

УДК 532.6

**ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ ВОЗМУЩЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ  
ЖИДКОСТИ ТЕЧЕНИЯМИ, ВЫЗВАННЫМИ УПАВШЕЙ КАПЛЕЙ**© 2019 г. Ю. Д. Чашечкин<sup>1,\*</sup><sup>1</sup> *Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия**\* e-mail: chakin@ipmnet.ru*

Поступила в редакцию 08.04.2019 г.

После доработки 14.04.2019 г.

Принята к публикации 15.04.2019 г.

Методами высокоразрешающей фото- и видеорегистрации изучена тонкая структура течений в центре каверны и на оголовке растущего всплеска, деформирующих гладкую поверхность жидкости после спадания венца. Геометрия поверхности отражает сложность картины тонких течений в приповерхностном слое жидкости. Определены геометрические параметры структуры, образованной сглаженными шипами, разделенными тонкими впадинами. Образование структур связывается с действием различных механизмов обмена между кинетической, потенциальной и внутренней энергией в жидкости со свободной поверхностью.

*Ключевые слова:* жидкость, капля, каверна, всплеск, структура, энергия

**DOI:** 10.1134/S0032823519030032

**Введение.** Совершенствование методов оптической регистрации физических процессов, фото- и видеотехники, источников света способствовало развитию ряда разделов механики, включающих и экспериментальную гидродинамику свободно падающей капли. Переход от визуальных наблюдений подкрашенных течений к фотографической регистрации вначале с искровым источником света [1], а позднее с регулируемой вспышкой [2], внедрение сверхбыстродействующих видеокамер [3], расширение диапазона длин волн с дополнением оптического излучения инфракрасным, ультрафиолетовым, и даже рентгеновским [4] способствовало детализации описания картины течений и разработке теоретических моделей. Процесс формирования свободно падающей каплей вихревых колец в принимающей жидкости был дополнен классификацией базовых структурных компонентов наблюдаемых течений. Последовательно были визуализированы каверна, выступающий венец с краевым шевроном, с зубцов которого вылетают капли, всплеск (“кумулятивная струйка”), окруженные группой кольцевых капиллярных волн [1]. Позднее были визуализированы и изучены такие короткоживущие компоненты, как ламелла (lamella) – тонкий диск, насильно вылетающий из зоны контакта сливающихся жидкостей, и еще более тонкая пелена (“the ejecta sheet”), вылетающая из внешней кромки области слияния капли силиконового масла, падающей в бассейн с таким же маслом [4]. Сохранение интереса к детальному изучению картин, порождаемых погружением капли, обусловлено фундаментальностью задачи, сложностью математического описания процессов и важностью практических приложений: в анализе процессов переноса влаги, минеральных веществ, газов, биоматериалов, вирусов и бактерий, способствующих распространению инфекций [5] через контактную поверхность атмосферы и гидросферы, а также в широком классе физических, химических и биохимических технологических процессов.

Изучению взаимодействия падающих капель с поверхностью жидкости, включающего образование газовых пузырьков, уделяется внимание в гидроакустике океана [6]. Анализ природного звукового поля, включающего “шум дождя”, позволил разработать методики восстановления данных о динамическом состоянии океана в удаленных и малодоступных для наблюдения регионах [7].

Наряду с экспериментальными, активно проводятся и теоретические исследования процесса взаимодействия свободно падающей капли с покоящейся принимающей жидкостью с целью уточнения механизмов переноса энергии, вещества, формирования газовых пузырьков, активно излучающих тональный звук. Был установлен [8] процесс излучения звука, связанный с ударным возбуждением колебаний полости быстро втягивающимся коническим остатком разорвавшейся перемычки при формировании пузырька и освобождением доступной потенциальной поверхностной энергии при выравнивании формы полости. В силу малости толщин областей локализации освобождение доступной потенциальной энергии ее переход из латентной формы во внутреннюю и энергию течений происходит достаточно быстро и возбуждает собственные объемные колебания газового пузырька [9].

Наблюдения показывают, что достаточно сложная картина течений, включающая тонкие компоненты, которые нарушают осевую симметрию течений, обычно принимаемую в расчетах, все еще остается недостаточно изученной на всех этапах эволюции картины течения – и в ходе погружения капли [10, 11], и в более поздних стадиях, в частности при образовании всплеска и газовых пузырьков. Интерес представляет анализ оптических изображений течений, которые современная техника регистрации позволяет получать со все более высоким и временным, и пространственным разрешением по примеру аэродинамики, где удалось визуализировать тонкую структуру течения, пропадающую при увеличении длительности выдержки [13]. Цель данной работы – проведение высокоразрешающей регистрации картины течения, создаваемого свободно упавшей каплей воды в покоящуюся воду.

В число определяющих параметров задачи входят плотности сред (воздуха  $\rho_a$ , жидкости капли  $\rho_d$ , далее  $\rho_{a,d}$ ), кинематических  $\nu_{a,d}$  и динамических  $\mu_{a,d}$  вязкостей сред, полного  $\sigma_d^a$  и нормированного на плотность жидкости коэффициента поверхностного натяжения  $\gamma = \sigma_d^a / \rho_d$ , а также условий опытов, к которым относятся ускорением свободного падения  $g$ , эквивалентный диаметр  $D$ , высота падения  $H$  или скорость капли  $U$  в момент первичного контакта.

