

УДК 551.46

АКУСТИКА ПЕРИОДИЧЕСКИХ И МНОЖЕСТВЕННЫХ УДАРОВ КАПЕЛЬ О ВОДНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ

© 2023 г. Ю. Д. Чашечкин^а, *, В. Е. Прохоров^а, **

^аИнститут проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук,
пр-т Вернадского 101, корп. 1, Москва, 119526 Россия

*e-mail: chakin@ipmnet.ru

**e-mail: prohorov@ipmnet.ru

Поступила в редакцию 25.11.2021 г.

После доработки 25.11.2021 г.

Принята к публикации 22.09.2022 г.

Высокоскоростная видеосъемка поверхностных течений и синхронизованные акустические измерения подводных звуковых сигналов падающих капель выполнены в лабораторном бассейне. При последовательном падении в картине течения сохраняются в искаженной форме основные структурные элементы, характерные для столкновения с поверхностью одиночной капли: каверна, брызги, венец, всплеск, а в фонограмме устойчиво повторяются ударные импульсы, сопровождающие каждый контакт. Дополнительно наблюдаются редкие резонансные пакеты. При множественном падении капель картина течения резко меняется, основные структурные элементы течения импакта капли исчезают, поверхность покрывается плавающими пузырями. Фонограмма приобретает вид шумового сигнала, в спектре которого выделяются отдельные линейчатые участки.

Ключевые слова: капли, периодическое и множественное соударение, картина течения, акустика, спектры, масштабы, частоты

DOI: 10.31857/S0320791922700071, EDN: YKHUDA

ВВЕДЕНИЕ

Исследования процессов формирования волн, вначале капиллярно-гравитационных [1], затем и звуковых [2, 3], сопровождающих слияние свободно падающей капли с принимающей жидкостью, значительно расширились в последние десятилетия. Рост интереса обусловлен богатым научным содержанием темы, расширением числа практических приложений, а также развитием высокоразрешающей техники оптической и акустической регистрации параметров физических процессов в жидкостях. Ведется поиск причинно-следственных связей между одновременно идущими процессами формирования групп сравнительно низкочастотных и мелкомасштабных капиллярных волн и высокочастотных акустических волн, длины которых заметно превышают размеры источников [4].

Уже в ранних экспериментах [5] был установлен богатый состав акустических сигналов падения одиночной капли, включающих высокочастотный первичный импульс и ряд запаздывающих резонансных пакетов, частоты которых оказались близкими к собственным частотам колебаний сферических газовых пузырьков [6]. Обзор ранних работ по гидродинамике и акустике

импакта капли [7] регулярно дополняется новыми результатами изучения картины формирования газовых пузырьков [8, 9], акустических сигналов [10–13], а также данными согласованной регистрации картин течений и звуковых полей [14, 15].

Тщательные исследования позволили выделить важную роль сравнительно больших газовых пузырьков, отрывающихся в процессе погружения всплеска, и капли, выброшенной с вершины этого всплеска, как одного из основных источников звуковых пакетов [15, 16]. Анализ результатов [6–14] показывает, что характер акустических процессов импакта капли зависит от большого числа параметров и сравним по сложности с другими явлениями, изучаемыми в физической акустике [17].

Ряд ключевых вопросов, включающих определение условий излучения тонального сигнала [12, 13, 15] или модулированного с изменяющейся несущей частотой [11], нуждается в дополнительном изучении с контролем картины слияния падающей капли. В опытах наблюдаются различные режимы растекания капли с образованием каверны, венца и всплеска (кумулятивной струйки) [15, 18, 19], отскок капли с возбуждением рэлееских осцилляций, зависание на вогнутой свобод-

ной поверхности жидкости, частичный отскок с потерей части массы капли [20].

Режим течения зависит от многих параметров — размера, формы и динамического состояния капли — интенсивности и моды рэлеевских осцилляций [21], коротких капиллярных волн, бегущих по ее поверхности [22], ориентации вытянутой капли, состояния поверхности принимающей жидкости, которая может быть гладкой или возмущенной волнами от внешних источников [23] или ранее упавшими каплями, в частности, каплями дождя [24]. Различия свойств процессов, зависящих от многих разнородных параметров, затрудняет поиск механизмов формирования газовых пузырьков и генерируемых ими акустических пакетов от условий опытов при падении и одиночных капель, и их групп [4, 8, 9, 11, 15, 19, 25].

