

**ПАКЕТЫ КАПИЛЛЯРНЫХ И АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН
ИМПАКТА КАПЛИ**

Ю.Д. Чашечкин

chakin@ipmnet.ru
yulidch@gmail.com

ИПМех РАН, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Течения, капиллярные волны и акустические сигналы, порожденные упавшей в бассейн с частично дегазированной жидкостью каплей воды, зарегистрированы высокоскоростной видеокамерой, гидрофоном и микрофоном. Проведен масштабный анализ системы уравнений. Прослежена быстрая конверсия доступной потенциальной поверхностной энергии. Преобразованная энергия сохраняется в тонком слое в окрестности слившихся поверхностей, где создает большие возмущения температуры, давления и скорости течений. Капиллярные волны начинают излучаться одновременно с формированием каверны и возвышением венца. Новые группы капиллярных волн возникают при всех изменениях структуры течения — формировании и погружении всплеска, возвращении вторичных капель, развитии каверн, погружении стримера и капелек. Одновременно с волнами формируются тонкие приповерхностные течения — лигаменты, влияющие на перенос и разрыв газовых полостей. Тонкие течения быстро затухают и образуются вновь при падении ранее выброшенных капель и генерации новой группы капиллярных волн. Сопоставление картин течений и акустических сигналов указывает, что генерация резонансных звуковых пакетов синхронизована с отрывом газовых полостей от каверны или с их разрывом на фрагменты. Длительность и спектр акустических пакетов зависят от начальной угловой геометрии звучащей полости, постепенно трансформирующейся в гладкую сфероидальную

Ключевые слова

Капля, каверна, всплеск, капиллярные волны, звуковые волны, лигаменты, конверсия энергии

Поступила 24.03.2020

Принята 26.05.2020

© Автор(ы), 2021

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект РФФ №19-19-00598)

Введение. Импакт упавшей капли — последовательность атомно-молекулярных, гидродинамических и акустических процессов в принимающей жидкости — активно изучается экспериментально, теоретически, а в по-

следние годы и численно. Интерес обусловлен фундаментальностью темы и широким кругом приложений во многих отраслях промышленности — химической, биохимической, металлургической, в энергетике — в двигателях внутреннего сгорания и реактивных двигателях, а также в медицине. Акустика и художественные образы капельных течений служат источником вдохновения для музыкантов, поэтов, скульпторов и ювелиров с античных времен. Систематические исследования гидродинамики импакта капли начались в конце XIX в., звук импакта капли был зарегистрирован в воздухе, а с изобретением гидрофонов — и в толще жидкости [1].

Капельные течения и акустические сигналы активно изучаются и экспериментально [2], и теоретически [3, 4]. Создание интерфейсов — устройств синхронизации разнородных сигналов — позволило одновременно регистрировать видеоизображения течений и звуковые пакеты импакта капель в воде или воздухе [5]. Механизм возбуждения колебаний газового пузырька ударом быстро втягивающегося остатка воздушного канала, который связывает газовый фрагмент с основным объемом, отслежен методом скоростной видеорегистрации [6].

В дополнение к кольцевым капиллярным волнам вокруг растущего венца [7] визуализированы волны, сбегаящие с его кромки к центру каверны [8] и системы поверхностных шипов неволновой природы [9].

На практике системы фундаментальных уравнений [10], включающие в себя уравнения состояния для термодинамических потенциалов и их производных (в частности, плотности [11]), при описании различных волн (звуковых, капиллярных, гравитационных или инерционных) существенно упрощаются, их ранг и порядки линейных версий понижаются [12]. В то же время полные периодические решения систем уравнений, учитывающих действие диссипативных процессов — вязкости, температуропроводности и диффузии, которые находятся с учетом условия совместности, имеют более сложный вид. Они включают и волны, и семейства лигаментов — математические образы наборов тонких компонентов течений [12, 13].

Волна — крупномасштабная составляющая периодического процесса, в котором параметры *локальной* временной изменчивости (частота ω) и *мгновенной* пространственной структуры физических полей (волновое число \mathbf{k} или длина волны λ) связаны дисперсионным соотношением $\omega = \omega(k, \mathbf{A}\mathbf{k}, \mathbf{k}^2 \dots)$, включающим в себя и амплитуды возмущений \mathbf{A} . Волны описываются регулярно возмущенными решениями фундаментальной системы [12, 13].

Лигаменты — тонкие протяженные компоненты течений, поперечные масштабы δ которых определяются диссипативными свойствами среды (коэффициентами кинематической вязкости ν , температуропроводности κ_T или диффузии κ) и характерными параметрами временной изменчивости: в переходных режимах $\delta_\Delta^v = \sqrt{\nu \Delta T}$ — длительностью установления ΔT ; в периодических $\delta_\omega^v = \sqrt{\nu / \omega}$, $\delta_\omega^\kappa = \sqrt{\kappa / \omega}$ — частотой волны ω ; в стационарных течениях $\delta_U^v = \nu / U$, $\delta_U^\kappa = \kappa / U$ — скоростью U . Лигаменты, образующие тонкую структуру в форме оболочек, прослоек и волокон, существуют во всех видах течений — нестационарных, волновых или установившихся. Они описываются сингулярно возмущенными решениями фундаментальной системы [13].

Многокомпонентность реальных жидкостей, отраженная в сложности уравнений состояния [11], высокий ранг системы фундаментальных уравнений механики [10, 12] объясняют одновременное сосуществование несколько видов лигаментов — элементов тонкой структуры и медленных и быстрых течений. В силу природы лигаменты напрямую связывают атомно-молекулярные процессы на границах сред и в толще жидкости с термо- и гидродинамикой.

Лигаменты начинают формироваться одновременно с началом развития любого возмущения в жидкости. При этом их толщина увеличивается от размеров молекулярного кластера до масштаба наблюдаемых прослоек. В капельных течениях лигаменты проявляются в форме тонких волокон в распределении вещества окрашенной капли [14] в чистой принимающей жидкости. Время, необходимое для формирования волны, превышает ее период $\Delta t > 2\pi / \omega$.

В силу сложности внутренней структуры, обусловленной множественностью сосуществующих структурных компонентов с произвольными соотношениями масштабов, все течения нестационарны и не имеют стационарного предела. В настоящей работе проведена синхронная регистрация картин течений и акустических сигналов в воздушной и водной средах, впервые прослежено влияние тонких течений, сопутствующих капиллярным волнам, на образование газовых полостей и генерацию звуковых пакетов.