В маловязких средах значения масштабов существенно различаются. В частности, для воды наибольший и наименьший масштабы длины равны  $\delta_{\max} = \delta_g^v = \sqrt{\gamma/g} = 0.27$  и  $\delta_{\min} = \delta_\gamma^v = v^2/\gamma = 1.37 \times 10^{-6}$  см, соответственно, а временные масштабы –  $\tau_{\max} = \tau_\gamma^d = 3.2 \times 10^{-2}$  с и  $\tau_{\min} = \tau_\gamma^v = 1.9 \times 10^{-10}$  с.

Значения масштабов определяют требования к методике эксперимента: выбору размера поля наблюдения, разрешающей способности оптического регистратора, длительности выдержки. Одни из них удается различать, другие, типа  $\delta_\gamma^v$ , величина которых приближается к размеру молекулярного кластера, разрешить не удается.

Отношения однородных базовых масштабов, зависящие от физических свойств сред, геометрии и условий опытов [11], включают традиционные безразмерные комбинации, которые ранее по отдельности использовались при анализе результатов, а именно числа Рейнольдса  $Re_d = UD/\nu_d$ , характеризующие движение капли и  $Re_t = u_t L_t/\nu_t$  для течений в толще принимающей жидкости с масштабами скорости  $u_t$  и длины  $L_t$ ; Фруда  $Fr_d = U^2/gD$ ; Вебера  $We_d = U^2 D/\gamma_d$ ; Бонда  $Bo = D^2/(\delta_g^v)^2 = gD^2/\gamma_d^a$ ; Онезрге  $Oh = \sqrt{\delta_\gamma^v/D} = v/\sqrt{\gamma D}$ .

**1. Экспериментальная установка.** Опыты выполнены на Стенде для исследования поверхностных и подводных процессов (ЭСП) в составе “Гидрофизического комплекса для моделирования гидродинамических процессов” [14].

Основу стенда, предназначенного для исследования тонкой структуры поверхностных и подводных процессов совмещенными оптическими, контактными и акустическими методами, составляет прозрачный бассейн из оргстекла размерами  $1.5 \times 0.6 \times 0.4$  м, в боковые стенки которого вставлены два оптических иллюминатора. Бассейн заполнялся дегазированной водопроводной водой.

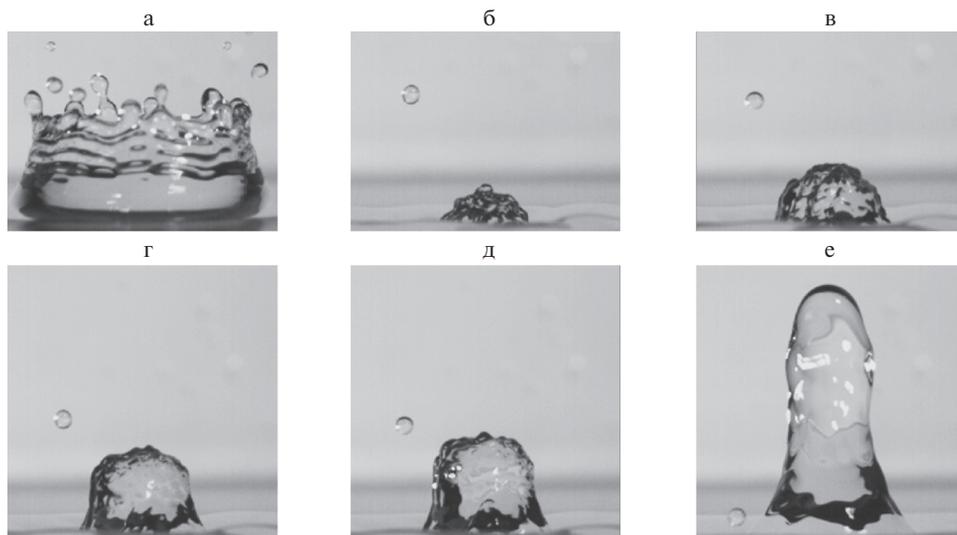
Область наблюдения освещалась двумя многоэлементными светодиодными источниками постоянного света MultiLED. Картина течения регистрировалась скоростной видеокамерой Optronis CR3000×2. Над бассейном на высоте  $0.5 < H < 170$  см от поверхности принимающей жидкости в бассейне, устанавливался дозатор, позволяющий формировать с заданной частотой капли выбранного объема в диапазоне диаметров  $0.2 < D < 0.6$  см. Оторвавшиеся капли свободно падали под действием силы тяжести. Траектория падения капли пересекала линию визирования оптического сигнала фотозатвора, фиксирующего ее прохождение. Сигнал с фотозатвора поступал на вход блока управления регулируемой задержки на кварцевом резонаторе, запускающего видеокамеру.

Цифровая обработка оптических изображений и анализ данных проводились в среде Matlab. Изображение масштабировалось по сетке с шагом 1.0 см. Методика эксперимента и обработки данных разрабатывались с учетом требования регистрации тонких деталей картины течения (до 12 мкм) и разрешения короткоживущих компонентов (до нескольких микросекунд).