Повышенный интерес к изучению гидроакустики групп капель и шума дождя обусловлен рядом причин. Уже первые измерения шумов моря [26] показали заметный вклад звуков капель дождя в энергию звуковых полей [27]. Дальнейшие исследования позволили выделить региональные особенности звуковых сигналов и проявление сезонной изменчивости [28–30]. Новые результаты морских измерений стимулировали развитие методик лабораторных экспериментов, изучение динамики и энергетики акустического излучения одиночных капель [20, 31] и модели дождя [32].

Возможность восстановления параметров дождя по данным дистанционных измерений шума в океане [32] постепенно развилась в быстрорастущее научное направление дистанционной акустической и радиолокационной метеорологии [33]. Одновременно начали создаваться автоматизированные системы измерения интенсивности осадков, позволяющие определять размеры и энергию капель [34], заменяющие трудоемкие ручные измерения интенсивности осадков с помощью “осадкомерного ведра”, входящего в стандартное оборудование метеостанций [35]. В спектральном анализе данных дистанционных морских измерений внимание уделяется выделению спектрального пика, положение и степень выраженности которого зависят от размеров капель дождя, скорости ветра и интенсивности осадков [36]. Акустика промежуточного диапазона падения счетного числа капель остается недостаточно изученной.

Цель данной работа — регистрация и анализ звуковых сигналов в воде, вызванных каплями, падающими последовательно из одного или одновременно из множества стационарно установленных дозаторов с одновременной оптической регистрацией картины течения.

ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ

В основе методики эксперимента — полная система фундаментальных уравнений, описывающая течения жидкостей и газов с физически обоснованными начальными и граничными условиями [37, 38], которая здесь для краткости не приводится. Структура и динамика течений определяются свойствами всех контактирующих сред, каждая из которых характеризуется собственными термодинамическими параметрами (принадлежность которых обозначается индексами a — для воздуха, d — капли, t — принимающей среды): плотностью $\rho_{a,d,t}$, температурой $T_{a,d,t}$, коэффициентами кинематической вязкости $\nu_{a,d,t}$ и поверхностного натяжения σ_d^a и σ_t^a на границах раздела сред (введены также нормированные на плотность значения $\gamma_d^a = \sigma_d^a/\rho_d$ и $\gamma_t^a = \sigma_t^a/\rho_t$). В данной работе при изучении течений и звуков, сопровождающих растекание в воде свободно падающей с ускорением g капли воды, влиянием воздушной среды пренебрегается. Температура всех сред считается постоянной (комнатной) и неизменной в силу большой теплоемкости воды.

Параметры течения зависят от диаметра D , площади поверхности S_d , объема V , массы M , скорости капли U в момент контакта, кинетической энергии $E_k = MU^2/2$, доступной потенциальной поверхностной энергии (ДППЭ) $E_\sigma = \sigma S_d$, сосредоточенной в приповерхностном шаровом слое толщиной порядка размера молекулярного кластера $\delta_\sigma \sim 10^{-6}$ см [39]. Характерное время передачи кинетической энергии определяется временем растекания капли $\tau_d \sim D/U \approx 2$ мс, а быстрое преобразование ДППЭ в другие формы определяется скоростью процесса уничтожения свободной поверхности при слиянии жидкостей $\tau_c \sim \delta_\sigma/U \approx 10^{-8}$ с. Большая плотность поверхностной энергии, сосредоточенной в тонком слое, обеспечивает образование быстрых струек и капель на границе области слияния контактирующих жидкостей [18].

Учитывая большое влияние быстрых процессов преобразования внутренней энергии в другие формы на динамику и структуру течений, в качестве базового параметра, описывающего термодинамическое состояние равновесной среды, выбирается потенциал Гиббса (свободная энтальпия) G , производные которого определяют основные термодинамические параметры — плотность, давление и температуру [40].

