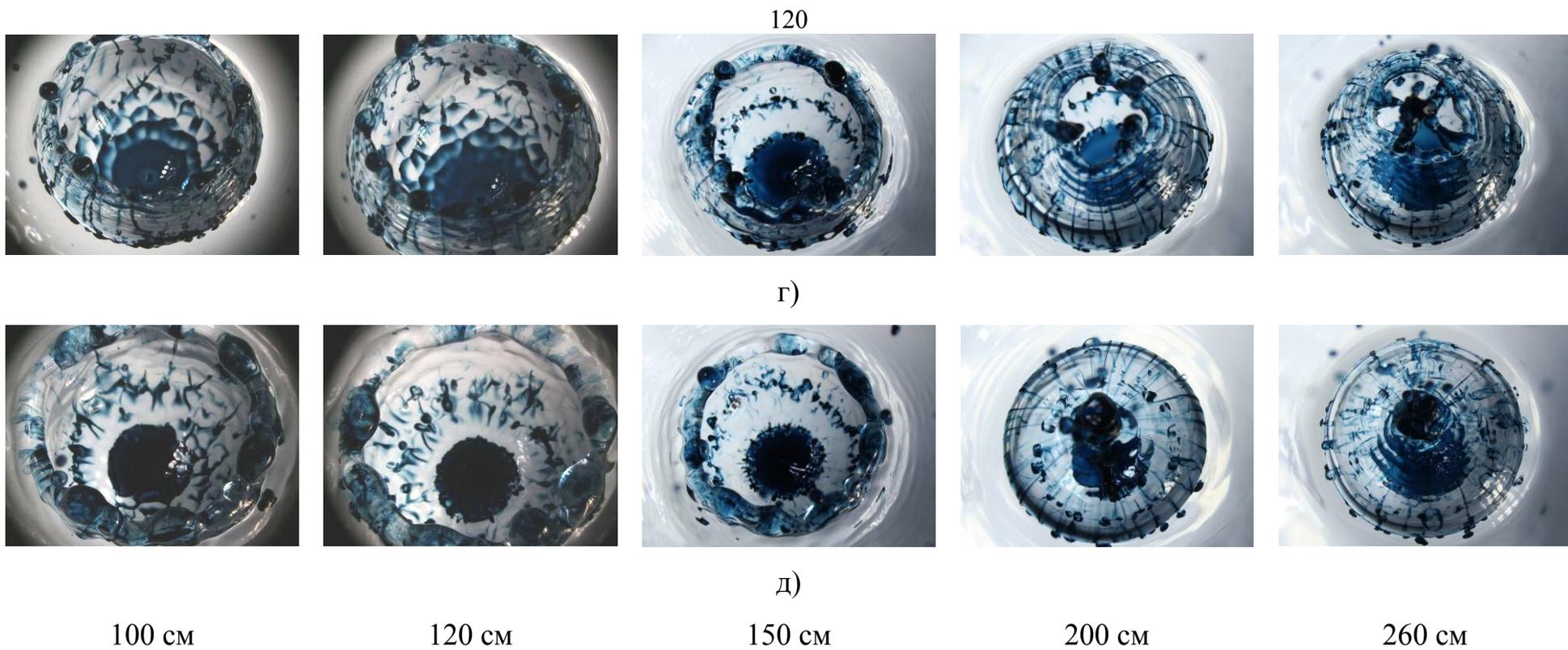


Рис. 5.3. Распределение вещества капли по деформированной поверхности принимающей жидкости в фазах: а) выброса пелены брызг, б) формирования венца, в) развитого венца, г) разрушения венца, д) захлопывания каверны.

Таблица 8

	I	II	III	IV	V
a)	$k = 1$ $R_1 = 0.33 \text{ см}$ $R_{2i} = 1.88$	$k = 1$ $R_1 = 0.36 \text{ см}$ $R_{2i} = 1.94$	$k = 2,$ $R_1 = 0.38 \text{ см}$ $R_{2i} = 1.38, R_{3i} = 2.01$	$k = 2,$ $R_1 = 0.41 \text{ см},$ $R_{2i} = 1.32, R_{3i} = 1.98$	$k = 3,$ $R_1 = 0.38 \text{ см}, R_{2i} = 1.48,$ $R_{3i} = 1.76, R_{4i} = 2.2$
б)	$k = 4, R_1 = 0.45 \text{ см},$ $R_{2i} = 1.13, R_{3i} = 1.27,$ $R_{4i} = 1.56, R_{5i} = 1.78$ $\chi_{R_4} = 59\%$	$k = 4, R_1 = 0.48 \text{ см},$ $R_{2i} = 1.29, R_{3i} = 1.48,$ $R_{4i} = 1.69, R_{5i} = 1.9$ $\chi_{R_3} = 70\%$	$k = 4, R_1 = 0.63 \text{ см},$ $R_{2i} = 1.26, R_{3i} = 1.43,$ $R_{4i} = 1.57, R_{5i} = 1.65,$ $\chi_{R_3} = 90\%$	$k = 3, R_1 = 0.63 \text{ см},$ $R_{2i} = 1.44, R_{3i} = 1.67,$ $R_{4i} = 1.57, \chi_{R_3} = 87\%$	$k = 2, R_1 = 0.66 \text{ см},$ $R_{2i} = 1.22, R_{3i} = 1.46,$ $\chi_{R_2} = 64\%$
в)	$k = 4, R_1 = 0.44 \text{ см},$ $R_{2i} = 1.38, R_{3i} = 1.88,$ $R_{4i} = 2.18, R_{5i} = 2.43$ $\chi_{R_4} = 34\%$	$k = 3, R_1 = 0.75 \text{ см},$ $R_{2i} = 1.26, R_{3i} = 1.49,$ $R_{4i} = 1.5,$ $\chi_{R_3} = 65\%$	$k = 2, R_1 = 0.75 \text{ см},$ $R_{2i} = 1.32, R_{3i} = 1.36$ $\chi_{R_2} = 83\%$	$k = 2, R_1 = 0.78 \text{ см},$ $R_{2i} = 1.45, R_{3i} = 1.12,$ $\chi_{R_2} = 60\%$	$k = 2, \chi_{R_2} = 64\%$
г)	$k = 4, R_1 = 0.48 \text{ см},$ $R_{2i} = 1.31, R_{3i} = 1.83,$ $R_{4i} = 2.35, R_{5i} = 2.42$ $\chi_{R_4} = 42\%$	$k = 5, R_1 = 0.63 \text{ см},$ $R_{2i} = 1.29, R_{3i} = 1.6,$ $R_{4i} = 1.85, R_{5i} = 1.98,$ $R_{6i} = 1.97, \chi_{R_4} = 35\%$	$k = 2, R_1 = 0.7 \text{ см},$ $R_{2i} = 1.61, R_{3i} = 1.93,$ $\chi_{R_3} = 70\%$	$k = 2, \chi_{R_2} = 82\%$	—

При погружении капли чернил, свободно падающей с высоты 100 см, из контактной линии жидкостей отходят широкие окрашенные линейчатые структуры шириной порядка 0.03 см, между которыми находятся слабоокрашенные области. На рис. 5.3, а колонка I четко визуализируется кольцо перехода из каверны в венец. Линейчатые структуры при переходе через кольцо дробятся на тонкие волокна шириной порядка 0.005 см. Распределение тонких волокон рассмотрено в главе 4. Линейчатые структуры формируют один ярус сетки  $k = 1$ , радиус остатка капли  $R_1 = 0.33$  см, радиус кромки шеврона составляет  $R_2 = 0.62$  см, отдельные стримеры, образующиеся на кромке шеврона, достигают размеров  $f_2 = 0.27$  см. На следующем кадре (рис. 5.3, б, колонка I) картина распределения вещества капли становится сетчатой. Надежно определяются 4 яруса ( $k = 4$ ). Значения радиусов центральных пятен, а отношения радиусов колец к радиусу центрального пятна  $R_{i1} = R_i/R_1$  приведены в табл. 8. Целостность (заполненность) кольца верхнего яруса  $\chi_{R_4}$  (рис. 5.4, а), определенная методом фотометрии как отношение окрашенных областей к длине окружности, составляет 59%. С развитием короны целостность крайнего кольца снижается. Число ярусов сетчатой структуры, относительные радиусы колец и их целостности для разных фаз всплеска и разных высот свободного падения капли (I-V) в соответствии с рис. 5.3 приведены в табл. 8.

Подобная сетчатая картина наблюдалась при высотах свободного падения капли  $H < 100$  см,  $We < 500$  (например, при  $H = 40$  см,  $We = 320$ , рис. 4.1). Однако уже при высоте  $H = 120$  см ( $We = 530$ ) выраженная сетчатая структура приобретает кольцевой характер (целостность крайнего кольца  $\chi_{R_3} = 70\%$  при более плотных нижних), а при высоте  $H = 150$  см,  $We = 560$  (рис. 5.4, б) целостность кольца достигает  $\chi_{R_3} = 90\%$ .