**2. Основные результаты.** Была изучена [11] начальная фаза процесса растекания капли, образования каверны, венца, выброса последовательности мелких капелек (брызг), часть которых попадает на поверхность погружающейся капли. Прослежен [12] перенос окрашенного вещества капли в принимающей жидкости с образованием сетчатых структур на дне каверны и полосчатых структур на венце. Здесь будет рассмотрена картина течения на более поздней стадии процесса – в фазе распада венца и формирования центральной (кумулятивной) струйки – всплеска.

Выбранная в данных опытах скорость видеорегистрации, при которой выдержка отдельного кадра составляет  $10^{-4}$  с, позволила получить четкие изображения семейства капиллярных волн, сбегających в каверну с кромки венца на видеограмме, приведенной на рис. 1а. Далее процесс расплывания венца жидкости и образования сравнительно гладкой ложбины в области контакта капли воды ( $\nu = 0.01$  см<sup>2</sup>/с,  $\sigma = 72$  эрг/см<sup>2</sup>), падающей в спокойную воду, переходит в фазу роста всплеска (рис. 1б). Выступающий над поверхностью воды оголовок струйки оказывается неровным и покрытым нерегулярными выступами, разделенными узкими заостренными впадинами. Поверхность всплеска выглядит “бурлящей” – отдельные выступы несинхронизованно растут и пропадают, общая картина непрерывно видоизменяется.

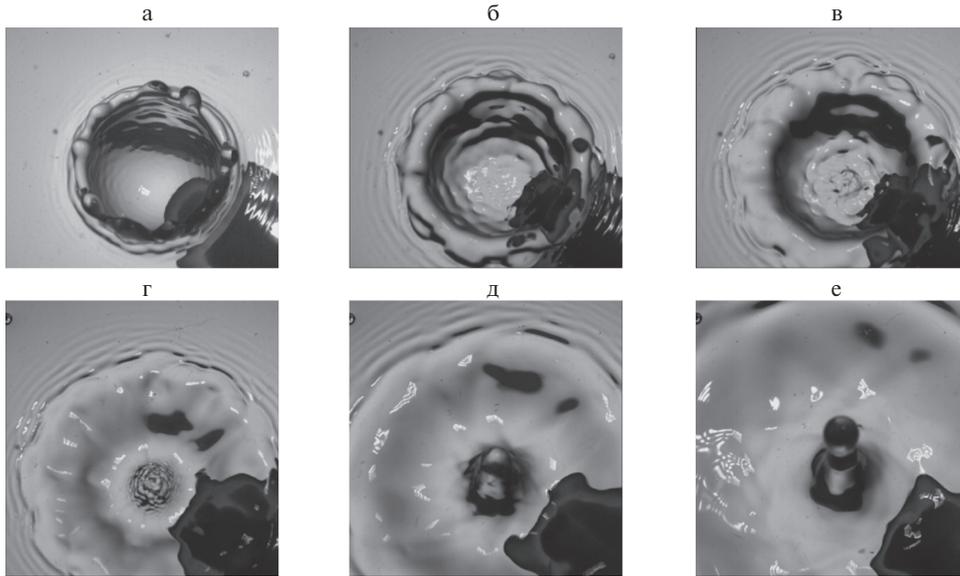
Нерегулярная форма поверхности сохраняется в фазе дальнейшего роста высоты центральной струйки (рис. 1в, 1г, 1д) – отдельные выступы погружаются и заменяются новыми. Площадь, занимаемая выступающими элементами, характерный поперечный размер которых практически не меняется, а высота плавно уменьшается, растет, но остается ограниченной только верхней частью струйки. От нее по более гладкой боковой поверхности вниз начинает распространяться система кольцевых капиллярных волн с волнистыми гребнями и впадинами. На последней фотографии, приведенной на рис. 1е остатки нерегулярных возмущений свободной поверхности можно видеть только на боковых стенках струйки. В верхней части всплеска начинает формироваться отрывающаяся капля с гладкой поверхностью.



**Рис. 1.** Структура поверхности венца и растущего всплеска, порождаемых свободно падающей каплей воды в воду ( $D = 0.5$  см,  $H = 78$  см,  $U = 380$  см/с,  $Re = 19000$ ,  $Fr = 294$ ,  $We = 1002$ ,  $Bo = 3.4$ ,  $Oh = 0.0017$ ): (а)–(е) –  $t = 12.9, 56.6, 59.8, 62.9, 64.7, 85.2$  мс.

Особенности структуры течения в горизонтальной плоскости иллюстрируют фотографии, приведенные на рис. 2; время отсчитывается с момента касания передней кромки капли поверхности принимающей жидкости и появления разлетающейся пелены. В фазе спадания венца в картине течения представлены несколько групп капиллярно-гравитационных волн – на его внешней и внутренней поверхности, часть которых достигла дна каверны и покрыла ее внешней областью, и разбегающиеся по невозмущенной поверхности жидкости (рис. 2а). Фазовые поверхности – гребни и впадины всех групп волн неоднородны по высоте и искривлены. Неровности формы отражают особенности геометрии области формирования, в свою очередь обусловленную пространственной неоднородностью тонкой структуры внутренних течений. По условиям регистрации внешняя группа капиллярных волн наиболее выражена в правом нижнем углу изображения, в зоне контакта падающего пучка света с поверхностью жидкости на границе области частичного затенения изображения элементами конструкции.