Задача характеризуется большим числом масштабов длины и времени. В частности, линейными масштабами геометрической (диаметр капли D и размеры рабочего объема $L_{1,2,3}$), кинематиче-

ской ($L_g^U = U^2/g$) и физической природы. Длина капиллярных $\lambda_c = 2\pi/k$ или звуковых волн $\lambda_s = 2\pi/k_s$ определяется их частотой и задается регулярной частью собственных дисперсионных соотношений. С учетом вязкости дисперсионное соотношение для капиллярных волн имеет вид [41]

$$2k \left(\omega_c^2 k_l - gk^2 - \sigma k^4 + 2i\omega_c^2 \nu k_l (3k^2 - k_l^2) \right) - \left(k_l^2 + k^2 \right) \left(\omega_c^2 - gk - \sigma k^3 + 2i\omega_c^2 \nu k^2 \right) = 0, \quad (1)$$

а для звуковых [37]

$$\left(\mathbf{k}_s^2 \left(1 - \frac{i\omega_s \nu}{c_s^2} \right) - \frac{\omega_s^2}{c_s^2} \right) \left(\omega_s + i\nu \mathbf{k}_s^2 \right)^2 = 0. \quad (2)$$

Дисперсионные уравнения (1), (2) описывают собственно волны и сопутствующие тонкие течения – лигаменты с собственными волновыми числами k_l [38, 41]. В системе уравнений также присутствуют капиллярно-гравитационный $L_g^\gamma = \sqrt{\gamma/g}$ и капиллярно-инерционный масштабы $L_U^\gamma = \gamma/U^2$.

Группа малых масштабов, связанных с атомно-молекулярными свойствами среды, включает прандтлевский $\delta_U^\nu = \nu/U$ и вязко-капиллярный $\delta_\gamma^\nu = \nu^2/\gamma$ масштабы.

Течение также характеризуется набором временных масштабов. Один них $\tau_M = D/U$ – определяется кинематикой движения капли в момент контакта. Группа масштабов, зависящих от размера капли и свойств среды, включает $\tau_\gamma = \sqrt{D^3/\gamma}$ и $\tau_\gamma^D = \nu D/\gamma$. Еще две пары масштабов зависят от параметров среды $\tau_g^\gamma = (\gamma/g^3)^{1/4}$, $\tau_\gamma^\nu = \nu^3/\gamma^2$ и источника акустических $\tau_s = 2\pi/\omega_s$ и капиллярных волн $\tau_c = 2\pi/\omega_c$.

Значения масштабов изучаемых явлений лежат в широком диапазоне: линейных – от 160 до 10^{-6} см, временных – от 10^{-2} до 10^{-8} с. Верхняя граница линейных масштабов типична для механических процессов, нижняя близка к атомно-молекулярным масштабам (размер молекул воды 3×10^{-8} см, размер кластера – порядка 10^{-6} см [39]).

В целом, наборы масштабов определяют требования к экспериментальным установкам: выбору размера поля наблюдения, которое должно вмещать все крупномасштабные компоненты (в частности, области распространения капиллярных волн с длиной порядка δ_γ^ν), а инструменты – разрешать быстропеременные тонкие течения.

Большие диапазоны собственных масштабов указывают на сосуществование двух типов влияющих процессов. Одна группа масштабов характеризует медленные гидродинамические явления

($\sim \tau_M$), вторая – быстрые тонкие, лежащие на границе атомно-молекулярных и макроскопических процессов. Их совместное действие наглядно проявляется в эволюции картины слияния независимых свободных поверхностей, когда ДППЭ преобразуется в другие формы (внутреннюю и механическую энергию) в результате прямых атомно-молекулярных взаимодействий, и происходит резкое изменение термодинамических величин (давления и температуры) в тонком слое. Быстрое выделение энергии способствует образованию разлетающейся начальной пелены, шипов и брызг из области контакта [42, 43], капелек с вершин шеврона венца и всплеска [20], движению с большим ускорением границ отрывающихся газовых полостей [11]. Отношения масштабов определяют безразмерные комбинации, которые были введены по отдельности в ранее выполненных работах.