Собственные масштабы капельных течений. Свойства жидкости задаются уравнением состояния [11]. Динамика течений описывается системой уравнений Навье — Стокса с физически обоснованными начальными и граничными условиями [10, 12], которые здесь для краткости не приведены.

Физические параметры задачи: плотность воздуха ρ_a и плотность воды ρ_d (далее $\rho_{a,d}$); кинематическая ($\nu_{a,d}$) и динамическая ($\mu_{a,d}$) вязкости сред; полный (σ_d^a) и нормированный на плотность жидкости ($\gamma = \sigma_d^a / \rho_d$, $\text{см}^3/\text{с}^2$) коэффициент поверхностного натяжения. Условия экспериментов: ускорение свободного падения g ; эквивалентный диаметр D ; площадь поверхности S_d ; объем V ; масса M ; высота падения H ; скорость капли U в момент первичного контакта; доступная потенциальная поверхностная энергия $E_\sigma = \sigma S_d$ и кинетическая энергия $E_d = MU^2/2$. Доля энергии E_σ , распределенная в приповерхностном шаровом слое толщиной порядка размера молекулярного кластера $\delta_\sigma \sim 10^{-6}$ см и массой M_σ в условиях экспериментов, составляет около 1 % кинетической энергии капли E_d . Однако ее плотность существенно выше $R_w = E_\sigma M / E_d M_\sigma \sim 1000$. Процессы преобразования поверхностной потенциальной энергии в другие формы играют определяющую роль в формировании тонких течений.

Физические параметры определяют масштабы длины, включающие в себя капиллярно-гравитационный параметр $\delta_g^\gamma = \sqrt{\gamma/g}$, входящий в дисперсионное уравнение коротких поверхностных волн [10], диссипативно-капиллярные $\delta_\gamma^\nu = \nu^2/\gamma$, $\delta_\gamma^\kappa = \kappa^2/\gamma$, капиллярный $\delta_U^\gamma = \gamma/U^2$ и прандтлевы масштабы $\delta_U^\nu = \nu/U$ и $\delta_U^\kappa = \kappa/U$. В группы временных масштабов входят параметры среды $\tau_g^\gamma = \sqrt[4]{\gamma/g^3}$, $\tau_\gamma^\kappa = \kappa^3/\gamma^2$, $\tau_\gamma^\nu = \nu^3/\gamma^2$, размер $\tau_\gamma^d = \sqrt{D^3/\gamma}$, $\tau_k^\gamma = \kappa D/\gamma$, $\tau_v^\gamma = \nu D/\gamma$ и скорость капли $\tau_U^d = D/U$, $\tau_g^U = U/g$.

Частоты капиллярных (ω_c) и акустических (ω_s) волн связаны с волновыми векторами и длинами соответствующих волн $\lambda_c = 2\pi/k_c$, $\lambda_s = 2\pi/k_s$ дисперсионными соотношениями $\omega_c^2 = gk_c + \gamma k_c^3$ и $\omega_s^2 = c_s^2 k_s^2$, c_s — скорость звука [10].

Отношения однородных масштабов образуют числа Рейнольдса $Re = UD/\nu$, Фруда $Fr_d = U^2/(gD)$; Бонда $Bo = D^2/(\delta_g^\gamma)^2 = gD^2/\gamma$; Онезорге $Oh = \sqrt{\delta_\gamma^\nu/D} = \nu/\sqrt{\gamma D}$; Вебера $We = U^2 D/\gamma$.

Линейные масштабы в этих экспериментах лежат в диапазоне $10^{-6} \dots 160$ см, временные — $10^{-10} \dots 10^{-2}$ с. Верхние границы соответствуют макроскопическим процессам, а нижние — атомно-молекулярным (размер кластера молекул воды порядка $10^{-7} \dots 10^{-6}$, см. [15]). Масштабы

определяют размеры поля наблюдения, пространственную и временную разрешающую способность инструментов. Большие диапазоны масштабов указывают на проявления в капельных течениях и медленных диссипативных, и механических, и быстрых атомно-молекулярных процессов, осуществляющих освобождение доступной потенциальной поверхностной и других компонентов внутренней энергии [16].

Энергетика импакта капли. Анизотропия атомно-молекулярных взаимодействий на границах контакта сред обуславливает различия термодинамических потенциалов, в частности, свободной энтальпии — потенциала Гиббса G на поверхности и толще жидкости, где его дифференциал dG равен [10, 16]

$$dG_f = -sdT + VdP.$$

Здесь s — энтропия; T — температура; $V = 1/\rho$ — удельный объем; P — давление, которые определяются как производные термодинамических потенциалов [11].

Экспериментально установлено, что плотность и другие характеристики среды в толще жидкости и в структурно выделенном приповерхностном слое толщиной порядка размера молекулярного кластера ($\delta_\sigma \sim 10^{-6}$ см) заметно отличаются [17, 18]. Степень анизотропии атомно-молекулярных взаимодействий проявляется в значениях доступной потенциальной поверхностной энергии, химической и других видов внутренней энергии, которая может трансформироваться в тепловую, механическую энергию течений жидкости и в работу по созданию новой свободной поверхности. Дифференциал потенциала Гиббса в приповерхностном слое толщиной порядка размера молекулярного кластера δ_σ имеет вид [16]:

$$dG_\sigma = -sdT + VdP - S_\sigma d\sigma.$$

Еще большие изменения атомно-молекулярного строения вещества наблюдаются непосредственно на границе жидкость–газ, где вода распадается на ионные кластеры [15, 17, 18]. Здесь в слое толщиной несколько молекулярных размеров $\delta_s \sim 10^{-7}$ см в термодинамический потенциал входят члены, зависящие от химического потенциала μ_n и дифференциала концентрации компонентов dN_n :

$$dG_s = -sdT + VdP - S_b d\sigma + \mu_n dN_n.$$

Схема распределения термодинамических потенциалов в жидкости показана на рис. 1. При слиянии подлетающей капли с принимающей жидкостью со скоростью $U \sim 1$ м/с границы уничтожаются за время

около $\tau_s \sim 10^{-10}$ с, а приповерхностные слои — за $\tau_\sigma \sim 10^{-8}$ с. При уничтожении свободной поверхности доступная потенциальная поверхностная энергия $G_s - G_f$ и $G_\sigma - G_f$, которая преобразуется в возмущения температуры, давления и энергию механического движения, остается в тонком двойном энергонасыщенном слое (ДЭНС) толщиной примерно δ_σ (слой IV на рис. 1, б, где в выражении для термодинамического потенциала dG_{IV} отсутствуют слагаемые $-S_b d\sigma + \mu_n dN_n$). Толщина двойного слоя медленно растет под действием процессов молекулярной диффузии вещества и импульса.