В начале фазы спадания венца капиллярные волны покрывают полностью поверхности стенок венца и дно каверны, на границе которых их амплитуда максимальна (рис. 2б). Картина волн малой амплитуды в каверне нерегулярна. Со временем длины и амплитуда волн увеличиваются. Возмущения, наиболее выражены на границе венца и каверны, дно которой уплощается и покрывается нерегулярной рябью, образованной пересечением волновых фронтов, приходящих с разных направлений (рис. 2в). Кривизна центра впадины меняет знак, центр картины начинает возвышаться над окружающей жидкостью. Со временем формы всех мелких элементов течения продолжают сглаживаться, за исключением оголовка растущего всплеска, который остается покрытым мелкими выступами, разделенными глубокими узкими впадинами (рис. 2г) вплоть до момента начала формирования капли на вершине всплеска, поверхность которой оказывается гладкой. Мелкомасштабные неоднородности сохраняются только на цилиндрическом участке всплеска и коническом пьедестале (рис. 2д). На более поздней стадии в форме струи можно выделить три участка – гладкую сферическую вершину, цилиндрическую центральную часть и коническое основание, переходящее в кольцевую ложбину с радиальными и кольцевыми гладкими впадинами (рис. 2е).



**Рис. 2.** Тонкая структура фронтального изображения поверхности венца и всплеска, порождаемых свободно падающей каплей воды в воду ( $D = 0.5$  см,  $H = 70$  см:  $U = 310$  см/с,  $Re = 15500$ ,  $Fr = 196$ ,  $We = 667$ ,  $Bo = 3.4$ ,  $Oh = 0.0017$ ): (a)–(e) –  $t = 30, 41, 45, 51.7, 59.2, 95.7$  мс.

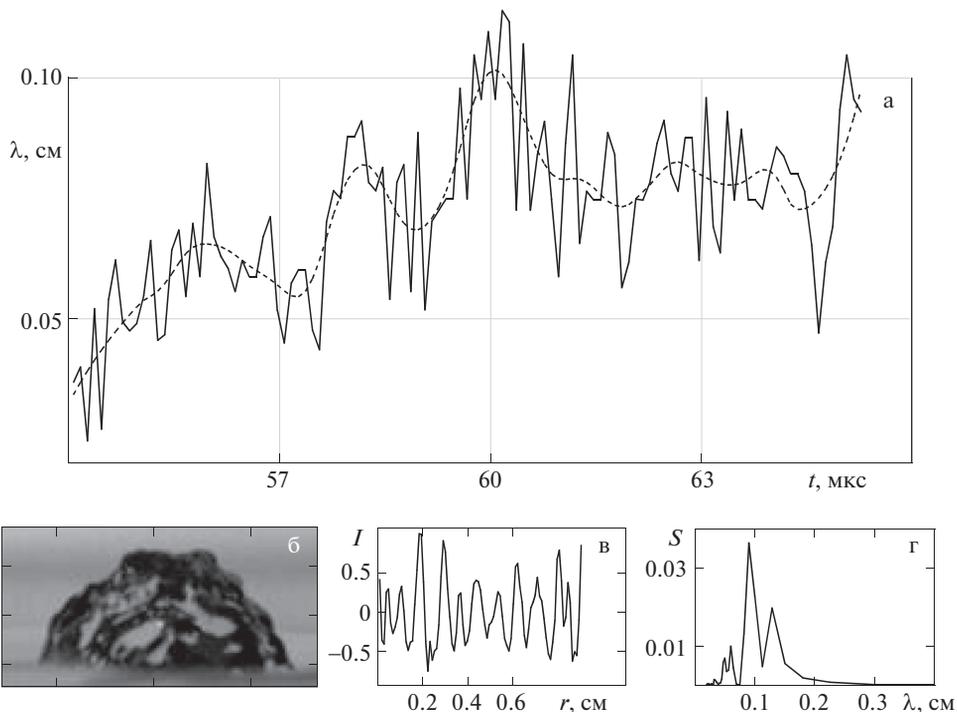
Более детальная информация о тонкой структуре поверхности всплеска представлена на рис. 3 и 4, где даны результаты обработки последовательности боковых и фронтальных изображений всплеска. Приведенные на верхней врезке значения нормированной освещенности  $I(r)$ , взятые с шагом  $\delta r$  вдоль отмеченной траектории (линейной на рис. 3 и окружности на рис. 4), были использованы для определения спектральной плотности мощности флуктуаций

$$S(\lambda) = \frac{\delta r}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} I_n e^{-i2\pi kn} \right|^2, \quad 0 < k \leq \frac{1}{2\delta r}, \quad \lambda = k^{-1}$$

В распределении спектральной плотности по масштабам  $S(\lambda)$  на рис. 3 при  $t = 58$  мс выделены несколько пиков на масштабах  $\lambda = 0.07, 0.09$  и  $0.15$  см. На графике  $\lambda(t)$  представлена зависимость положения главного пика от времени в интервале 55–65 мс. Значения главных масштабов, лежащие в диапазоне от 0.04 до 0.12 см, нерегулярно меняются от кадра к кадру. Сглаженная центральная линия плавно осциллирует с периодом около 2 мс.