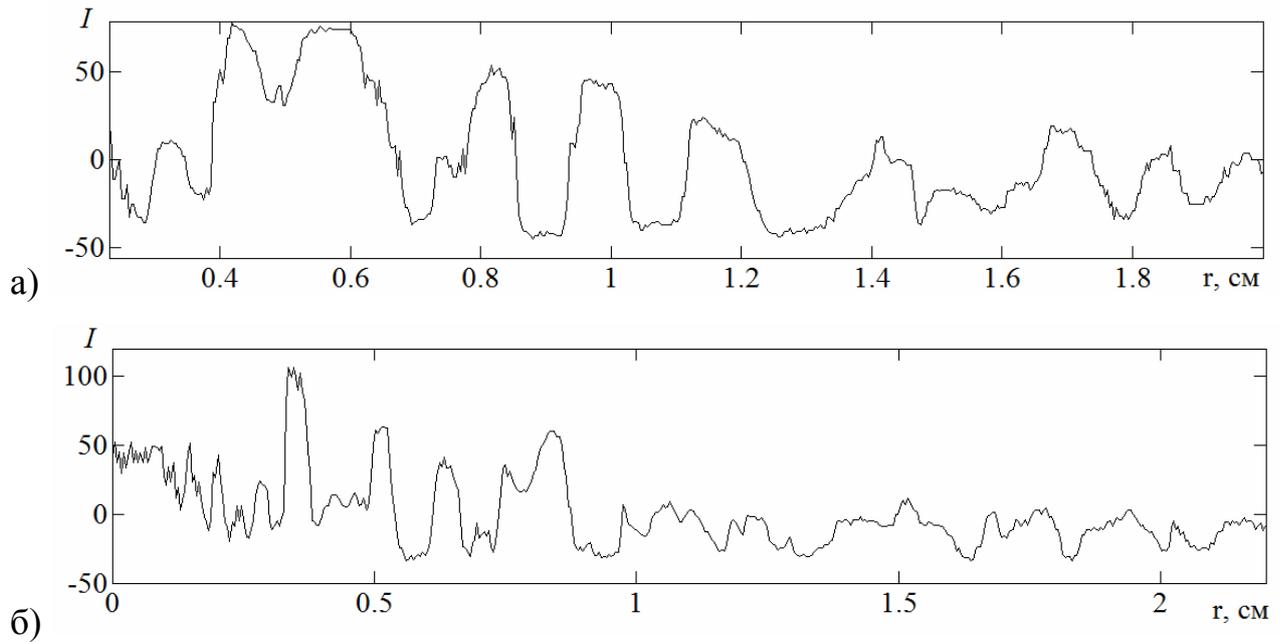


Рис. 5.4. Распределение краски в кольце  $R_4$  картины течения, образованного при падении капли чернил с различной высоты:  $a, б) - H = 100, 150$  см

Далее с увеличением высоты (скорости, числа Вебера) уменьшается число ярусов картины распределения вещества и целостность кольцевых элементов, образованных вихревыми кольцами, связанных тонкими волокнами (рис. 5.5).

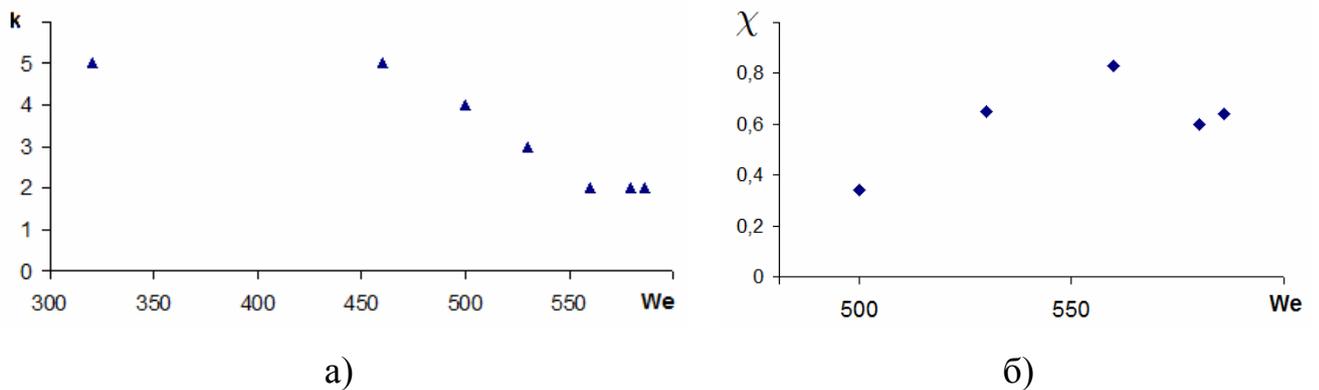


Рис. 5.5. Зависимости числа ярусов (а) и целостности колец (б) в картине распределения вещества капли в фазе развитого венца (рис. 5.3, в) от числа Вебера

В картине распределения вещества капли по деформированной поверхности принимающей жидкости с увеличением высоты свободного падения капли

уменьшается число ярусов сетки (рис. 5.5, а): с пяти ярусов при  $H = 80$  см до двух при  $H = 200$  см. Линейчатые структуры, образующие ячейки, истончаются; вещество капли концентрируется в кольцах, целостность которых увеличивается и достигает максимального значения при  $H = 150$  см, при больших значениях  $H$  кольцевые структуры распадаются на вихревые кольца (целостность колец падает, рис. 5.5, б).

## **5.2 Влияние коэффициента поверхностного натяжения и качества поверхности принимающей жидкости на картину течений**

Опыты выполнены с каплями нефти и окрашенного подсолнечного масла, падающими на поверхность воды, которая находилась в различных состояниях, и этанола. В одной серии опытов поверхность воды, которая обновлялась перед каждым опытом, была чистой, в другой – перед каждым опытом запылялась лабораторной пылью, падающей с бумажной салфетки. Пыль собиралась в тонкие волокна, образующие сложный нерегулярный узор на свободной поверхности. В третьей серии на поверхности воды находилась нефтяная пленка.

Капли диаметром около 3 мм падали с высоты  $H = 45$  см и при подлете к поверхности принимающей жидкости имели сплюснутую форму из-за сохраняющихся объемных осцилляций (рис. 5.6, а). При попадании капли нефти на чистую поверхность воды ( $R_p = 0.07$ ,  $R_\sigma = 0.42$ ,  $R_\mu = -0.75$ ) из области контакта вылетает плотная, неравномерно окрашенная пелена с многочисленными тонкими короткими стримерами на вершине (рис. 5.6, б). Касание капель поверхности этанола характеризуется более тонкой пеленой с выраженными стримерами на вершине (рис. 5.6, в) ориентированными под различными углами к кромке пелены. Первичная пелена двойная: внешняя сторона образована принимающей жидкостью, формирующей выраженные широкие стримеры, внутренняя – веществом капли, образующим более тонкие стримеры (рис. 5.6, г).

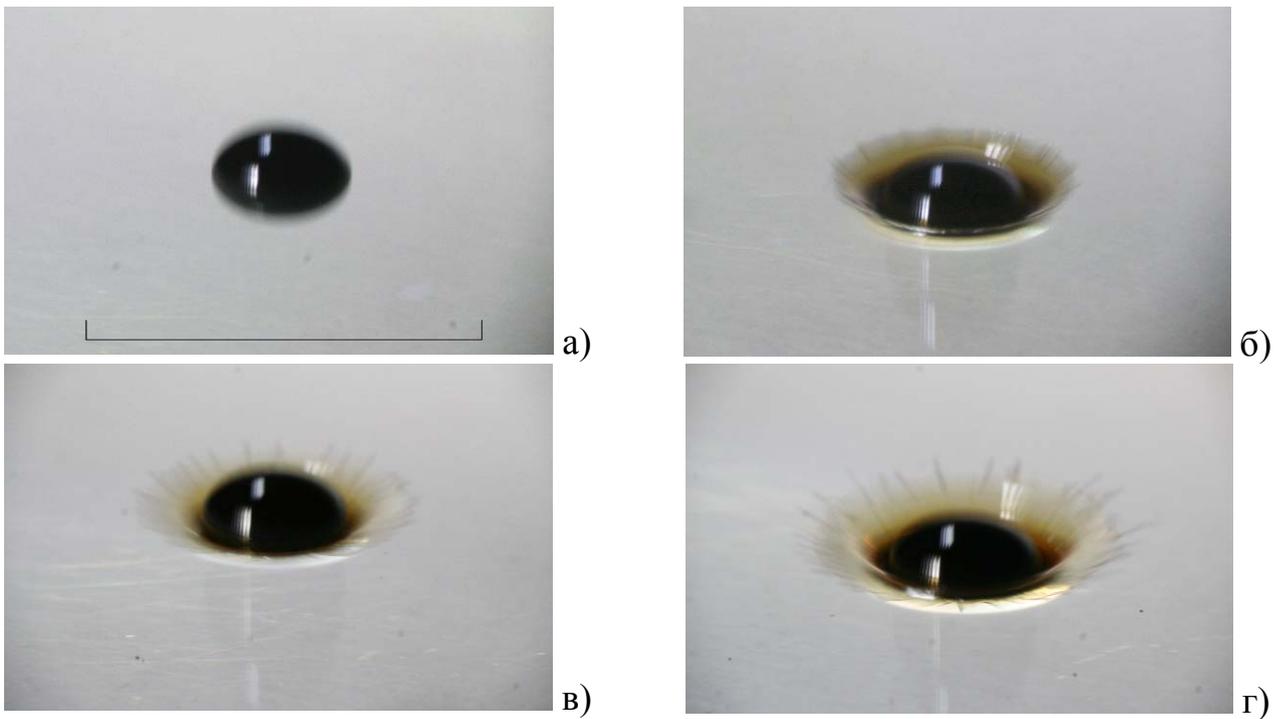


Рис. 5.6. Картина течения при контакте капли нефти с принимающей жидкостью: а, б) – капля нефти падает в воду с нефтяной пленкой, в, г) – капля нефти падает в водный раствор этанола (40%). Длина метки на рис. 5.6, а – 1 см (масштаб одинаков для всех изображений)

По мере погружения капли нефти в воду регулярно расположенные стримеры, выступающие над краем венца, утолщаются (на рис. 5.7, а, I колонка визуализируются 17 стримеров). Вещество несмешивающихся жидкостей распределяется по стенкам каверны и венца более однородно, чем в случае смешивающихся жидкостей. Картина распределения существенно зависит от значений относительных коэффициентов поверхностного натяжения жидкостей и, следовательно, состояния поверхности принимающей среды. При столкновении капли нефти с запыленной поверхностью неравномерность распределения нефти более выраженная (рис. 5.7, а, II колонка,  $R_{\sigma} \approx 0.09$ ). Стримеры на вершине венца становятся нерегулярными, имеют различную длину.