Следуя установившейся традиции при описании процессов здесь используются отношения линейных масштабов, задающие числа Рейнольдса $Re = D/\delta_U^\nu = UD/\nu$, Фруда $Fr = \delta_g^U/D = U^2/gD$, Вебера $We = D/\delta_U^\gamma = U^2 D/\gamma$, Бонда $Bo = D^2/\delta_g^\nu = gD^2/\gamma$, Онезорге $Oh = \sqrt{\delta_\gamma^\nu/D} = \nu/\sqrt{\gamma D}$ и капиллярное отношение $Ca = U/\delta_\gamma^\nu = U\nu/\gamma$. Характерные значения безразмерных отношений в условиях настоящих экспериментов приведены в табл. 1.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты проводились на стенде ЭСП из состава ГФК ИПМех РАН [44]. Рабочий бассейн размером $240 \times 40 \times 60$ см с оптическими стеклами заполнялся частично дегазированной водопроводной водой. Опыты выполнены при комнатной температуре $T = 20^\circ\text{C}$.

Видеосъемка проводилась камерой “Optronis 3000x2” на скорости 4000 к/с, размер кадра 512×512 , абсолютное пространственное разрешение 0.07 мм. Ось видеокамеры была направлена к поверхности под углом 70° .

Звуковые сигналы регистрировались гидрофоном ГИ54 с предусилителем (полоса частот 0.002–100 кГц, неравномерность 3 дБ, выходная крутизна 30 мВ/Па). Гидрофон помещался в центре бассейна на глубине 5 см на линии падения одиночной капли, или в геометрическом центре падения группы капель. Такое расположение позволяло снизить маскирующее действие реверберации, связанной с рассеянием от дна и стенок бассейна. Частота дискретизации сигнала гидрофона – до 1 МГц. Более подробно методика описывается в [11, 15].

В опытах использованы два источника капель. В эксперименте I (табл. 1) использовался дозатор