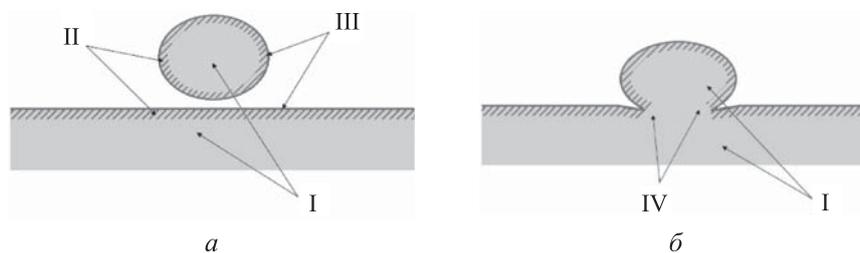


Рис. 1. Распределение свободной энтальпии в приближающейся капле (а) и в процессе слияния (б):

I — толща жидкости с потенциалом Гиббса G_f ; II — приповерхностный слой с потенциалом Гиббса G_σ ; III — контактная поверхность с потенциалом Гиббса G_s ; IV — слой, для которого в выражении для термодинамического потенциала dG_{IV} отсутствуют слагаемые $-S_b d\sigma + \mu_n dN_n$

Начало погружения капли инициирует в принимающей жидкости процесс формирования и деградации тонкого двойного слоя, в котором чередуются волокна, состоящие из жидкостей капли или принимающей среды [19]. Окрашенные волокна подходят к спайкам — тонким струйкам, с вершин которых выбрасываются мелкие капельки. Далее с принимающей жидкостью начинает сливаться ядро капли, при этом за время около $\tau_d \sim 10^{-3}$ с в принимающую жидкость передается кинетическая энергия капли E_d . При этом последовательно формируются каверна, выступающий венец с системой стримеров, всплеск (кумулятивная струя), новые каверны, стримеры, газовые пузыри, капиллярные волны и звуковые пакеты [1, 6, 9, 14]. После затухания быстрых процессов в жидкости остается каскад вихревых колец, медленно расплывающихся под действием молекулярной диффузии.

Из проведенного анализа следует, что в процессе эволюции капельных течений действуют несколько механизмов передачи энергии: вначале наиболее быстрый атомно-молекулярный при слиянии приповерхност-

ных слоев, затем более медленный — с течениями жидкости и групповой скоростью распространяющихся капиллярных или звуковых волн, а на последних стадиях — наиболее медленный диффузионный механизм.

Методика экспериментов. Эксперименты выполнены на стенде ЭСП* УИУ «ГФК ИПМех РАН» [20]. Основа стенда (рис. 2) — прозрачный бассейн размерами $1,5 \times 0,4 \times 0,6 \text{ м}^3$ с оптическими иллюминаторами для работы с теневым прибором ИАБ-451. В бассейн погружен измерительный гидрофон (полоса $0,002 \dots 100 \text{ кГц}$, чувствительность 30 мВ/Па).

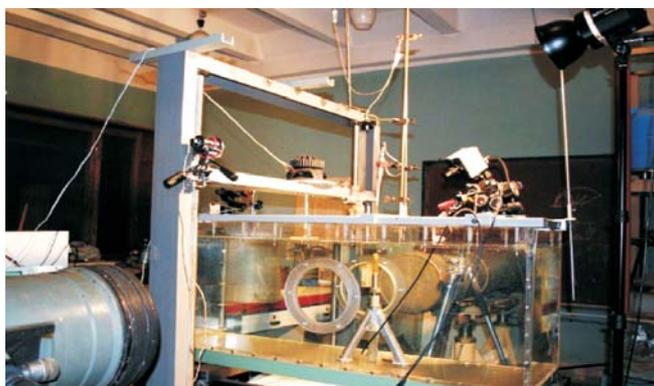


Рис. 2. Стенд ЭСП для изучения гидродинамики и акустики импакта капли

Над бассейном размещен микрофон, осветительные прожектора *ReyLab Xenos RH-1000* мощностью 1 кВт и светодиодные источники *Optronis MultiLED* со световым потоком 7700 лм . Высота установки дозатора капель относительно спокойной поверхности изменялась от 6 до 94 см . Регистрация течений проводилась высокоскоростными видеокамерами *Optronis CR3000x2* и *FastCam 1024PCI*. Управление экспериментом, сбор и передача данных в компьютер осуществлялись через интерфейс синхронизации сигналов с видеокамер, микрофона, гидрофона с погрешностью до 10^{-7} с (число каналов 4 , разрядность 12 , тактовая частота 10 МГц). Для автоматического определения размеров изучаемых объектов регистрировался калиброванный маркер.

Бассейн и дозатор капель заполнялись частично дегазированной водопроводной водой. В экспериментах падающая капля прерывала фото-

* Эксперименты проведены на стенде ЭСП, входящем в Гидрофизический комплекс для моделирования гидродинамических процессов в окружающей среде и их воздействия на подводные технические объекты, а также распространения примесей в океане и атмосфере («ГФК ИПМех РАН»).

затвор, сигнал которого с регулируемой задержкой запускал интерфейс и компьютер для записи сигналов. Полученные данные обрабатывались по специализированным математическим программам.

Основные результаты. Эволюцию картины капиллярных волн на свободной поверхности, вызванных погружением капли диаметром $D = 0,6$ см со скоростью $U = 3,7$ м/с, иллюстрируют кадры видеофильма (рис. 3). В центре картины возмущений (рис. 3, а) при $t = 5,0$ мс находится дно каверны, окруженной венцом. К изрезанной внешней кромке венца примыкают редкие струйки — шипы длиной 4...5 мм, продолжения тонких лигаментов, формирующихся в двойном слое на дне каверны, где сливаются жидкости и уничтожается свободная поверхность. Окрашенные волокна лигаментов, разделенные прослойками с чистой водой, наблюдались при погружении капли чернил [19] и в последующих фазах эволюции течений [14]. Вылетающие с вершин шипов капельки диаметром 0,3...0,6 мм группируются в нескольких кольцевых зонах, разделенных пустыми промежутками. Группирование капелек — свидетельство глобальных осцилляций верхней кромки венца и выступающих зубцов.