На более поздних фазах погружения капли нефти (рис. 5.7, б) в воду картина сохраняется: вещество капли равномерно распределено по поверхности венца и утолщенного шеврона, о чем свидетельствует плотный цвет окраски венца (рис. 5.7, б, I колонка).

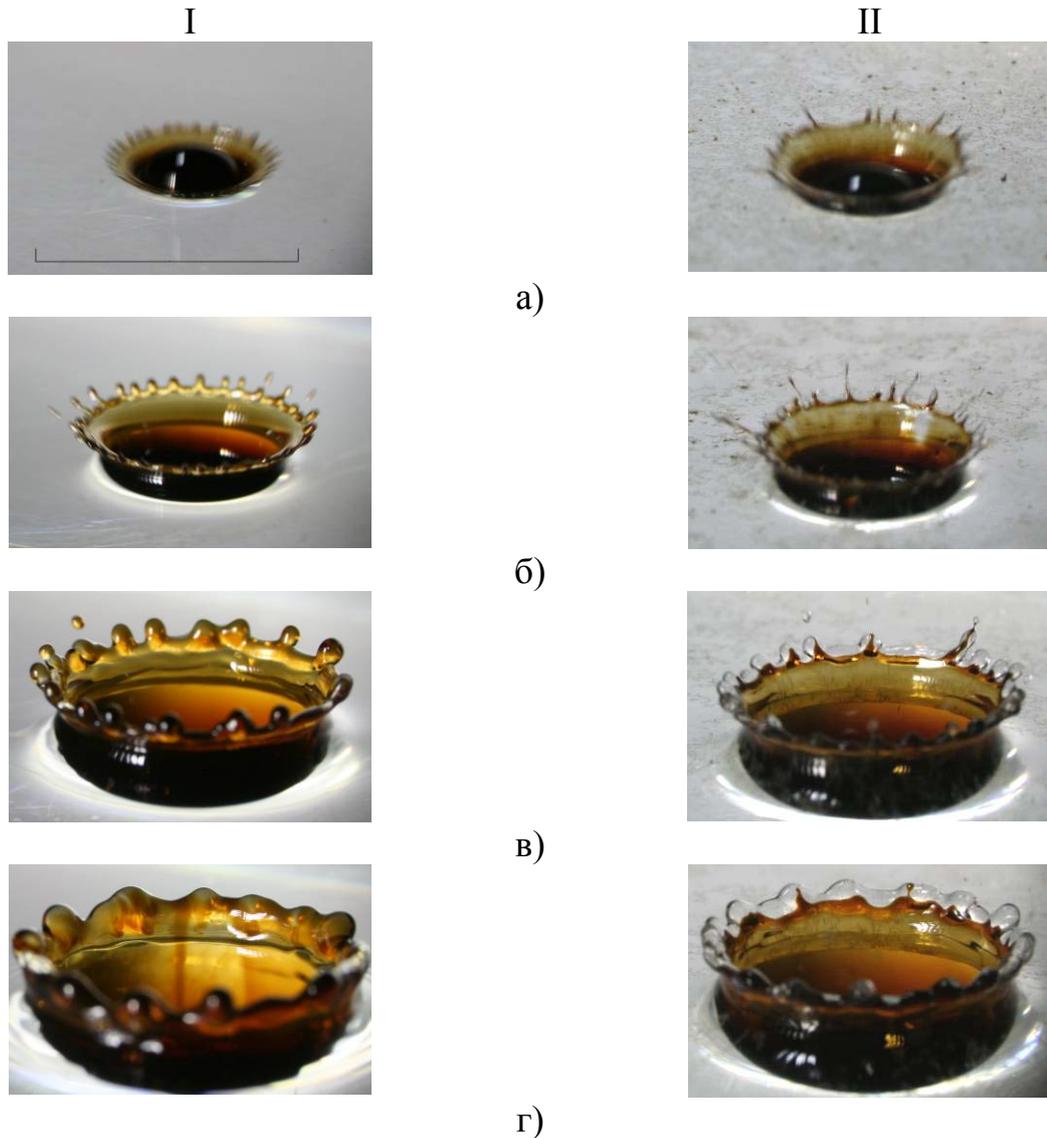


Рис. 5.7. Картина распределения капли нефти по внутренней поверхности венца: I колонка – погружение в слой чистой воды; II колонка – в воду с запыленной поверхностью. Длина метки на рис. 5.7, а – 1 см (масштаб одинаков для всех изображений).

В картине распределения вещества капли по запыленной поверхности принимающей жидкости появляются разрывы – участки, свободные от вещества капли, а также участки с повышенной концентрацией (рис. 5.7, б, II колонка). Регулярность расположения зубьев и стримеров шеврона нарушается, вещество капли концентрируется на внутренних поверхностях зубьев и, в виде тонких нитей, стримеров шеврона.

Вещество капли плотно распределено по поверхности венца и каверны также в фазе их реструктуризации (рис. 5.7, в, I колонка). Одиночная капля,

выбрасываемая с вершины зубца шеврона в расположении на "10 часов" также полностью окрашена нефтью. Наличие пыли на поверхности воды приводит смещению границы пятна вещества капли к краю и зубьям шеврона, верхний край нефтяного пятна воспроизводит зубчатую топографию шеврона (рис. 5.7, в, II колонка). Вторичная капля, находящаяся в угловом положении на "10 часов" не несет с собой вещества первичной капли. 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.

Равномерность распределения нефти по чистой поверхности воды несколько нарушается на поздних фазах реструктуризации короны (рис. 5.7, г, I колонка) при частичном сохранении изрезанности кромки шеврона. На запыленной поверхности воды граница нефтяного пятна незначительно смещается к центру каверны (рис. 5.7, г, II колонка).

Наличие нефтяной пленки на поверхности воды не вносит значительных изменений в картину течений при начальном соприкосновении капли с принимающей жидкостью (рис. 5.8, а, I колонка,  $R_{\sigma} = 0$ ). Однако на более поздних фазах погружения капли на зубьях шеврона венца начинает прослеживаться граница центрального пятна. Внутренняя сторона зубьев покрыта веществом капли, внешняя остается прозрачной (рис. 5.8, б, в, I колонка). Край нефтяного пятна повторяет топографию шеврона (рис. 5.8, г, I колонка), который оказывается более сглаженным. Слабовыраженные зубцы шеврона не выбрасывают в воздух вторичных капель. Вещество капли равномерно распределено по внутренней поверхности каверны и венца (рис. 5.8, б - г I колонка).

Контакт капли нефти с водным раствором этанола (рис. 5.8, а, II колонка,  $R_{\sigma} = -0.05$ ) сопровождается выбросом более тонкой пелены брызг и изрезанной кромкой. Разлетающиеся стримеры более тонкие и менее регулярные. Вещество капли распределено по поверхности пелены в виде тонких волокон.

На внутренней поверхности сформированного венца (рис. 5.8, б, II колонка) нефть растекается равномерно. Внешняя часть образована принимающей жидкостью, аналогично рис. 5.8, б, в, I колонка. Венец характеризуется большей высотой, чем в опытах с другими принимающими жидкостями. Зубья шеврона короткие, регулярные. С их вершин по всему периметру шеврона выбрасываются последовательно вторичные капелек, формируя облако брызг, имеющих четко выраженный зональный характер. Вторичные капельки оказываются частично окрашенными веществом капли, подобно зубьям шеврона.