Во фронтальной картине неоднородности более крупные, главный масштаб составляет 0.2 см. Вариации его значения меньше, чем в вертикальной плоскости, за исключением отдельных выбросов, лежащих в диапазоне 0.1–0.3 мм, что, возможно, объясняется общей структурой всплеска на рис. 4. По мере роста высоты всплеска остатки возмущений сбегает вниз и затухают у границ конического основания, постепенно погружающегося в принимающую жидкость.

В зависимости от условий эксперимента на вершине всплеска может сформироваться прикрепленная капля на ножке, отделившаяся одиночная капля и последовательность вылетающих капель, которые в дальнейшем возвращаются в область своего формирования. При этом картины погружения возвратившейся одиночной капли и свободно падающей в невозмущенную среду [11] существенно различаются. Размеры вторич-



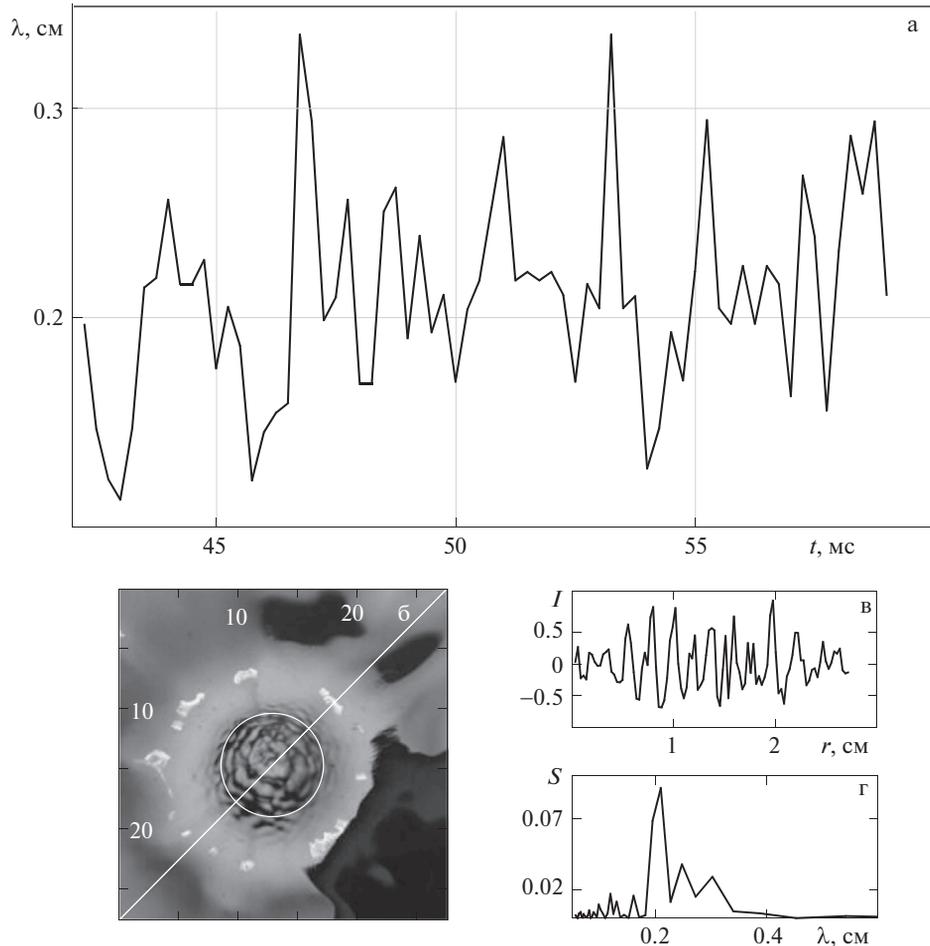
**Рис. 3.** Временная изменчивость главного масштаба микровозмущений  $\lambda(t)$  на боковой поверхности растущего всплеска – (а), штриховая кривая – скользящее среднее со сдвигом в 1 мс; (б) – фотография, шкалы – в мм; (в) – распределение нормированной освещенности  $I(r)$  в середине изображения; (г) – спектр масштабов  $S(\lambda)$  при  $t = 58$  мс.

ной и первичной каплей достаточно близки, причем вторичная может быть большего диаметра, но падает она медленнее и контактирует с взволнованной поверхностью.

В случае погружения капли, сохраняющей контакт с всплеском, короткие волны на ее боковой поверхности и перемычке начинают формироваться еще до соприкосновения сферы с принимающей жидкостью, так же как это происходит в процессе отрыва капли от перемычки [15]. Возмущения формы в верхней части капли на рис. 5а и 5б малоподвижны ( $t = 0$  при соприкосновении кромки капли с принимающей жидкостью).