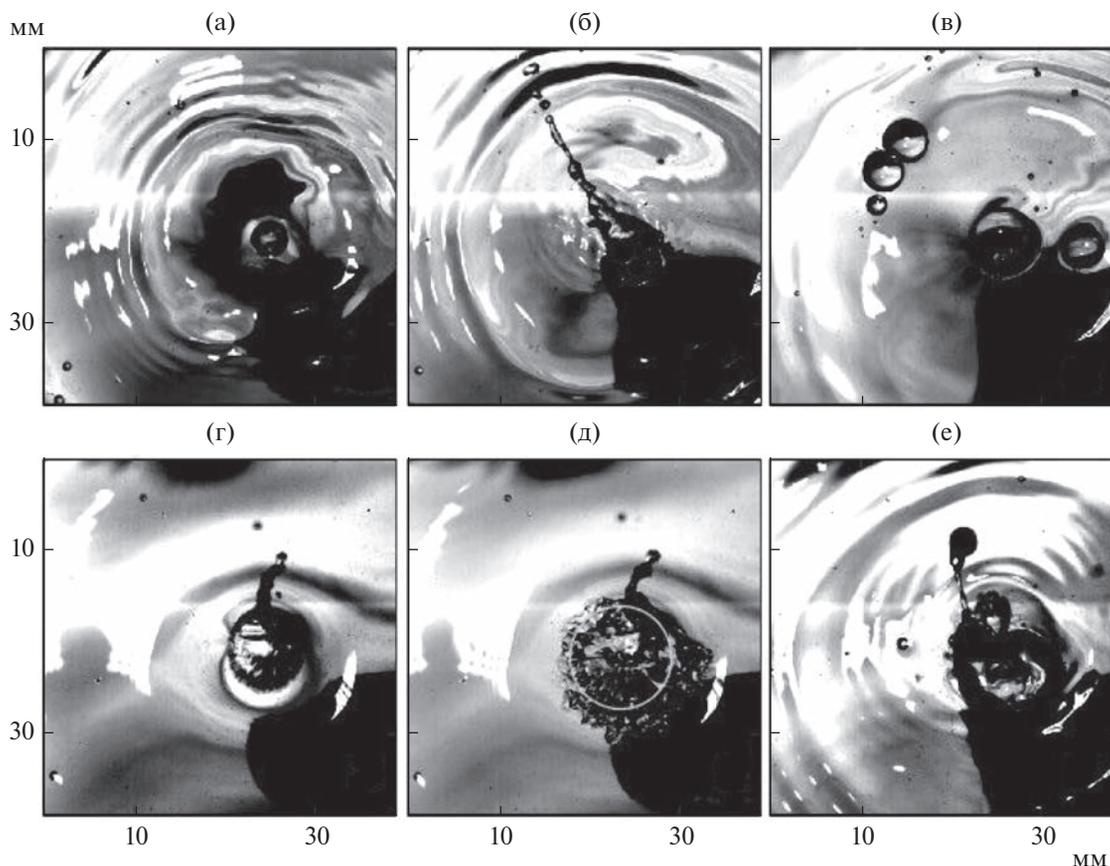


Рис. 1. Фотографии возмущений поверхности при периодическом ($T = 218$ мс) падении капли: (а–е) – $t = 229, 251, 1317, 2512, 2515, 3002$ мс. Светлая окружность (д) – трасса сканирования профиля освещенности.

одиночных капель с капилляром 0.4 см, который позволял регулировать период их отрыва от нескольких десятков секунд до 10 миллисекунд; он располагался на высоте 110 см.

В эксперименте II дозатор множественных капель состоял из 80 капилляров диаметром $d_c = 0.5$ мм, размещенных равномерно на концентрических окружностях с максимальным диаметром 6.0 см. Источник располагался на высоте 50 см. Размеры капель множественного источника лежали в диапазоне от 1.7 до 3.0 мм при средней скорости контакта с поверхностью жидкости $U = 2.8$ м/с.

ГИДРОДИНАМИКА И АКУСТИКА ИМПАКТА ПЕРИОДИЧЕСКИ ПАДАЮЩИХ КАПЕЛЬ ИЗ ФИКСИРОВАННОГО ДОЗАТОРА (ЭКСПЕРИМЕНТ I)

В серии данных опытов капли диаметром $D = 0.5$ см, падающие с периодом от 220 до 600 мс, достигали скорости $U = 4.2$ м/с в момент контакта с невозмущенной поверхностью (измерялась

по видеофильмам). Безразмерные параметры опыта приведены в табл. 1.

Последовательность видеок кадров, представленная на рис. 1, выбрана из временного видеоряда со средним периодом 220 мс.

Анализ видеофильмов показывает, что в зарегистрированных картинах течений сохраняются все базовые структурные компоненты, возникающие при слиянии одиночной капли со свободной поверхностью: мелкие брызги первичного контакта [42, 43], каверна, венец, по поверхности которого сбегает капиллярные волны [45], а с шипов на вершинах зубцов вылетают группы капельных брызг, центральный всплеск, вторичные каверны и тонкая центральная струйка – стример [46].

Появление и распад каждого структурного элемента сопровождается группой капиллярных волн. Однако формы структурных элементов далеки от правильных форм, наблюдаемых при падении одиночной капли [20]. Так, в приведенной выборке (рис. 1а) фазовые поверхности кольцевых капиллярных волн представляют собой искривленные замкнутые линии, отклонение которых от окружности увеличивается с приближени-