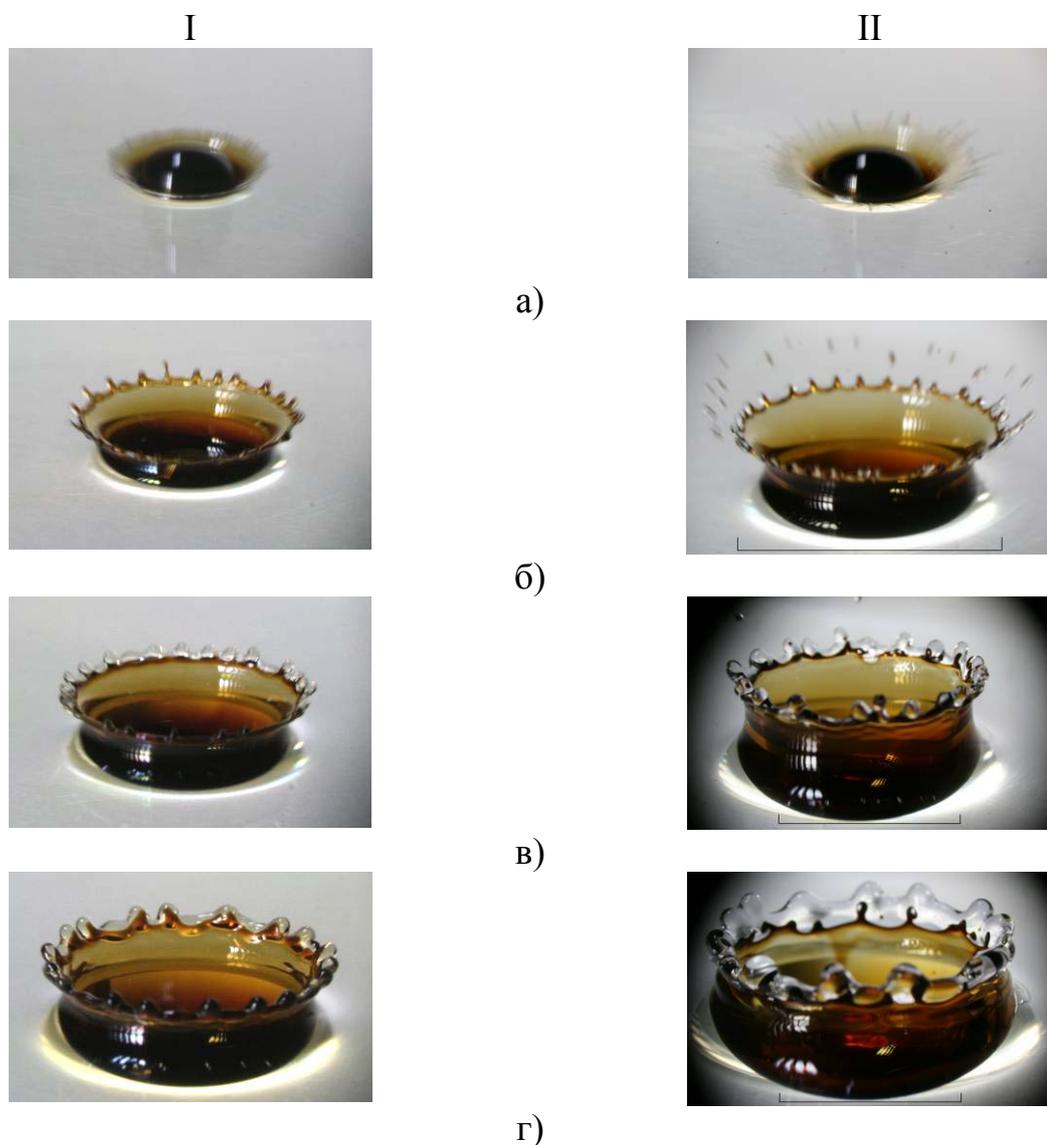


Рис. 5.8. Картина распределения нефти по внутренней поверхности венца:  
 I колонка – капля погружается в воду с нефтяной пленкой  
 II колонка – капля погружается в раствор этанола.

В фазе спадания венца (рис. 5.8, в, II колонка) край нефтяного пятна также начинает смещаться к центру каверны, поздние вторичные капельки не содержат вещества капли. Часть вещества капли остается на поверхности зубьев шеврона (например, в направлении на 11 и 12 часов). По внешней поверхности венца сбегает капиллярные волны. По мере разрешения венца распределение вещества капли на его поверхности становится неравномерным (рис. 5.8, г, II колонка). Увеличение плотности вещества наблюдается также ближе к краю нефтяного пятна.

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. 5.9). Здесь, как и при погружении нефти, образуется кольцевая пелена брызг, более изрезанная при падении капли на поверхность чистой воды (рис. 5.9, а, I колонка) и имеющая выраженные утолщенные стримеры при падении на запыленную (рис. 5.9, а, II колонка,  $R_c = -0.04$ ) и покрытую нефтяной пленкой поверхность (рис. 5.9, а, III колонка  $R_c = -0.05$ ).

С зубцов растущего венца исторгаются тонкие стримеры и брызги (рис. 5.9, б, I колонка), которые не наблюдались при падении капель нефти. Окраска изображения указывает на распределение масла по всей поверхности венца и шеврона. Кромка шеврона венца на поверхности запыленной воды и воды с пленкой (рис. 6, 5.9, II и III колонки) также имеет выраженные зубья по периметру, однако отделяющиеся струи и брызги не выражены.

На шевроне развитого венца (рис. 5.9, в) удается проследить границу масляного пятна. Верхняя часть зубцов шеврона на запыленной поверхности (рис. 5.9, в, II колонка) и поверхности с пленкой (рис. 5.9, в, III колонка) практически не окрашена маслом, как и вылетающие брызги, в отличие от чистой воды (рис. 5.9, в, I колонка), где масло незначительно присутствует на всей поверхности зубьев шеврона и венца. Независимо от состояния поверхности в фазе развитого венца с зубьев шеврона выбрасывается несколько вторичных капель. Линия перехода

венца в каверну более выражена при погружении капль масла в запыленную или покрытую пленкой воду, чем в случае чистой поверхности.

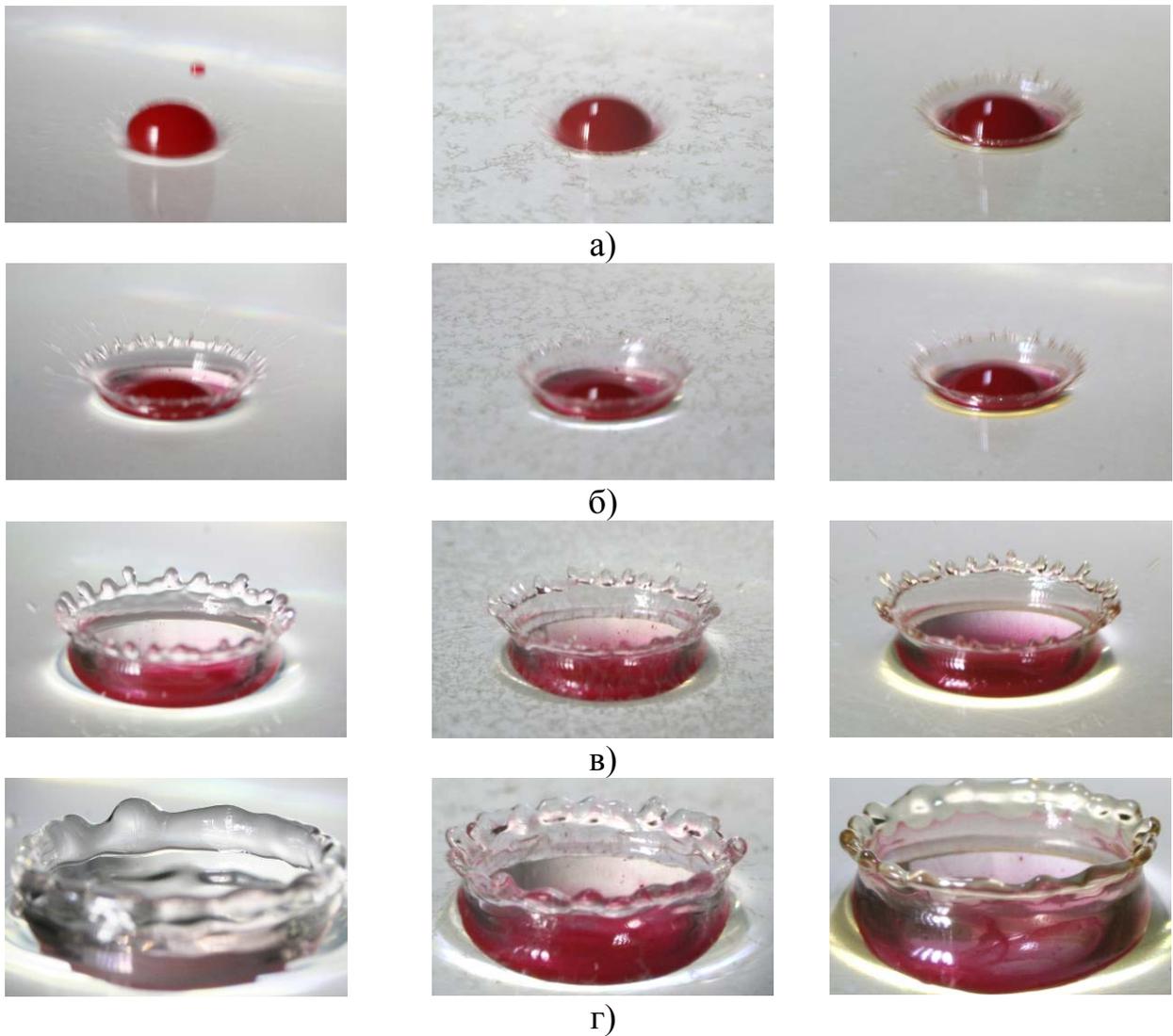


Рис. 5.9 Картина распределения капли масла по внутренней поверхности венца: I колонка – капля масла погружается в слой чистой воды; II колонка – капля погружается в воду с запыленной поверхностью, III колонка – капля погружается в воду с нефтяной пленкой.