Группа светлых пятнышек на изображении гидрофона (см. рис. 3, а) — каустики, участки зеркального отражения света точечных источников от боковых поверхностей коротких капиллярных волн, создаваемых стенкой венца. Их амплитуда недостаточна для наблюдения волны по форме свободной поверхности. Из сравнения вида каустик (см. рис. 3, а и б) следует, что число и размер пятен, размер области их локализации, которые определяются числом, длиной, амплитудой и скоростью c_c капиллярных волн, увеличиваются со временем. Длина коротких волн составляет $\lambda_c = 0,5$ мм и постепенно увеличивается до $\lambda_c = 2$ мм. Согласно положению каустик в правом нижнем углу изображения, внешние капиллярные волны при $t = 26,1$ мс выходят из кадра. С вершин струек и зубцов венца выбрасываются все более крупные капельки.

Со временем поверхность жидкости выравнивается, зубцы венца втягиваются (рис. 3, в). Капиллярные волны покрывают дно и стенки каверны, кромку, внутреннюю и внешнюю стенки венца, окружающую жидкость [7, 8]. Волны дополняют лигаменты — тонкие подповерхностные течения [9, 12]. Гребни кольцевых капиллярных волн промодулированы (на венце с шагом $\lambda_m = 0,41; 2,4; 1,91; 1,56$ мм, внутри каверны с $\lambda_m = 1,15$ мм). С удалением от венца масштаб модуляции возрастает.

Далее растекающийся венец и коллапсирующая каверна сменяются растущим всплеском (кумулятивной стружкой [1]), вершина которой

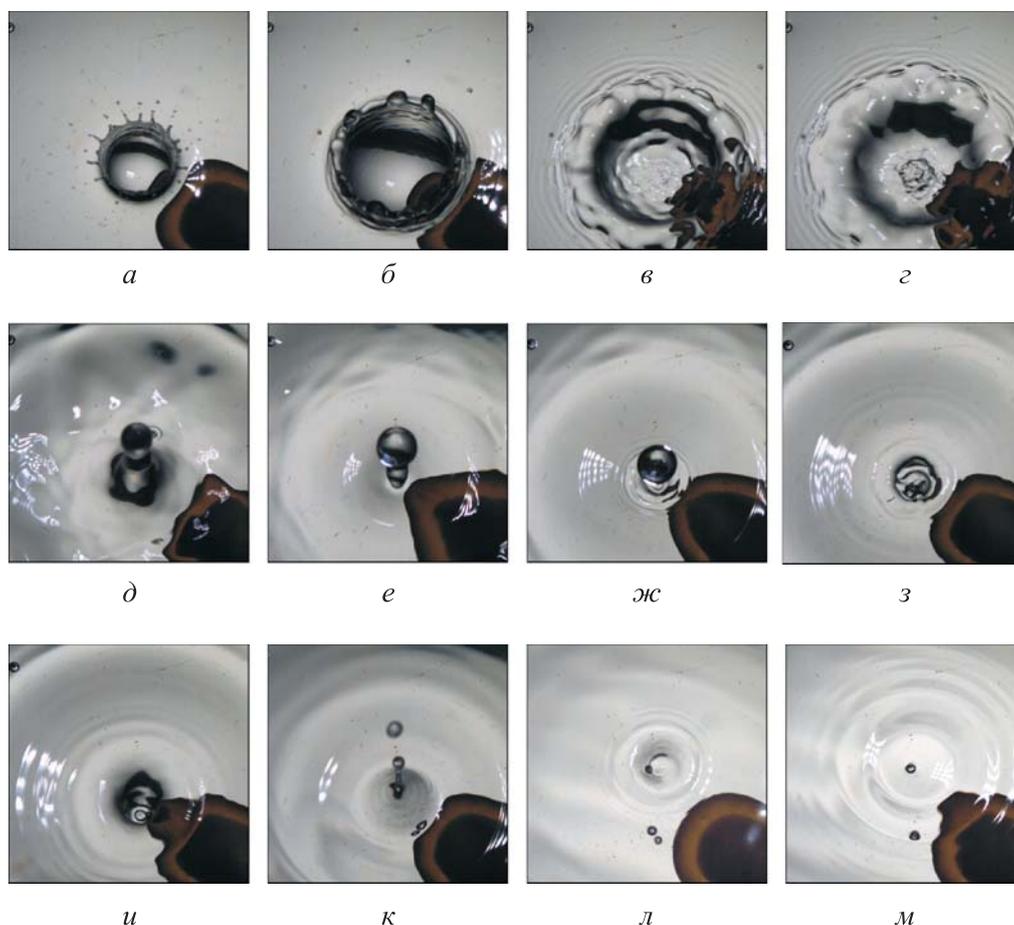


Рис. 3. Капиллярные волны импакта капли:

a–m — $t = 5,0; 26,2; 45,2; 47,7; 97,5; 145,7; 169,0; 190,7; 209,0; 237,2; 434,4; 460,9$ мс
 ($D = 0,6$ см, $U = 3,7$ м/с, $We = 1125$, $Re = 22\ 200$, $Fr = 233$, $Oh = 0,0015$, $Bo = 4,8$)

покрыта шипами и трещинами [9]. Картина течения быстро меняется, тонкие возмущения на вершине всплеска «всплывают» из глубины и погружаются. Парадоксальное появление тонких шипов на поверхности с выглаженными первоначальными возмущениями на рис. 3, *г* ($t = 47,7$ мс) указывает на существование в толще жидкости слоя с быстрыми тонкими течениями. Слой вызывает мелкомасштабную деформацию поверхности, на которую его выносят крупномасштабные гравитационно-капиллярные течения [9].

По мере роста всплеска, включающего в себя коническое основание, цилиндрическую центральную часть и сферическую вершину, поверх-

ность остатка каверны выглаживается (рис. 3, *д*). Внутренняя граница группы кольцевых капиллярных волн выходит за пределы области наблюдения. Небольшая каверна позади всплеска — след погружения капельки, ранее выброшенной с кромки венца.

Постепенно большая часть всплеска перетекает в центральную каплю, диаметр которой составляет $d_s = 9,74$ мм при $t = 145,7$ мс. Скорость поступления жидкости во всплеск снижается, его коническое основание истончается (диаметр $D_s = 2,28$ мм), и всплеск начинает погружаться. При этом возникает новая группа коротких капиллярных волн малой амплитуды (кольцевые каустики, рис. 3, *е* справа).

За время $\Delta t = 23,3$ мс между соседними выборками всплеск отрывается от медленно падающей капли диаметром $d_s = 0,92$ см и полностью погружается с образованием конической каверны, стенки которой деформированы капиллярными волнами. Погружающаяся капля соприкасается только с отдельными участками гребней, впадины капиллярных волн перекрываются и образуют несколько газовых полостей (рис. 3, *з*). Формирование и отрыв полостей в интервале $160 < t < 220$ мс сопровождаются излучением звуковых пакетов [6]. Одновременно возникают новые кольцевые капиллярные волны.