С началом слияния жидкостей вся поверхность сравнительно медленно движущейся капли покрывается кольцевыми нерегулярными волнами (рис. 5в, длина волны  $\lambda_d = 0.65$  мм), в той же фазе процесса тыльная поверхность первичной капли остается гладкой. Постепенно интенсивность внутренних мелкомасштабных возмущений увеличивается и, как следствие, уменьшается длина и возрастают амплитуды кольцевых волн, фазовые поверхности которых разрываются на отдельные участки (рис. 5г  $\lambda_d = 0.48$  мм). Поверхность капли покрывается разделенными шипами (темные точки на рис. 5д,  $\lambda_d = 0.43$  мм), постепенно распространяющимися к вершине капли (рис. 5е,  $\lambda_d = 0.43$  мм). По мере погружения капли высота возмущений растет, поперечный размер уменьшается (рис. 5ж и 5з,  $\lambda_d = 0.3$  мм).

В целом характерные скорости таких микротечений достигают нескольких метров в секунду, характерные размеры – от 0.03 до 0.15 см, периоды – от 0.5 до 1.5 мс. Общая продолжительность существования структуры – от 30 до 50 мс определяется механизмами



**Рис. 4.** Временная изменчивость главного масштаба микровозмущений  $\lambda(t)$  – (а) на фронтальном изображении поверхности формирующегося всплеска ( $D = 0.5$  см,  $H = 70$  см,  $U = 310$  см/с); (б) – фотография, шкалы – в мм, (в) – распределение нормированной освещенности  $I(r)$  вдоль выделенной окружности, (г) – спектр масштабов  $S(\lambda)$  при  $t = 52$  мс.

перестройки общей картины течения. На всех этапах существования область локализации тонких структур остается ограниченной контуром основания восходящего всплеска.

Истончение отдельных выступов и увеличение их высоты указывает на существование интенсивных мелкомасштабных течений в толще капли, скорость которых увеличивается по мере погружения капли, сокращения площади свободной поверхности  $S_d$  и освобождения доступной потенциальной поверхностной энергии капли (приращение свободной энергии пропорционально приращению площади свободной поверхности  $dF = \sigma dS_d$ , изменение потенциала Гиббса зависит от коэффициента поверхностного натяжения  $dG = -S_d d\sigma$ ).

Геометрия поверхности отражает существование сложных процессов трансформации крупных течений в мелкомасштабные и наоборот, обусловленных пространственной неоднородностью распределения термодинамических потенциалов в жидкости и выделенностью тонкого приповерхностного слоя, плотность энергии в кото-

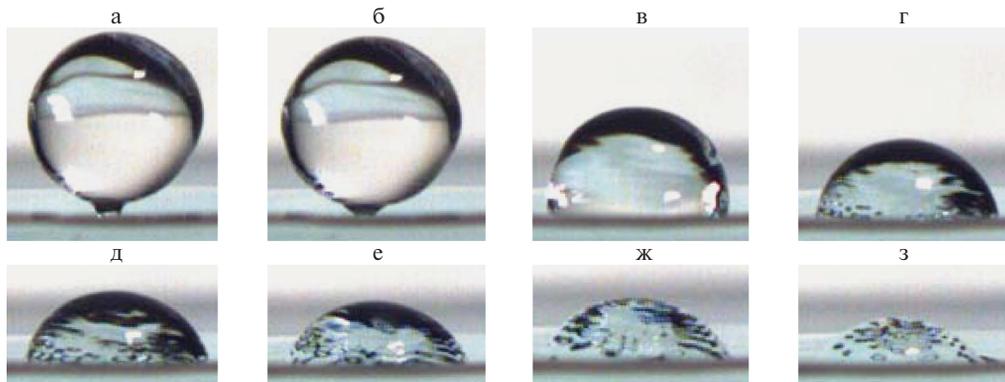


Рис. 5. Короткие капиллярные волны на поверхности погружающейся вторичной капли на вершине всплеска (высота  $D_h = 0.84$  см и ширина  $D_v = 0.81$  см):  $t = -0.4, 0.0, 2.0, 6.2, 8.7, 9.1, 9.9, 10.7, 11.6$  мс (а)–(з).

ром больше, чем в толще жидкости, вследствие анизотропии атомно-молекулярных взаимодействий. Процессы с масштабами толщины приповерхностного слоя характеризуются высокой плотностью энергии, необходимой для реструктуризации картины течений. Их роль, как и процессов передачи и трансформации энергии между всеми компонентами течений, нуждается в более детальном теоретическом и экспериментальном изучении.

**3. Обсуждение результатов.** Высокая пространственно-временная разрешающая способность аппаратуры впервые позволила зарегистрировать и определить размеры короткоживущих тонкоструктурных компонентов возмущений поверхности в процессе образования всплеска, создаваемого упавшей каплей, когда контактируют одинаковые жидкости (в проведенных опытах капли воды свободно падали в воду). Наблюдаемые структуры отражают существование тонких течений и сложность распределения поля скоростей в толще жидкости. Традиционные методики регистрации капельных течений [1, 2] не позволяют изучать геометрию быстро эволюционирующих процессов вследствие недостаточности временного или пространственного разрешения даже при высоком временном разрешении при сверхскоростной съемке [3].

Необходимость согласованного повышения и пространственного и временного разрешения регистрирующих инструментов ранее неоднократно отмечалась в гидродинамике, в частности при изучении трансзвуковых течений [13], где длительность выдержки при фоторегистрации определяет условия идентификации тонких поперечных структур в потоке газа – “коротких волн” С.А. Христиановича [16, 17], а также тонких прослоек и нитей в более медленных стратифицированных течениях [18].