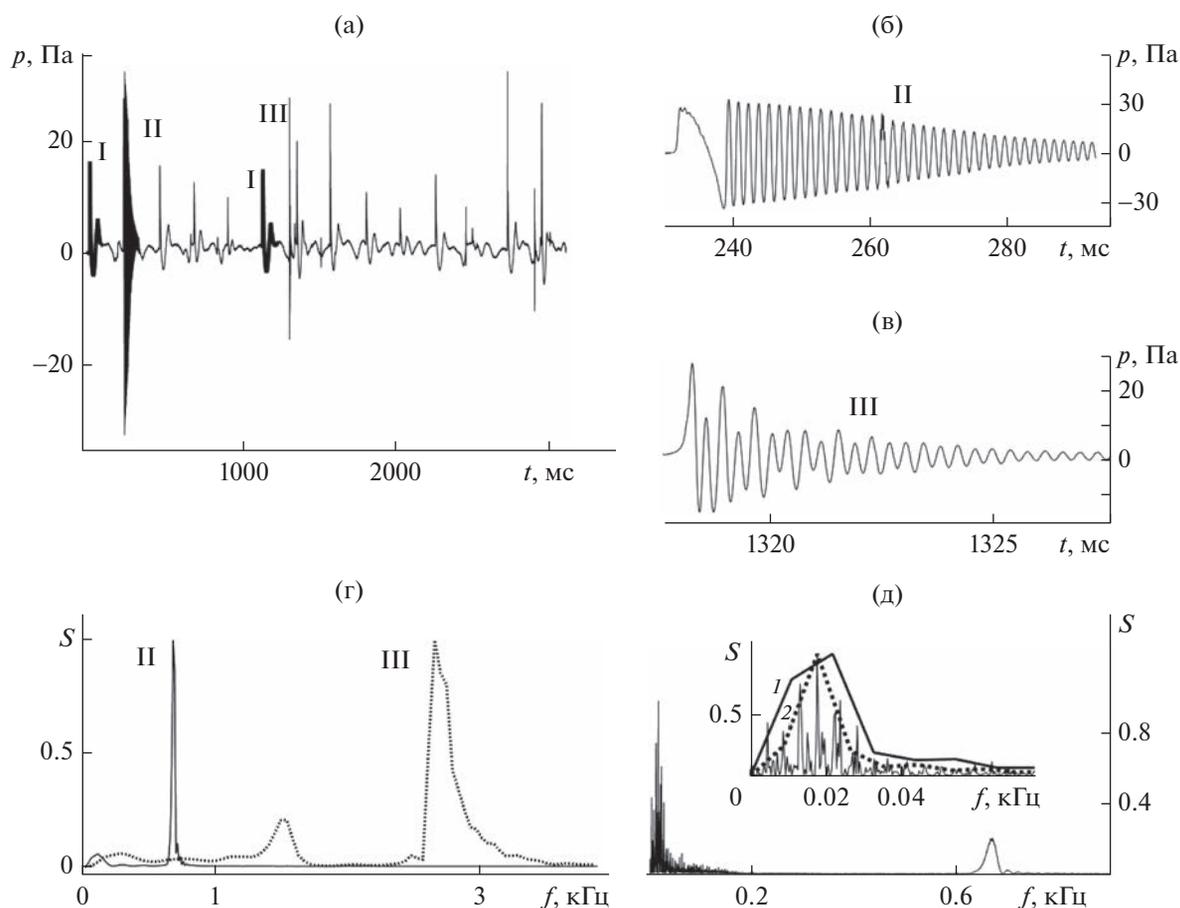


Рис. 2. (а) – Полная фонограмма при периодическом ($T = 218$ мс) падении капли; I – ударный импульс, II, III – резонансные пакеты и (б, в) – их развертки; (г) – амплитудные спектры резонансных пакетов II и III; (д) – амплитудный спектр полной фонограммы, вставка – развернутый начальный участок, кривые 1 и 2 – амплитудные спектры ударных импульсов I (выделены жирным на рис. 2а).

ем к центру. Средняя длина волны в направлении 0–10 час составляет $\lambda_c = 2.2$ мм.

Отклоненная от вертикали тонкая центральная струйка (стример) оказывается более протяженной, и содержит значительно большее число капелек (рис. 1б), чем в покоящейся жидкости. Особенность течения – большое число плавающих газовых пузырей различного диаметра – от 0.2 до 0.7 см (рис. 1в). При слиянии капли с возмущенной поверхностью тонкоструктурные компоненты, деформирующие вершину растущего всплеска, выражены более отчетливо на периферии течения. Некоторые из них столь интенсивны, что порождают собственную нецентральную струйку (рис. 3г). В течение 3 мс мелкомасштабные возмущения покрывают всю центральную область. В пространственном спектре флуктуаций освещенности вдоль кругового контура радиусом 0.5 см (рис. 1д) они выделяются на масштабе 1.8 мм вместе с крупномасштабными возмущениями 8.8 мм. Дальнейшее успокоение возмущений

сопровождается группой капиллярных волн ($\lambda_c = 2.4$ см) в направлении на 13 час (рис. 1е). На всех рисунках видны плавающие и приповерхностные газовые пузырьки.