На поверхности спадающего венца в чистой воде (рис. 5.9, г I колонка) вещество капли распределено равномерно тонким слоем. В запыленной и покрытой пленкой воде край масляного пятна повторяет топоологию выступов шеврона венца (рис. 5.9, г, II и III колонки), причем на нефтяной поверхности граница более выраженная и сильнее отстает от кромки шеврона.

### 5.3 Влияние вязкости на картину распределения вещества капли по деформированной поверхности принимающей жидкости

Различные концентрации подкрашенного водного раствора глицерина (от 40 до 99%) позволили оценить влияние вязкости на картину растекания вещества капли по деформированной поверхности принимающей жидкости. Вязкости растворов и числа Онезорге в экспериментах приведены в табл. 9

Таблица 9

Концентрация	Вязкость, $\mu, \text{г} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$	Oh	Относительная разность вязкостей, $R_\mu$
0	0.01	$18 \cdot 10^{-4}$	0
40	0.038	$66 \cdot 10^{-4}$	-0,58
60	0.11	0.02	-0,83
90	2.35	0.42	-1
99	11.5	2.04	-1
100	15	2.65	-1

По мере увеличения вязкости (концентрации глицерина) материал капли распределяется по поверхности каверны более равномерно при частичном сохранении линейчатых структур на поверхности венца (рис. 5.10). Картина распределения капли чернил приведена на рис. 5.10, а. Здесь отмечается четыре яруса сетчатой структуры ( $k=4$ ) с центральным пятном на дне каверны. Отношение радиуса центрального пятна к радиусу каверны составляет  $R_1/R = 0.36$ .

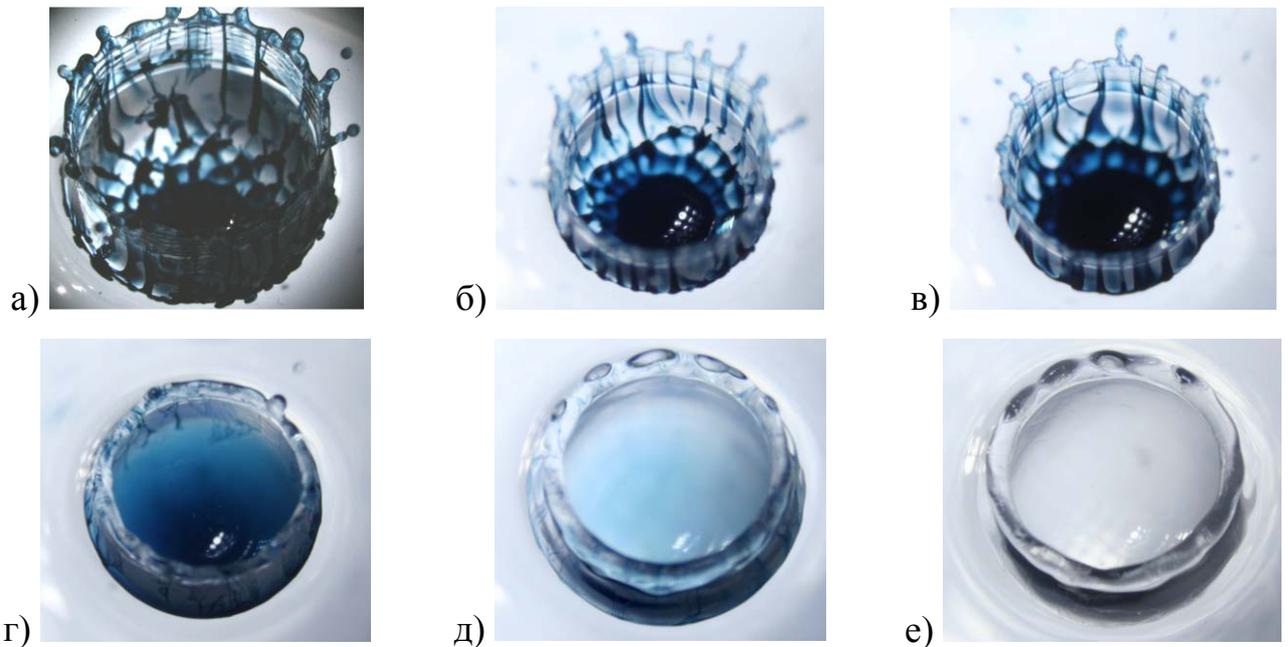


Рис. 5.10. Картины распределения вещества капли при погружении капель: а) – раствора чернил, б – д) – раствора глицерина: 40, 60, 90, 99%, е) – глицерина. Высота падения  $H = 80$  см.

На следующем кадре (рис. 5.10, б) на поверхности каверны располагается всего три яруса структуры, отношение радиусов составляет  $R_1/R = 0.43$ , а при погружении 60% водного раствора глицерина – два яруса, отношение радиусов  $R_1/R = 0.52$ . Зависимость числа ярусов структур и отношения радиусов от числа Онезорге приведены на рис. 5.11.

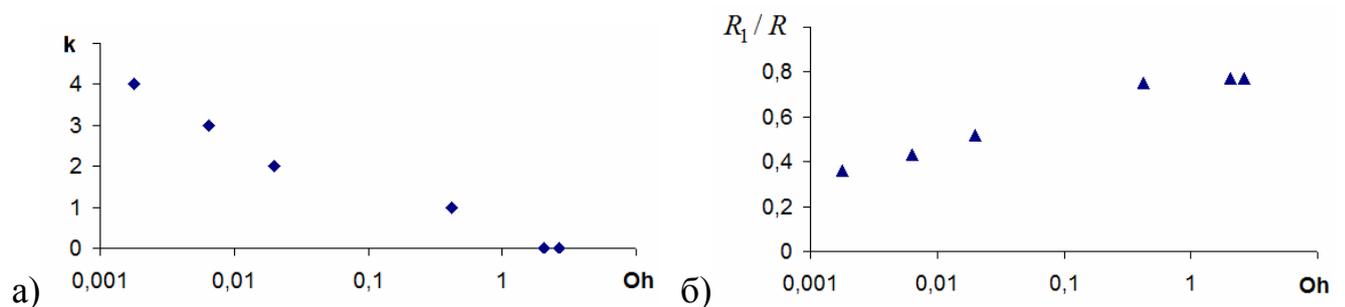


Рис. 5.11. Изменение числа ярусов (а) и отношения радиусов центрального пятна и каверны (б) с числом Онезорге.

С увеличением вязкости капли число ярусов сетчатой структуры уменьшается, как показано на графике рис. 5.11, а. При 90% концентрации глицерина в капле в структуре распределения вещества остаются лишь вертикальные структуры на внутренней поверхности венца, далее вещество капли распределяется практически равномерно. Центральное пятно заполняет все большую площадь каверны (рис. 5.11, б).

#### 5.4 Влияние профиля дна на картину растекания окрашенной капли

Погружение капли чернил в тонкий слой воды ( $h_l \sim D$ ) показал, что дно бассейна оказывает существенное влияние на распределение вещества капли по поверхности принимающей жидкости лишь в случае непосредственного контакта дна каверны с дном бассейна. При контакте капли с принимающей жидкостью картина распределения вещества капли в пелене брызг (рис. 5.12, а) и на поверхности растущего венца (рис. 5.12, б) не имеет принципиальных отличий от картин распределения в глубокой жидкости. На поверхности короны вещество капли образует сетчатый рисунок, состоящий из трех- и четырехугольных ячеек (четыре яруса сетки  $k=4$ ) с вертикальными полосчатыми структурами на поверхности венца.

Далее сетчатая структура несколько нарушается. На рис. 5.12, в обнаруживаются лишь три яруса с относительными радиусами  $R_{21}=1.23$  и  $R_{31}=1.5$ . При контакте дна каверны с твердым дном бассейна вещество капли распределяется в пятне контакта равномерно тонким слоем. Повышение концентрации вещества капли наблюдается по периметру центрального пятна и в центре дна каверны (рис. 5.12, г). На поверхности короны обнаруживается одна кольцевая структура, образованная вихревыми кольцами, соединенными тонкими волокнами. Отношение радиусов составляет  $R_{21}=1.12$ .