По мере затухания тонких течений и заполнения каверны мелкомасштабные возмущения сглаживаются, вокруг воронки формируется гладкая кольцевая область, внутренний диаметр которой в соответствии с дисперсионным соотношением [10] определяется минимальной групповой скоростью гравитационно-капиллярных волн $c_{\min} = (4g\gamma)^{1/4} = 23,2$ см/с, длина, волновое число и частота которых равны $\lambda^* = 2\pi/k^* = 1,72$ см, $k_{\min} = \sqrt{g/\gamma}$ 1/см, $f = (4g^3/\gamma)^{1/4} / (2\pi) = 13,48$ Гц. В центре течения остается коническая впадина с двумя газовыми полостями (рис. 3, *и*).

При смыкании стенок конической каверны в воздух вертикально вылетает быстрая тонкая струйка — стример — с капелькой на вершине (рис. 3, *к*). Над стримером располагается ранее оторвавшаяся капелька диаметром $D_d = 3,2$ мм. Струйка опирается на конический пьедестал с диаметром основания $d_p = 7,6$ мм. Движущийся вверх стример отделяется от осциллирующей поверхности жидкости, в которой образуется впадина на месте пьедестала (рис. 3, *л*). Падающие под действием силы тяжести капельки формируют в жидкости мелкие каверны, окруженные группами расходящихся кольцевых волн, коротких в центре и более длинных на периферии течения, и новые газовые пузырьки.

Газовая полость в каверне диаметром окружности $D_c = 14,96$ мм по центру венца и с основанием $D_c = 5,08$ мм при $t = 434,4$ мс трансформируется в эллиптический пузырь с размерами осей $2,28 \times 1,61$ мм (см. рис. 3, л). В процессе схлопывания каверны активно генерируются новые группы кольцевых капиллярных волн. На последнем этапе активной эволюции течения один из газовых пузырьков сохраняется в центре течения (рис. 3, м). Пузырьки на периферии также слились в один пузырек диаметром $d_b = 2,35$ мм. Процессы касания, слияния, разделения газовых полостей сопровождаются излучением пакетов звуковых волн.

Звуковые сигналы импакта капли. Типичная фонограмма гидрофона приведена на рис. 4. Здесь кроме основной кривой — зависимости звукового давления от времени — на врезках представлены развертки пакетов, их спектры, фотографии каверны и ее участков. Контакту капли с принимающей жидкостью на фонограмме соответствует ударный импульс I, за которым следует спад и плавный подъем, связанные с заглублением каверны и возвышением венца. После паузы при $t = 146,8$ мс появляется группа возмущений давления, предшествующих звуковому пакету II ($t = 165$ мс). Пакет III появляется с задержкой при $t = 200,4$ мс.

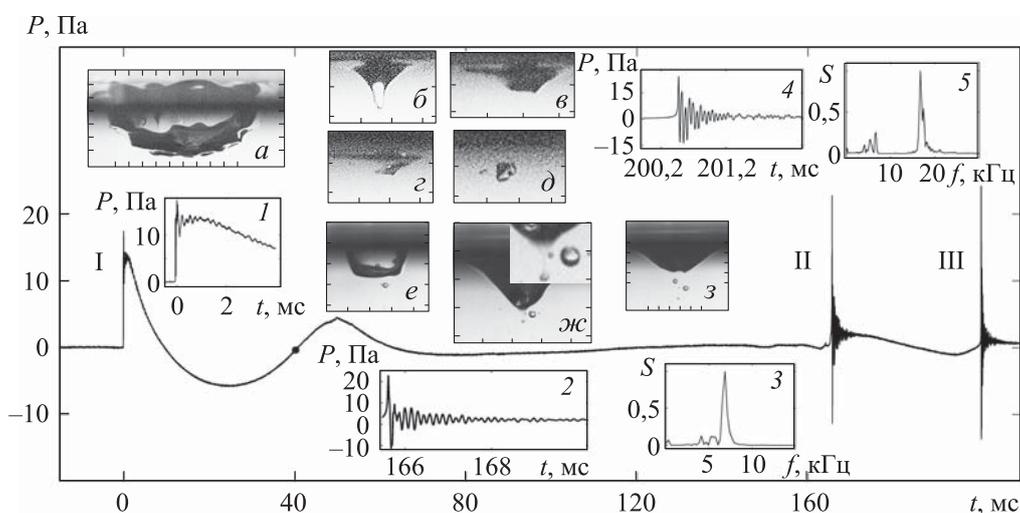


Рис. 4. Фонограмма сигнала гидрофона и фотографии картины течения ($D = 0,5$ см, $U = 3,2$ м/с, $We = 701$, $Re = 16\ 000$, $Fr = 209$, $Oh = 0,0017$, $Bo = 3,4$):

вставки 1, 2 — ударный импульс I и пакет II; 3 — спектр пакета II; 4, 5 — пакет III и его спектр; врезки (деление 2 мм): а — каверна, $t = 40,2$ мс, б–д — газовая полость при $t = 163,7; 165,2; 165,5; 166,2$ мс; е–з — вторичная каверна, $t = 186,2$ мс; растущая $t = 200,5$ мс и оторвавшаяся газовая полость $t = 203,5$ мс — фрагмент на вставке ж

В развертке пакета I (вставка 1) выражен начальный импульс и высокочастотные затухающие осцилляции на спадающем участке. Основной сигнал II (развертка на вставке 2) начинается с резкого нарастания, которое переходит в немонотонно спадающие осцилляции с основной частотой $f = 6,8$ кГц (спектр на вставке 3). На спектре к основному максимуму примыкают боковые лепестки на частотах $f = 4,1$ и $5,5$ кГц. В резонансном пакете III также выражен фронт с последующими спадающими группами колебаний (развертка на вставке 4). В спектре пакета III главный максимум — на частоте $f = 16,7$ кГц, к нему слева примыкают низкочастотные вторичные пики ($f = 5,1, 5,3$ и $6,5$ кГц).

Картины течений, синхронизованные с излучением основных звуковых пакетов, приведены на изображениях *a–з*, см. рис. 4. В фазе коллапса округлое дно каверны покрывается трехмерными возмущениями сложной формы ($t = 40,2$ мс, вставка *a*, метка • на фонограмме). Упавшая капля, ранее выброшенная с вершины всплеска, формирует коническую каверну с вытянутым центром, который отсекается тонкими течениями и трансформируется в газовую полость (вставка *б*, $t = 163,7$ мс). Стенки каверны деформируются тонкими приповерхностными течениями, которые порождаются двойным энергетически нагруженным слоем. При этом одновременно протекают два процесса: 1) быстрое «уничтожение» свободной поверхности ($\tau_{\sigma} \sim 10^{-8}$ с) сливающихся жидкостей; 2) медленное образование новой свободной поверхности растущих каверны и венца ($\tau_d \sim 10^{-3}$ с).