Формирование тонких компонентов структур течений, в данных опытах дополняющих ранее изучаемые более крупномасштабные – каверну, венец, капиллярные волны, обусловлено неоднородностью пространственного распределения полной энергии в жидкости со свободной поверхностью. Поперечные размеры элементов структуры определяются геометрией областей локализации высокой плотности внутренней энергии, а также характерной скоростью передачи энергии, которая может быть достаточно большой на малых масштабах.

Характерные пространственно-временные масштабы тонких компонентов течений необходимо учитывать при разработке методики опытов с каплями в части выбора регистрируемых параметров, пространственной и временной разрешающей способности аппаратуры и алгоритмов преобразования первичных данных.

**Заключение.** Методом высокоразрешающей фото- и видеорегистрации впервые визуализирован процесс перестройки гладкой поверхности жидкости и формирования ее тонкой структуры в центре каверны, образованной свободно падающей каплей во-

ды в воду, и на оголовке растущего всплеска. Характерные скорости таких микротечений достигают нескольких метров в секунду, размеры – от 0.03 до 0.15 см, общая продолжительность существования структуры – от 30 до 50 мс.

Локализованные области мелкомасштабных флуктуаций давления, искажающих форму свободной поверхности, отображают картину возникающих тонких приповерхностных течений.

Факт существования тонких течений в разных фазах процесса погружения капли, растекания, образования каверны и всплеска отражает многомасштабность процессов обмена между компонентами полной энергии – кинетической энергии течений, потенциальной и внутренней энергии, включающей потенциальную поверхностную энергию.

Автор благодарен В.Е. Прохорову за помощь в проведении опытов и стимулирующие обсуждения. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 19-19-00598). Эксперименты проведены на стенде ЭСП, входящем в Гидрофизический комплекс для моделирования гидродинамических процессов (УИУ “ГФК ИПМех РАН”).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Worthington A.M.* The Splash of the Drop. New York: E. & J.B. Young & Co, 1895. 118 p.
2. *Edgerton H.E., Killian J.R.* Moments of Vision: The Stroboscopic Revolution in Photography. Cambridge: MIT Press, 1984. 177 p.
3. *Thoroddsen S.T., Etoh T.G., Takehara K.* High-Speed imaging of drops and bubbles // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2008. V. 40. P. 257–285.
4. *Zhang L.V., Toole J., Fezzaa K., Deegan R.D.* Evolution of the ejecta sheet from the impact of a drop with a deep pool // *J. Fluid Mech.* 2012. V. 690. P. 5–15.
5. *Fitt B.D.L., McCartney H.A., Walkalate P.* The role of rain in dispersal of pathogen inoculum // *Ann. Rev. Phytopathol.* 1989. V. 27. P. 241–270.
6. *Prosperetti A., Oguz H.N.* The impact of drops on liquid surfaces and the underwater noise of rain // *Ann. Rev. Fluid Mech.* 1993. V. 25. № 1. P. 577–602.
7. *Vjorno L.*, Underwater rain noise: sources, spectra and interpretations // *J. de Physique IV. Colloque C5. Supplement de J. de Physique.* 1994. V. 3. № 4. C5-1023–C5-1029.
8. *Прохоров В.Е., Чашечкин Ю.Д.* Генерация звука при падении капли на поверхность воды // *Акустич. ж.* 2011. Т. 57. № 6. С. 792–803.
9. *Чашечкин Ю.Д., Прохоров В.Е.* Акустика и гидродинамика удара капли о водную поверхность // *Акустич. ж.* 2017. Т. 63. № 1. С. 38–49.
10. *Cole D.* The splashing morphology of liquid-liquid impact. PhD Thesis. James Cook Univ., Australia, 2007. 302 p.
11. *Ильиных А.Ю., Чашечкин Ю.Д.* Гидродинамика контакта падающей капли со свободной поверхностью жидкости // *Изв. РАН МЖГ.* 2016. № 2. С. 3–12.
12. *Ильиных А.Ю., Чашечкин Ю.Д.* Гидродинамика погружающейся капли: линейчатые структуры на поверхности венца // *Изв. РАН МЖГ.* 2017. № 2. С. 152–165.
13. *Ван-Дайк М.* Альбом течений жидкости и газа. Москва: Мир, 1986. 181 с.
14. Гидрофизический комплекс для моделирования гидродинамических процессов в окружающей среде и их воздействия на подводные технические объекты, а также распространения примесей в океане и атмосфере. УИУ “ГФК ИПМех РАН”. 2018. <http://www.ipmnet.ru/uniquequip/gfk/#aboutESP>.
15. *Чашечкин Ю.Д., Прохоров В.Е.* Трансформации перемычки в процессе отрыва капли // *ПМТФ.* 2016. № 3. С. 16–31.
16. *Серебряйский Я.М., Христианович С.А.* О волновом сопротивлении // *Труды ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского.* Москва: БНТ НКАП, 1944. Вып. 550. С. 18.
17. *Гриб А.А., Рыжов О.С., Христианович С.А.* Об отражении плоской ударной волны в воде от свободной поверхности // *ПММ.* 1956. Т. 20. № 4. С. 532–541.
18. *Chashechkin Y.D., Zagumennyi I.V.* Formation of waves, vortices and ligaments in 2D stratified flows around obstacles // *Physica Scripta.* 2019. V. 94. № 5. P. 1–19.