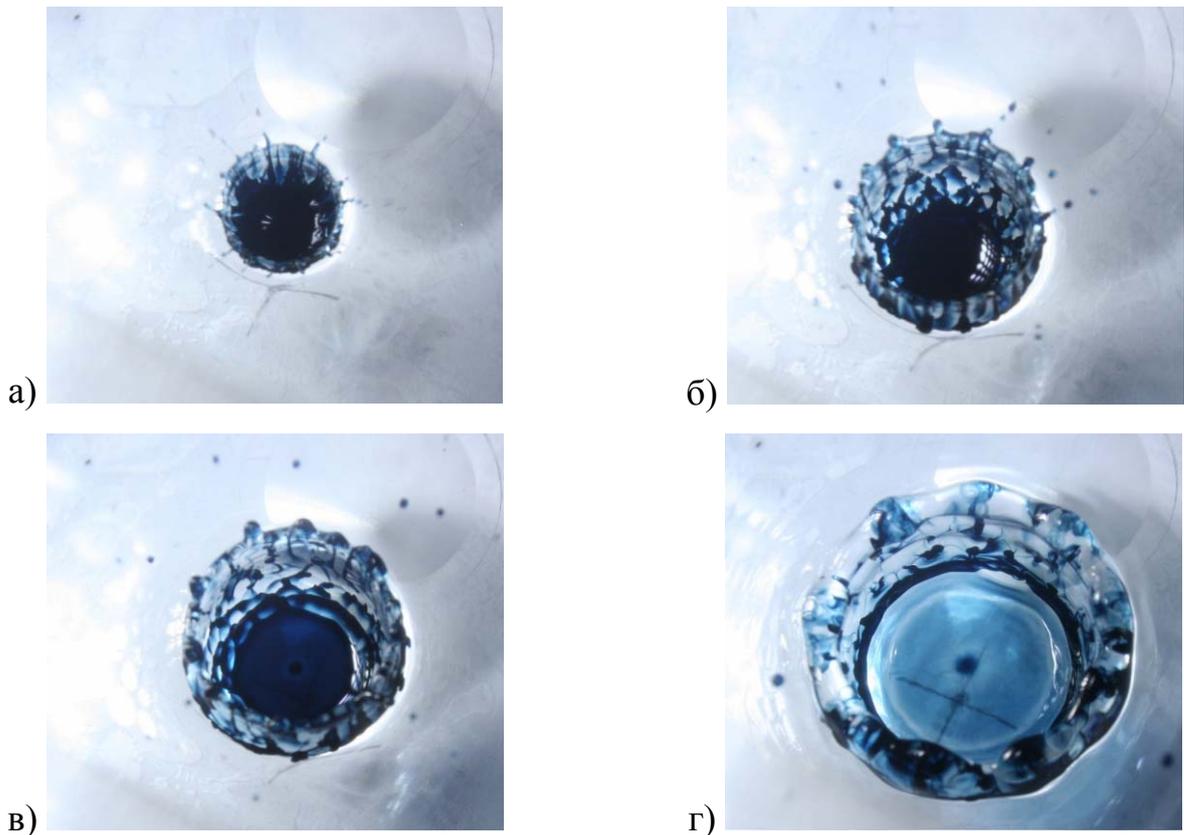


Рис. 5.12. Погружение капли водного раствора чернил, падающей с высоты  $H = 60$  см, в тонкий слой воды ( $h_l = 0.5$  см,  $D = 0.42$  см).

Линейчатый характер распределения вещества капли по внутренней поверхности венца сохраняется при погружении в мелкую воду  $h_l = 0.2$  см с профильным дном. В экспериментах профиль дна представлял собой конические и полусферические углубления диаметром 10 и 20 мм, сферу диаметром 20 мм и клиновидное углубление диаметром 20 мм и углом раствора  $60^\circ$  (рис. 5.13).

В фазах касания капель слоя принимающей жидкости, выброса пелены брызг, и формирования венца картина течений развивается подобно развитию в глубокой жидкости. Аналогично развивается картина течений и в более поздних фазах, если развивающаяся каверна не касается стенок углубления (рис. 5.13, а – в) – диаметр каверны меньше размеров углубления. В этом случае наблюдается до пяти ярусов сетчатой структуры ( $k = 5$ ). На картине течения рис. 5.13 (сферическое углубление  $d = 20$  мм), а отношение радиуса центрального пятна к

радиусу каверны составляет  $R_1/R = 0.41$ , а отношение радиуса первого яруса к центральному пятну  $R_{21} = 1.35$ .

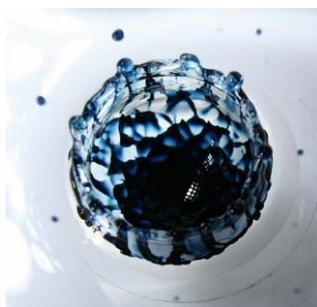
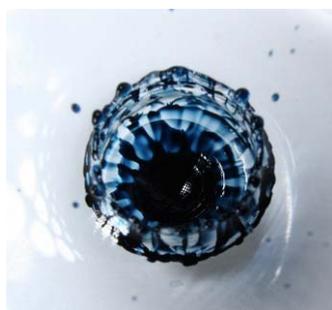
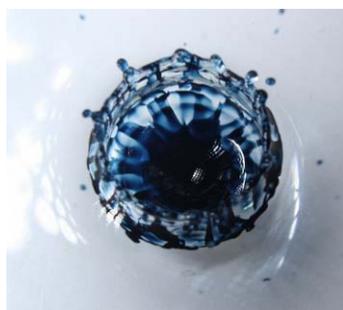
а)  $k = 5$ ,
 $R_1/R = 0.41, R_{21} = 1.35$ 
б)  $k = 5$ ,
 $R_1/R = 0.39, R_{21} = 1.33$ 
в)  $k = 5$ ,
 $R_1/R = 0.43, R_{21} = 1.37$ 
г)  $k = 4$ ,
 $R_1/R = 0.44, R_{21} = 1.84$ 
д)  $k = 4$ ,
 $R_1/R = 0.43, R_{21} = 1.9$ 
е)  $k = 3$ ,
 $R_1/R = 0.74, R_{21} = 1.1$ 

Рис. 5.13. 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) клиновидное углубление, г) сферическое углубление  $d = 10$  мм, д) коническое  $d = 10$  мм, е) сфера.

В случае конического (рис. 5.13, б) и клиновидного (рис. 5.13, в) углубления параметры картины распределения меняются незначительно. На углублениях меньшего диаметра (10 мм, рис. 5.13, г, д) диаметр каверны оказывается больше диаметра углубления, что приводит к контакту каверны с гранями углубления и искажению как формы каверны, так и сетчатого рисунка – существенно увеличивается отношение радиуса первого яруса к радиусу центрального пятна.

Отличия в картине течения при сферическом углублении и коническом снова не обнаруживаются.

При погружении капли в бассейн со сферой на дне картина аналогична картине, возникающей при падении капли в тонкий слой жидкости (увеличенный радиус центрального пятна), однако сетчатый рисунок здесь более выраженный (рис. 5.13, е), сохраняются три яруса.

### 5.5 Выводы к пятой главе

В зависимости от условий эксперимента и свойств сред картина пространственного распределения вещества капли различна. При погружении капли вещества смешивающего ( $\kappa > 0$ ) с принимающей жидкостью формируется сетчатый рисунок с числом ярусов  $k \geq 2$ . Значение  $k$  на разных фазах процесса зависит от высоты свободного падения капли, причем уменьшается по мере увеличения высоты падения (для капли раствора чернил: от  $k = 5$  при  $H < 100$  см до  $k = 2$  при  $H = 260$  см). Количество вещества, концентрирующегося в узлах сетчатого, возрастает при снижении концентрации в ребрах сетки.

Погружение вязких несмешивающихся жидкостей (нефть, масло) формирует центральное пятно  $R_1$ , покрывающее практически всю внутреннюю поверхность венца ( $\kappa = 0$ ,  $k = 0$ ), с шеврона венца  $R_{k+1} = R_1$  выступают зубцы  $f_{k+1} = f_1$ , с которых выбрасываются вторичные капли. Положение границы  $R_1$  зависит от относительного коэффициента поверхностного натяжения сред  $R_\sigma$ . При  $R_\sigma \leq 0$  граница центрального пятна проходит по кромке венца шеврона  $R_{k+1}$  или вблизи нее, вторичные капли содержат незначительное количество вещества капли. При  $R_\sigma > 0$  граница центрального пятна не совпадает с кромкой шеврона, а лежит на внешней поверхности венца, количество вещества основной капли во вторичных существенно возрастает.

Исходя из результатов эксперимента, параметр  $k$  чувствителен к относительной разности вязкостей взаимодействующих сред (уменьшается с

увеличением вязкости капли), при этом существенно возрастает диаметр центрального пятна  $R_1$ .

При различных профилях дна картина течения зависит от отношения диаметров образующейся каверны и углубления, одна сама форма практически не влияет на распределение вещества капли. Столкновение развивающейся каверны с гранями углубления приводит к увеличению длины первого яруса сетчатого рисунка.

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 донных поверхностей.

## 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) со скоростью  $U = 2 \div 3.5$  м/с в жидкость 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 равно 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  $R_\sigma$  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, несмешивающегося с принимающей жидкостью, (капель нефти и подкрашенных подсолнечного и касторовых масел погружающихся в чистую воду) картина распределения более равномерная, линейчатых структур не наблюдается.

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.

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю, Чашечкину Юлию Дмитриевичу, за неоценимую поддержку в течение всего времени работы над диссертацией, советы в подготовке и проведении экспериментов, обработке экспериментальных данных, помощь в работе над текстом и графическим материалом.