При коллапсе каверны газовая полость отсекается приповерхностным течением (светлая горизонтальная полоса на вставке *в*, $t = 165,2$ мс), и образует угловатый газовый фрагмент (вставка *г*, $t = 165,5$ мс). От него отделяется нижняя часть и стягивается в пузырек. Оставшаяся часть фрагмента трансформируется в полость неправильной формы (вставка *д*, $t = 166,2$ мс), затем в сферический пузырек. Падение новой капли формирует следующую коническую каверну с плоским дном (вставка *е*, $t = 186,2$ мс).

Далее полость вытягивается, на ней образуется перетяжка, после смыкания которой формируется еще один газовый пузырек. В деталях картина течения с вытянутой полостью, тремя отделившимися и одним примыкающим к стенке каверны газовыми пузырьками показана на рис. 4, *ж*. Именно в момент разрыва вытянутой полости и отделения пузырька начинает излучаться пакет III ($t = 200,5$ мс). Гидродинамика и энергетика процесса возбуждения осцилляций излучающей звук полости ударом остатка воздушного канала рассмотрены в [6]. Пузырьки активно перемещаются тонкими течениями в толще жидкости (вставка *з*, $t = 203,5$ мс).

С возвращением в принимающую жидкость последней вылетевшей капельки излучение акустических пакетов прекращается, все возмущения постепенно затухают.

Проведенная визуализация показывает, что в процессах излучения звука важную роль играют и капиллярные волны, впадины которых покрываются падающими каплями, и образуют замкнутые газовые полости сложной формы. Процессы быстрого преобразования доступной потенциальной энергии формируют лигаменты — тонкие течения, которые разрывают газовые полости на отдельные фрагменты. Лигаменты быстро затухают и образуются вновь при формировании каждой новой группы капиллярных волн.

Типичные синхронно регистрируемые фонограммы гидрофона и микрофона импакта воды одиночной капли приведены на рис. 5. В развертке сигнала гидрофона I на вставке *a* выражен начальный импульс и высокочастотные затухающие осцилляции на спадающем участке. Максимум спектра сигнала быстро сдвигается с частоты $f = 140$ кГц к $f \sim 80$ кГц, $\tau = 27$ мс (вставка *б*). Основной сигнал гидрофона II (развертка на вставке *г*) начинается с резкого нарастания, которое переходит в немонотонно спадающие

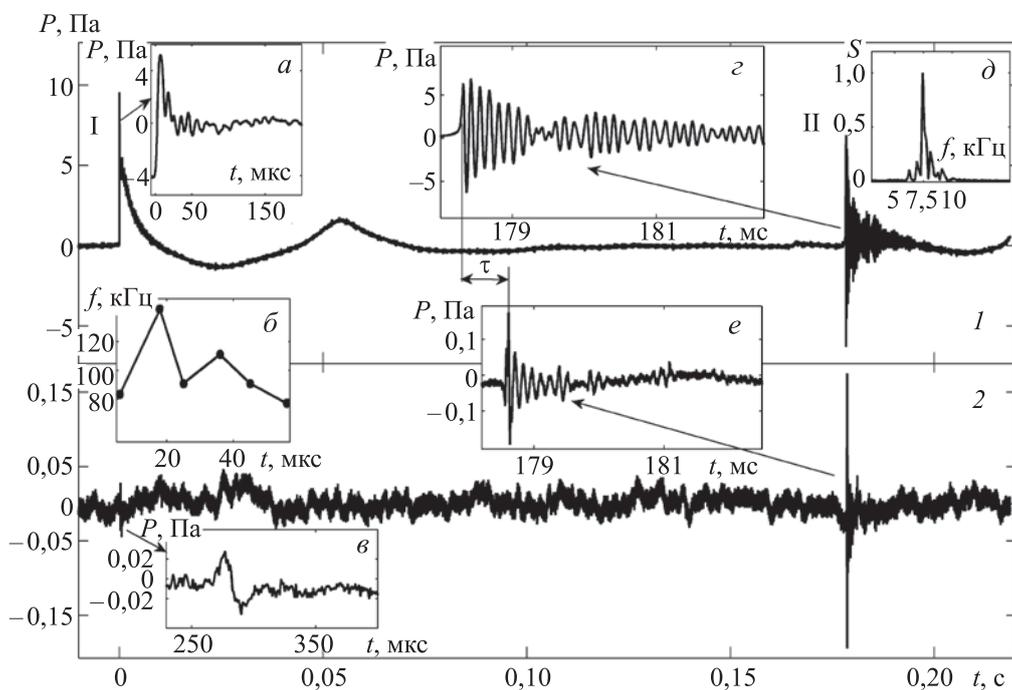


Рис. 5. Фонограммы сигналов импакта капли гидрофона (1) и микрофона (2):
 $D = 0,5$ см, $U = 4,0$ м/с, $We = 1100$, $Fr = 330$, $Re = 20\ 000$, $Oh = 0,0016$, $Bo = 3,4$

осцилляции с частотой $f = 7,5$ кГц (спектр на вставке δ). Здесь к основному максимуму примыкают боковые лепестки на частотах $f = 6,8$ и $8,2$ кГц.

В сигнале микрофона (см. рис. 5, кривая 2) начальный импульс представлен менее контрастно, фактически одной полуволной (см. рис. 5, ν). Шумовая дорожка здесь более выражена, чем в сигнале с гидрофона в силу большего значения коэффициента усиления и акустического фона лаборатории. Запаздывание τ сигнала с микрофона (см. рис. 5, ϵ) соответствует времени прохождения по воздушной трассе от источника к микрофону. Спектральные максимумы сигналов с гидрофона и микрофона совпадают, что подтверждает единство источника звука в обеих средах.

При неизменных условиях характер излучения и параметры акустических пакетов значительно менялись от эксперимента к эксперименту. Одной из вероятных причин наблюдаемой нестационарности являются вариации формы капли. Эксперименты показали, что интенсивные собственные колебания капли и короткие капиллярные волны на ее поверхности, которые образуются при ее отрыве, активно влияют на взаимодействие с потоком воздуха и форму в момент контакта с принимающей жидкостью.