## Visualization of the Fine Structure of Perturbations of the Liquid Surface by Flows, Induced by a Drop Impact

Yu. D. Chashechkin<sup>a, #</sup>

<sup>a</sup> *Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russia*

<sup>#</sup> *e-mail: chakin@ipmnet.ru*

The fine structure of the flows in the center of the cavity and on the tip of the growing splash, which disturb the smooth surface of the liquid after the crown falls, was studied using the methods of high-resolution photo- and video recording. The surface geometry reflects the complexity of the pattern of fine flows in the adjacent fluid. The geometrical parameters of the structure formed by smooth spikes separated by thin depressions are determined. The formation of structures is associated with the action of various exchange mechanisms between the kinetic, potential and internal energy in a fluid with a free surface.

*Keywords:* liquid, drop, cavity, splash, structure, energy

### REFERENCES

1. *Worthington A.M.* The Splash of the Drop, New York: E. & J.B. Young & Co, 1895. 118 p.
2. *Edgerton H.E., Killian J.R.* Moments of Vision: The Stroboscopic Revolution in Photography, Cambridge: MIT Press, 1984. 177 p.
3. *Thoroddsen S.T., Etoh T.G., Takehara K.* High-Speed imaging of drops and bubbles // *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 2008, vol. 40, pp. 257–285.
4. *Zhang L.V., Toole J., Fezzaa K., Deegan R.D.* Evolution of the ejecta sheet from the impact of a drop with a deep pool // *J. Fluid Mech.*, 2012, vol. 690, pp. 5–15.
5. *Fitt B.D.L., McCartney H.A., Walkalate P.* The role of rain in dispersal of pathogen inoculum // *Ann. Rev. Phytopathol.*, 1989, vol. 27, pp. 241–270.
6. *Prosperetti A., Oguz H.N.* The impact of drops on liquid surfaces and the underwater noise of rain // *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 1993, vol. 25, no. 1, pp. 577–602.
7. *Bjorno L.* Underwater rain noise: sources, spectra and interpretations // *J. De Physique IV. Colloque C5, Supplement de J. De Physique*, 1994, vol. 3, no. 4, pp. C5-1023–C5-1029.
8. *Prokhorov V.E., Chashechkin Yu.D.* Sound generation as a drop falls on a water surface // *Acoust. Phys.*, 2011, vol. 57, no. 6, pp. 807–818.
9. *Chashechkin Yu.D., Prokhorov V.E.* Acoustics and hydrodynamics of a drop impact on a water surface // *Acoust. Phys.*, 2017, vol. 63, no. 1, pp. 33–44.
10. *Cole D.* The splashing morphology of liquid-liquid impact. PhD Thesis, James Cook Univ., Australia, 2007. 302 p.
11. *Ilynykh A.Yu., Chashechkin Yu.D.* Hydrodynamics of a falling drop of contact with the free surface of the liquid // *Fluid Dyn.*, 2016, vol. 51 no. 2, pp. 127–135.
12. *Ilynykh A.Yu., Chashechkin Yu.D.* Hydrodynamics of a submerging drop: lined structures on the crown surface // *Fluid Dyn.*, 2017, vol. 52, no. 2, pp. 309–320.
13. *Van Dyke M.* An Album of Fluid Motion. Stanford: The Parabolic Press, 1988. 181 p.
14. Hydrophysical complex for modeling hydrodynamic processes in the environment and their impact on underwater technical objects, as well as the distribution of impurities in the ocean and atmosphere (UEF “HPC IPMech RAS) (Gidrofuzicheskii kompleks dlya modelirovaniya gidrodinamicheskikh pricessov v okruzhayushchei srede I ikh vozdeistviya na podvodnye tekhnicheskije ob’ekty, a takzhe na rasprostranenie primesei v okeane I atmosphere), 2018.  
<http://www.ipmnet.ru/uniquequip/gfk/#aboutESP> (in Russian)
15. *Chashechkin Yu.D., Prokhorov V.E.* Transformation of the bridge during separation of a droplet // *J. Appl. Mech. Techn. Phys.*, 2016, vol. 57, no. 3, pp. 402–415.
16. *Serebriysky Ya.M., Khristianovich S.A.* On Wave Drag (O volnovom soprotivlenii) // *Proc. Zhukovskiy TsAGI*, 1944, no. 550, 18 p. (in Russian)
17. *Grib A.A., Ryzhov O.S., Khristianovich S.A.* On the reflection of a plane shock wave in water from the free surface (Ob otrazhenii ploskoi udarnoi volny v vofe ot svobodnoi poverkhnosti) // *Prikl. Mat. Mekh.*, 1956, vol. 20, no. 4, pp. 532–541. (in Russian)
18. *Chashechkin Y.D., Zagumennyi I.V.* Formation of waves, vortices and ligaments in 2D stratified flows around obstacles // *Physica Scripta*, 2019, vol. 94, no. 5, pp. 1–19.