## Литература

1. Прохоров В.Е., Чашечкин Ю.Д. Генерация звука при падении капли на поверхность воды // Акустический журнал. 2011. Т. 57. № 6. С.792-803.
2. Fitt B. D. L., McCartney H. A., Walkalate P. The Role of Rain in Dispersal of Pathogen Inoculum // Annual Review of Phytopathology. 1989. V. 27. P. 241–270.
3. Perryman S.A.M., West J.S. Splash dispersal of *Pyllosticta citricarpa* pycnidiospores from infected citrus// EFSA supporting publication № 2014-EN-560. 2014. 30 p.
4. Liow J. L., Dickinson W., Allen M., Gray, N. B. Study of slopping and splashing in a cylindrical bath with top submerged injection // Metall. Mater. Trans. 1995. 26B. P. 887-889.
5. Liow J. L., Gray, N. B. Experimental study of splash generation in a flash furnace // Metall. Mater. Trans. 1996. 27B. P. 633-646.
6. Mehdi-Nejad V., Mostaghimi J., Chandra S. (2003) Air bubble entrapment under an impacting droplet // Phys. Fluids. 2003. V. 15(1). P. 173-183
7. Liow J. L. Splash formation by spherical drops // J. Fluid Mech. 2001. V. 427, P. 73-105.
8. Kizito J.P., Vander Wal R.L., Tryggvason G. Effects of splashing droplets on spray cooling processes // Proceedings of IMECE04 2004 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Heat transfer. V. 1.
9. Bergman T., Mesler R. Part I: Formation of bubble nuclei in superheated water by bursting bubbles // AiChE Journal. 1981. V. 27(5). P. 851-853.
10. Carroll K., Mesler R. Part II: Bubble entrainment by drop-formed vortex rings // AiChE Journal. 1981. V. 27(5). P. 853-856.
11. Williams A. Combustion of droplets of liquid fuels: A review // Combustion and Flame. 1973. V. 21(1). P. 1-31.
12. Zable J. L. Splatter during ink jet printing // IBM J. Res. Dev. 1977. V. 21 (4). P. 315–320.
13. Ellison W.D. Studies of raindrop erosion // Agricultural Engineering. 1944. V. 25. P. 131-136.

14. Springer G.S. Erosion by liquid impact // John Wiley and Sons Inc. New York. 1976.
15. Ferreira A.G., Singer M.J. Energy dissipation for water drop impact into shallow pools // Soil Science Society of America Journal. 1985. V. 49. P. 1537-1542.
16. Wanninkhof R., Asher W. E., Ho D. T., Sweeney C., McGillis W. R. Advances in quantifying air–sea gas exchange and environmental forcing // Annu. Rev. Marine Sci. 2009. V. 1. P. 213–244.
17. Spillman, J. J. Spray impaction, retention and adhesion – an introduction to basic characteristics // Pesticide Sci. 1984. V. 15 (2). P. 97–106.
18. Manzello S.L., Yang J.C. The influence of liquid pool temperature on the critical impact Weber number for splashing // Phys. Fluids. 2003. V. 15(1). P. 257-260.
19. Manzello S.L., Yang J.C., T.G. Cleary On the interaction of a liquid droplet with a pool of hot cooking oil // Fire Safety Journal. 2003. V. 38. P. 651-659.
20. Morton, B.R. & Cresswell R.W. Raindrops in the sea I – generation of vorticity and vortex ring production // 11th Australian fluid mechanics conference. 1992. University of Tasmania, Hobart, Australia.
21. Engel O.G. Crater Depth in Fluid Impacts // J. Applied Physics. 1996. V. 37. №4. P. 1798 – 1808.
22. Basu A.S., Gianchandani Y.B. A programmable array for contact-free manipulation of floating droplets on featureless substrates by the modulation of surface tension // J. Microelectromech. Syst. 2009. V. 18. P. 1163–1172.
23. Wang T., Lacik I., Brissova M., Anilkumar A.V., Prokop A., Hunkeler D., Green R., Shahrokhi K., Powers A.C. An encapsulation system for the immunoisolation of pancreatic islets // Nature Biotechnol. 1997. V. 15. P. 358–362.
24. 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.
25. 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.
26. Chapman D. S., Critchlow P. R. Formation of vortex rings from falling drops // J. Fluid Mech. 1967. V. 29(1). P. 177-185.

27. Rodriguez F., Mesler R. The penetration of drop-formed vortex rings into pools of liquid // *J. Colloid Interface Sci.* 1988. V. 121(1). P. 121-129.
28. Durst F. Penetration length and diameter development of vortex rings generated by impacting water drops // *Exp. Fluids.* 1996. V. 21. P. 110–117.
29. Saylor J. R., Grizzard N. K. The optimal drop shape for vortices generated by drop impacts: the effect of surfactants on the drop surface // *Exp. Fluids.* 2004. V. 36. P. 783–790.
30. 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.
31. 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.
32. Rein M. The transition regime between coalescing and splashing drop // *J. Fluid Mech.* 1996. V.306. P.145-165.
33. Guo Y.P., Ffowcs Williams J. E. A theoretical study on drop impact sound and rain noise // *J. Fluid Mech.* 1991. V. 227, P. 345-355.
34. Rieber M., Frohn A. A numerical study on the mechanism of splashing // *International Journal of Heat and Fluid Flow.* 1999. V. 20. Issue 5. P. 455–461.
35. 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.
36. Agbaglah G., Thoraval M.-J., Thoroddsen S.T., Zhang L.V., Fezzaa K., Deegan R.D. Drop impact into a deep pool: vortex shedding and jet formation // *J. Fluid Mech.* 2015. V. 764, R1-R12.
37. Lan M., Wang X., Zhu P., Chen P. Experimental Study on the Dynamic Process of a Water Drop with Additives Impact upon Hot Liquid Fuel Surfaces // *Energy Procedia.* 2015. V. 66. P. 173 – 176.
38. Berberovic E., van Hinsberg N.P., Jakirlic S., Roisman I.V., Tropea C. Drop impact onto a liquid layer of finite thickness: Dynamics of the cavity evolution // *Phys. Rev.* 2009. E 79, 036306.

39. Thorval M.-J., Li Y., Thoroddsen S.T. Vortex-ring-induced large bubble entrainment during drop impact // *Phys. Rev.* 2016. E93. 033128.
40. Edgerton H.E., Killian J.R. *Flash! Seeing the Unseen by Ultra High-Speed Photography.* Boston: Blanford. 1939.
41. Zhang L. V., Toole J., Fezzaa K., 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.
42. Thoroddsen S. T. The ejecta sheet generated by the impact of a drop // *J. Fluid Mech.* 2002. V. 451. P. 373-381.
43. Schotland R.M. Experimental results relating to the coalescence of water drops with water surfaces // *Disc. Faraday Soc.* 1960. V. 30. P. 72-77.
44. Jayaratne O.W., Mason B.J. The coalescence and bouncing of water drops at an air/water interface // *Proc. Royal Soc. London.* 1964. A 280. P. 545-565.
45. Zhabkova S.L., Kolpakov A.V. Collision of water drops with a plane water surface // *Fluid. Dyn.* 1990. V. 25(3). P. 470-473.
46. Leneweit G., Koehler R., Roesner K.G., Schafer G. (2005) Regimes of drop morphology in oblique impact on deep fluids // *J. Fluid Mech.* 2005. V. 543. P. 303-331.
47. Okawa T., Shiraishi T., Mori T. Effect of impingement angle on the outcome of single water drop impact onto a plane water surface // *Exp. Fluids.* 2008. V. 44. P. 331-339.
48. Ray B., Biswas G., Sharma A. Oblique drop impact on deep and shallow liquid // *Commun. Comput. Phys.* 2012. V. 11(4). P. 1386-1396.
49. Xu L., Zhang W. W., Nagel S. R. Drop splashing on a dry smooth surface // *Phys. Rev. Lett.* 2005. V. 94. P. 184505.
50. Thoroddsen S.T., Sakakibara J. Evolution of the fingering pattern of an impacting drop // *Physics of Fluids.* 1998. V. 10(6). P. 1359 -1374.
51. Vander Wal R.L., Berger G.M., Mozes S.D. Droplets splashing upon films of the same fluid of various depths // *Exp. Fluids.* 2006. V. 40(1). P. 33-52.
52. Hobbs P.V., Osheroff T. Splashing of drops on shallow liquids // *Science.* 1967. V. 155. P. 1112-1114.

53. Macklin W.C., Hobbs P.V. (1969) Subsurface phenomena and the splashing of drops on shallow liquids // *Science*. 1969. V. 166. P. 107-108.
54. Shin J., McMahon T.A. The tuning of a splash // *Phys. Fluids*. 1990. A 2(8). P. 1312-1317.
55. Okawa T., Shiraishi T., Mori T. Production of secondary drops during the single water drop impact onto a plane water surface // *Exp. Fluids*. 2006. V. 41. P. 965–974.
56. Manzello S.L., Yang J.C. An experimental study of a water droplet impinging on a liquid surface // *Exp. Fluids*. 2002. V. 32. P. 580-589.
57. Mundo C., Sommerfeld M., Tropea C. Droplet-wall collisions: experimental studies of the deformation and breakup process // *Int. J. Multiphase Flow*. 1995. V. 21(2). P. 151-173.
58. Cossali G. E., Coghe A., Marengo M. The impact of a single drop on a wetted solid surface // *Exp. Fluids*. 1997. V. 22. P. 463–472.
59. Roisman I.V., Tropea C. Impact of a drop onto a wetted wall: description of crown formation and propagation // *J. Fluid Mech*. 2002. V. 472. P. 373–397.
60. Wang A.B., Chen C.C. Splashing impact of a single drop onto very thin liquid films // *Phys. Fluids*. 2000. V. 12(9). P. 2155-2158.
61. Howison S. D., Ockendon J. R., Wilson S. K. Incompressible water-entry problems at small deadrise angles // *J. Fluid Mech*. 1991. V. 222. P. 215–230.
62. Josserand C. Zaleski S. Droplet splashing on a thin liquid film // *Phys. Fluids*. 2003. V. 15. P. 1650–1657.
63. Purvis R., Smith F. T. Droplet impact on water layers: post-impact analysis and computations // *Phil. Trans. R. Soc*. 2005. A 363. P. 1209–1221.
64. Rodriguez F., Mesler R. Some drops don't splash // *J. Colloid Interface Sci*. 1985. V. 106. 347-352.
65. Hsiao M., Lichter S., Quintero L.G. The critical Weber number for vortex and jet formation for drops impinging on a liquid pool // *Phys. Fluids*. 1988. V. 31. P. 3560-3562.