Заключение. Проведенные эксперименты показали, что в последовательности процессов, инициированных свободно падающей каплей, наблюдаются несколько групп капиллярных волн и отдельные звуковые пакеты. Короткие капиллярные волны начинают формироваться одновременно с образованием венца. Собственные волны бегут по стенкам венца и дну каверны. Новые группы капиллярных волн образуются при каждой перестройке картины течения, в частности при прекращении роста высоты венца. Группы более коротких волн также формируются при образовании всплеска и его погружении, падении вторичных капель, формировании новых каверн, выбросе и погружении стримера и вторичных капелек. Максимальной длиной, амплитудой и размером пакета характеризуются внешние капиллярные волны, охватывающие растекающийся венец. Одновременно с волнами образуются лигаменты, играющие важную роль в формировании и разрыве газовых полостей, в процессах генерации звуковых пакетов.

Динамику и энергетiku тонких течений определяют процессы быстрого преобразования потенциальной внутренней энергии при слиянии жидкостей и уничтожении свободных поверхностей. Преобразованная внутренняя энергия остается в тонком слое толщиной порядка размера молекулярного кластера, где возникают большие возмущения температуры, давления и скорости течения, который со временем утолщается. Тон-

кие течения быстро затухают и образуются вновь при каждом изменении структуры течения и генерации новой группы капиллярных волн.

Первый звуковой пакет регистрируется во всех проведенных экспериментах и гидрофоном в виде ударного импульса, а также микрофоном в форме размытого сигнала. Сопоставление картин подводных течений и акустических сигналов показало синхронность процессов генерации второго и последующих резонансных звуковых пакетов и отрыва газовых полостей от каверны, формирующейся при погружении капли или разрыве полостей на фрагменты. Частота звука в пакете определяется объемом фрагмента, а длительность звучания — ходом процесса трансформации формы излучающего объема газа к гладкой сфероидальной.

Благодарности

Автор выражает благодарность В.Е. Прохорову за помощь в проведении экспериментов и стимулирующие обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Prosperetti A., Ogüz H.N. The impact of drops on liquid surfaces and the underwater noise of rain. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 1993, vol. 25, pp. 577–602.
DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.fl.25.010193.003045>
- [2] Pumphrey H.C., Crum L.A. Free oscillations of near-surface bubbles as a source of the underwater noise of rain. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1990, vol. 87, iss. 1, pp. 142–148.
DOI: <https://doi.org/10.1121/1.399306>
- [3] Longuet-Higgins M.S. An analytic model of sound production by raindrops. *J. Fluid Mech.*, 1990, vol. 214, pp. 395–410. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0022112090000179>
- [4] Попов В.Н., Черепанов А.Н. Численное моделирование кристаллизации модифицированной металлической капли при растекании на подложке. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2019, № 6 (87), с. 18–39.
DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/1812-3368-2019-6-18-39>
- [5] Чашечкин Ю.Д., Прохоров В.Е. Аэро- и гидроакустика удара свободно падающей капли о поверхность воды. *Докл. РАН*, 2010, т. 434, № 1, с. 51–55.
- [6] Прохоров В.Е., Чашечкин Ю.Д. Генерация звука при падении капли на поверхность воды. *Акуст. журн.*, 2011, т. 57, № 6, с. 792–803.
- [7] Zhu G.Z., Li Z.H., Fu D.Y. Experiments on ring wave packet generated by water drop. *Chin. Sci. Bul.*, 2008, vol. 53, no. 11, pp. 1634–1638.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s11434-008-0246-0>
- [8] Чашечкин Ю.Д., Прохоров В.Е. Гидродинамика удара капли: короткие волны на поверхности венца. *Докл. РАН*, 2013, т. 451, № 1, с. 41–45.
- [9] Чашечкин Ю.Д. Визуализация тонкой структуры возмущений поверхности жидкости течениями, вызванными упавшей каплей. *ПММ*, 2019, т. 83, № 3, с. 403–412.

- [10] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Курс теоретической физики. Т. 6. Гидродинамика. М., Наука, 1986.
- [11] Feistel R. Thermodynamic properties of seawater, ice and humid air: TEOS-10, before and beyond. *Ocean Sci.*, 2018, vol. 14, iss. 3, pp. 471–502.
DOI: <https://doi.org/10.5194/os-14-471-2018>
- [12] Chashechkin Yu.D. Singularly perturbed components of flows — linear precursors of shock waves. *Math. Mod. Nat. Phen.*, 2018, vol. 13, no. 2, art. 17.
DOI: <https://doi.org/10.1051/mmnp/2018020>
- [13] Чашечкин Ю.Д. Дифференциальная механика жидкостей: согласованные аналитические, численные и лабораторные модели стратифицированных течений. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2014, № 6 (57), с. 67–95.
- [14] Чашечкин Ю.Д. Эволюция тонкой структуры распределения вещества свободно падающей капли в смешивающихся жидкостях. *Изв. РАН. Физ. атм. океана*, 2019, т. 55, № 3, с. 67–77. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002-351555367-77>
- [15] Эйзенберг Д., Кауцман В. Структура и свойства воды. Л., Гидрометеиздат, 1975.
- [16] Гиббс Дж.В. Термодинамические работы. М., Л., ГИТТЛ, 1950.
- [17] Teschke O., de Souza E.F. Water molecule clusters measured at water/air interfaces using atomic force microscopy. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2005, vol. 7, no. 22, pp. 3856–3865. DOI: <https://doi.org/10.1039/B511257E>
- [18] Бункин Н.Ф., Индукаев К.В., Игнатьев П.С. Спонтанная самоорганизация газовых микропузырей в жидкости. *ЖЭТФ*, 2007, т. 131, № 3, с. 539–555.
- [19] Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю. Полосчатые структуры в картине распределения вещества капли по поверхности принимающей жидкости. *Докл. РАН*, 2018, т. 481, № 2, с. 145–150. DOI: <https://doi.org/10.31857/S086956520001192-4>
- [20] Гидрофизический комплекс для моделирования гидродинамических процессов в окружающей среде и их воздействия на подводные технические объекты, а также распространения примесей в океане и атмосфере (ГФК). *ipmnet.ru: веб-сайт*.
URL: <http://www.ipmnet.ru/uniquequip/gfk/#equip> (дата обращения: 15.06.2020).

Чашечкин Юлий Дмитриевич — д-р физ.-мат. наук, заведующий лабораторией механики жидкостей ИПМех РАН (Российская Федерация, 119526, Москва, Вернадского пр-т, д. 101/1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Чашечкин Ю.Д. Пакеты капиллярных и акустических волн импакта капли. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2021, № 1 (94), с. 73–91. DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2021-1-73-91>

PACKETS OF CAPILLARY AND ACOUSTIC WAVES OF DROP IMPACT

Yu.D. Chashechkin

chakin@ipmnet.ru
yulidch@gmail.com

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics, Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation

Abstract

Flows, capillary waves, and acoustic signals generated by a drop of water falling into a pool of degassed liquid were recorded by a high-speed video camera, hydrophone, and microphone. A large-scale analysis of the system of equations was performed. The fast conversion of available surface potential energy is traced. The converted energy is stored in a thin layer in the vicinity of the merged free surfaces and creates large perturbations of temperature, pressure and flow velocity. Capillary waves start to radiate simultaneously with the formation of a cavity and the rise of the crown. New groups of capillary waves arise with all changes in the flow structure — the formation and immersion of a splash, come back of secondary drops, the formation of cavities, the immersion of a streamer and droplets. Simultaneously with the waves, ligaments — thin near-surface flows are formed that affect the transport and rupture of gas cavities. Thin flows quickly decay and form again when a new group of capillary waves is generated. A comparison of flow patterns and acoustic signals indicates that the generation of resonant sound packets is synchronized with the pinch-off gas fragments from the cavity or their breaking. The duration of the sound depends on the initial heterogeneity of the geometry of the sounding cavity, gradually transforming into a smooth spheroidal form

Keywords

Drop, cavity, splash, capillary and sound waves, ligaments, energy conversion

Received 24.03.2020

Accepted 26.05.2020

© Author(s), 2021

This work was financially supported by the Russian Science Foundation (project RNF no. 19-19-00598)

REFERENCES

- [1] Prosperetti A., Ogūz H.N. The impact of drops on liquid surfaces and the underwater noise of rain. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 1993, vol. 25, pp. 577–602.
DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.fl.25.010193.003045>
- [2] Pumphrey H.C., Crum L.A. Free oscillations of near-surface bubbles as a source of the underwater noise of rain. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1990, vol. 87, iss. 1, pp. 142–148.
DOI: <https://doi.org/10.1121/1.399306>

- [3] Longuet-Higgins M.S. An analytic model of sound production by raindrops. *J. Fluid Mech.*, 1990, vol. 214, pp. 395–410. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0022112090000179>
- [4] Popov V.N., Cherepanov A.N. Numerical simulation of crystallization of a modified metal drop during metal spreading on a substrate. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2019, no. 6 (87), pp. 18–39 (in Russ.). DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/1812-3368-2019-6-18-39>
- [5] Chashechkin Yu.D., Prokhorov V.E. Aero- and hydroacoustics of the impact for a droplet freely falling onto the water surface. *Dokl. Phys.*, 2010 vol. 55, no. 9, pp. 460–464. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1028335810090090>
- [6] 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. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063771011050137>
- [7] Zhu G.Z., Li Z.H., Fu D.Y. Experiments on ring wave packet generated by water drop. *Chin. Sci. Bul.*, 2008, vol. 53, no. 11, pp. 1634–1638. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11434-008-0246-0>
- [8] Chashechkin Yu.D., Prokhorov V.E. Drop-impact hydrodynamics: short waves on a surface of the crown. *Dokl. Phys.*, 2013, vol. 58, no. 7, pp. 296–300. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1028335813070021>
- [9] Chashechkin Yu.D. Visualization of the fine perturbation structure of a liquid surface by flows induced by a drop impact. *Fluid Dyn.*, 2019, vol. 54, no. 7, pp. 919–926. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0015462819070036>
- [10] Landau L.D., Lifshits E.M. Kurs teoreticheskoy fiziki. T. 6. Gidrodinamika [Theoretical physics course. Vol. 6. Hydrodynamics]. Moscow, Nauka Publ., 1986.
- [11] Feistel R. Thermodynamic properties of seawater, ice and humid air: TEOS-10, before and beyond. *Ocean Sci.*, 2018, vol. 14, iss. 3, pp. 471–502. DOI: <https://doi.org/10.5194/os-14-471-2018>
- [12] Chashechkin Yu.D. Singularly perturbed components of flows — linear precursors of shock waves. *Math. Mod. Nat. Phen.*, 2018, vol. 13, no. 2, art. 17. DOI: <https://doi.org/10.1051/mmnp/2018020>
- [13] Chashechkin Yu.D. Fluid mechanics: consistent analytical, numerical and laboratory models of stratified flows. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2014, no. 6 (57), pp. 67–95 (in Russ.).
- [14] Chashechkin Yu.D. Evolution of the fine structure of the matter distribution of a free-falling droplet in mixing liquids. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.*, 2019, vol. 55, no. 3, pp. 285–294. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0001433819020026>
- [15] Eyzenberg D., Kautzman V. Struktura i svoystva vody [Structure and properties of water]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1975.
- [16] Gibbs Dzh.V. Termodinamicheskie raboty [Works on thermodynamics]. Moscow, Leningrad, GITTL Publ., 1950.
- [17] Teschke O., de Souza E.F. Water molecule clusters measured at water/air interfaces using atomic force microscopy. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2005, vol. 7, no. 22, pp. 3856–3865. DOI: <https://doi.org/10.1039/B511257E>

[18] Bunkin N.F., Indukaev K.V., Ignat'ev P.S. Spontaneous self-organization of microbubbles in a liquid. *J. Exp. Theor. Phys.*, 2007, vol. 104, no. 3, pp. 486–498.

DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063776107030156>

[19] Chashechkin Yu.D., Ilinykh A.Yu. Banded structures in the distribution pattern of a drop over the surface of the target fluid. *Dokl. Phys.*, 2018, vol. 63, no. 7, pp. 282–287. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1028335818070066>

[20] Hidrofizicheskiy kompleks dlya modelirovaniya gidrodinamicheskikh protsessov v okruzhayushchey srede i ikh vozdeystviya na podvodnye tekhnicheskie ob"ekty, a takzhe rasprostraneniya primesey v okeane i atmosfere (GFK) [Hydrophysical complex for modeling environmental hydrodynamic processes and their impact on underwater technical objects, as well as the impurities transport in the ocean and atmosphere (GFK)]. *ipmnet.ru: website* (in Russ.).

Available at: <http://www.ipmnet.ru/uniquequip/gfk/#equip> (accessed: 15.06.2020).

Chashechkin Yu.D. — Dr. Sc. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Laboratory of Fluid Mechanics, Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics, Russian Academy of Sciences (Vernadskogo prospekt 101/1, Moscow, 119526 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Chashechkin Yu.D. Packets of capillary and acoustic waves of drop impact. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2021, no. 1 (94), pp. 73–91 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2021-1-73-91>