66. Huang Q. Y., Zhang H. A study of different fluid droplets impacting on a liquid film // *Petrol Sci.* 2008. V. 5. P. 62–66.
67. Zhao H., Brunsvold A., Munkejord S. T. (2011a) Investigation of droplets impinging on a deep pool: transition from coalescence to jetting // *Exp. Fluids.* 2011 V. 50. P. 621–635.
68. Thoroddsen S.T., Takehara K. The coalescence cascade of a drop // *Phys. Fluids.* 2000. V. 12(6). P. 1265-1267.
69. Blanchette F. Bigioni T.P. Partial coalescence of drops at liquid interfaces // *Nat. Phys.* 2006. V.2. P. 254-257.
70. Gilet T., Vandewalle N., Dorbolo S. Controlling the partial coalescence of a droplet onto a vertically vibrated bath // *Phys. Rev. E Stat. Nonlin. Soft. Matter Phys.* 2007. V. 76(3). 035302.
71. Eggers J., Smith A. F. Free streamline flows with singularities // *J. Fluid Mech.* V. 647. 2010. pp. 187–200.
72. 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.
73. Чашечкин Ю.Д., Прохоров В.Е. Гидродинамика удара капли: короткие волны на поверхности венца // Доклады Академии наук. 2013. Т. 451. № 1. С. 41–45.
74. 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.
75. Чашечкин Ю. Д., Прохоров В. Е. Структура первичного звукового сигнала при столкновении свободно падающей капли с поверхностью воды // *ЖЭТФ.* 2016. Том 149, Вып. 4, стр. 864–875.
76. Prosperetti A., Oguz H.N. The impact of drops on liquid surfaces and the underwater sound of rain // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 1993 V. 25. P. 577-602.
77. Pumphrey H. C., Elmore P. A. The entrainment of bubbles by drop impacts // *J. Fluid. Mech.* 1990. V. 220. P. 539-567.
78. Brutin D. Drop impingement on a deep liquid surface: study of a crater's sinking dynamics // *C. R. Mecanique.* 2003. V. 331. P. 61-67.

79. Macklin W.C., Metaxas G.J. Splashing of drops on liquid layers // *J. Appl. Phys.* 1976. V. 47. P. 3963-3970.
80. Fedorchenko A. I., Wang A.-B. On some common features of drop impact on liquid surfaces // *Phys. Fluids*. 2004. V. 16(5). P. 1349-1365.
81. Ray B., Biswas G., Sharma A. Regimes during liquid drop impact on a liquid pool // *J. Fluid Mech.* 2015. V. 768. P. 492-523.
82. Ogawa A., Utsuno K., Mutou M., Kouzen S., Shimotake Y., Satou Y. (2006) Morphological study of cavity and Worthington jet formations for Newtonian and non-Newtonian liquids // *Particulate Science and Technology*. 2006. V. 24. P. 181–225.
83. Tome M. F., Grossi L., Castelo A., Cuminato J. A., McKee S., K. Walters Die-swell, splashing drop and a numerical technique for solving the Oldroyd B model for axisymmetric free surface flows // *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 2007. V. 141. P. 148–166.
84. Thoroval M.J., Takehara K., Etoh T.G., Popinet S., Ray P., Josserand C., Zaleski S., Thoroddsen S.T. von Karman vortex street within an impacting drop // *Phys. Rev. Lett.* 2012. V. 108. 264506.
85. Thoroddsen S.T., Thoroval M.J., Takehara K., Etoh T.J. Droplet splashing by a slingshot mechanism // *Phys. Rev. Lett.* 2011 V. 106. 034501.
86. Marston J. O., Thoroddsen S. T. Apex jets from impacting drops // *J. Fluid Mech.* 2008. V. 614. P. 293–302.
87. Rioboo R., Baurhier C., Conti J., Voue M., De Coninck J. Experimental investigation of splash and crown formation during single drop impact on wetted surfaces // *Exp. Fluids*. 2003. V. 35. P. 648–652.
88. Cossali G. E., Marengo M., Coghe A., Zhdanov S. The role of time in single drop splash on thin film // *Exp. Fluids*. 2004. V. 36. P. 888-900.
89. Zhang L.V., Toole J., Fezzaa K., Deegan R.D. Wavelength selection in the crown splash // *Phys. Fluids*. 2010. V. 22. 122105.
90. Gueyffier D., Zaleski S. Finger formation during droplet impact on a liquid film // *C. R. Acad. Sci. Paris*. 1998. V. 326(2b). P. 839-844.

91. Krechetnikov R., Homsy G.M. Crown-forming instability phenomena in the drop splash problem // *J. Colloid Int. Sci.* 2009. V. 331. P. 555-559
92. Agbaglah G., Josserand C., Zaleski S. Longitudinal instability of a liquid rim // *Phys. Fluids*. 2013. V. 25. 022103.
93. Jones A.T. The sound of splashes // *Science*. 1920. V. 52. P. 295–296.
94. Minnaert M. On musical air bubbles and the sounds of running water // *Phil. Mag.* 1933. V. 16. P. 235-248
95. Manzello S. L., Yang J. C., Cleary T. G. On the interaction of a liquid droplet with a pool of hot cooking oil // *JFS*. 2003. V. 38. P. 651-659.
96. Wang X.S., Zhao X.D., Zhang Y., Cai X., Gu R., Xu H.L. Experimental Study on the Interaction of a Water Drop Impacting on Hot Liquid Surfaces // *JFS*. 2009. V. 27. Issue 6. P. 545-559.
97. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Том VI. Гидродинамика. 5-е изд., - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. - 736 с.
98. Deegan R. D., Brunet P. and Eggers J. Complexities of splashing // *IOP Publishing Ltd and London Mathematical Society. Nonlinearity*. 2008. V. 21. C1–C11.
99. 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.
100. 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.
101. 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.).
102. Thoroddsen S.T., Etoh T.G., Takehara K. Air entrapment under an impacting drop // *J. Fluid Mech.* 2003. V. 478. P. 125-134.
103. Гиббс Дж. Термодинамика. Статистическая механика. М. 1982. 584 с.

104. Lewars E.G. Computational Chemistry: Introduction to the Theory and Applications of Molecular and Quantum Mechanics. 2003. N.-Y. Kluwer. 471 p.
105. Эйзенберг Д. Кауцман В. Структура и свойства воды. Л-д: Гидрометеоиздат. 1975. 258 с.
106. 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.
107. Güner F. E. G., Wåhlin J., Hinge M., Kjelstrup S. The temperature jump at a growing ice–water interface // *Chem. Phys. Lett.* 2015. V. 622. P. 15-19.
108. Бункин Н.Ф., Индукаев К.В., Игнатъев П.С. Спонтанная самоорганизация газовых микропузырей в жидкости // *ЖЭТФ.* 2007. Т. 131. № 3. С. 539-555.
109. Байдулов В.Г., Чашечкин Ю.Д. Инвариантные свойства систем уравнений механики неоднородных жидкостей // *Прикладная математика и механика.* 2011. Т. 75. Вып. 4. С. 551-562.
110. Васильев Л.А. Теневые методы. – М.: Наука, 1968.
111. Thorpe S. A. The excitation, dissipation and interaction of internal waves in the deep ocean // *J. Geophys. Res.* 1975. V. 80, no. 3, P. 328–338.
112. Широков К. П. Основные понятия теории динамических измерений // *Измерительная техника.* 1975. № 12. С. 9–14.
113. Левцов В.И., Чашечкин Ю.Д. Тез. Докл. III Всесоюз. Семинара-совещания «Метрология в радиоэлектронике». – М., 1975. С. 188.
114. Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю. Капиллярные волны на поверхности погружающейся в жидкость капли // *Доклады Академии наук.* 2015. Т. 465. № 4. С. 548-554.
115. Ильиных А.Ю., Чашечкин Ю.Д. Гидродинамика контакта падающей капли со свободной поверхностью жидкости // *МЖГ.* 2016. № 2. С. 3-12.
116. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т.5. Статистическая физика. Часть I. 5-е изд., - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. - 616 с.
117. Майер В.В. Кумулятивный эффект в простых опытах. М.: Наука. 1989. 192с.

118. Макарихин И.Ю., Макаров. С.О., Рыбкин К.А. Замечания о падении капли на свободную поверхность другой жидкости // Изв. РАН Механика жидкости и газа. 2010. №1. С. 40-44
119. Lhuissier H., Sun C., Prosperetti A. Lohse D. Drop Fragmentation at Impact onto a Bath of an Immiscible Liquid // Phys. Rev. Letters. 2013. V. 110. 264503
120. 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.
121. 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.
122. Ильиных А.Ю., Ильиных Ю.С., Чашечкин Ю.Д. Измерительный преобразователь электрической проводимости жидкостей // Измерительная техника. 2015. №12. С.30-33