В фонограмме гидрофона (рис. 2а) выделены две группы сигналов – ударные импульсы I и резонансные пакеты II и III. Ударный импульс возникает при контакте каждой падающей капли, его структура подробно анализируется в [46, 47].

Появление резонансных пакетов в значительной степени определяется сценарием приведения капли, который в данных условиях не воспроизводится в силу изменчивости формы свободной поверхности. В настоящем эксперименте выделяются два резонансных пакета, различающиеся формой (рис. 2б) и спектром (рис. 2г). Отметим, что резонансные пакеты по амплитуде превышают ударные импульсы. Пакет II представляет собой затухающий монохроматический сигнал (рис. 2б) с частотой 665 Гц, которой соответствует диаметр 1.0 см осциллирующего воз-

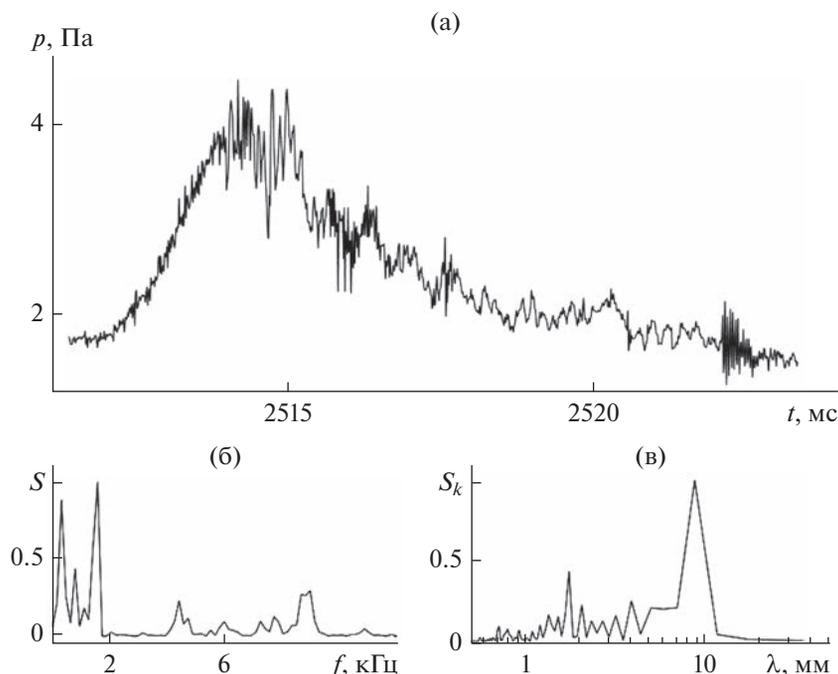


Рис. 3. (а) – Развернутый участок при $t = 2515$ мс и (б) – его частотный спектр; (в) – пространственный спектр флуктуаций освещенности вдоль кругового контура на рис. 1д.

душного пузыря. В спектре амплитудно-модулированного сигнала пакета III присутствуют два пика на частотах 1.48 и 2.65 кГц (рис. 2г).

В спектре полной фонограммы (рис. 2д) выделяются два участка – начальный линейчатый и одиночный пик на частоте 667 Гц – резонанс одиночного пузыря, выделенный и в спектре на рис. 2г.

На участке линейчатого спектра нижняя граничная частота 4.48 Гц соответствует частоте падения капли. В спектре также выражены ее гармоники с номерами $n = 2-5$ (f_2-f_5 , табл. 2) и еще 6 частот неуставленной природы.

На развернутом участке фонограммы (рис. 3а), соответствующему картине течения с выраженной тонкой структурой (рис. 1д), на спадающем участке видны отдельные звуковые пакеты со средней продолжительностью 100 мкс.

В частотном спектре (рис. 3б) присутствуют пики на $f = 314, 1570, 4400$ и 8960 Гц. В пространственном спектре возмущений поверхности жидкости (светлый контур на рис. 1д) выделяются масштаб 1.8 мм, отражающий микроструктуру, образованную плавными впадинами и острыми гребнями, и значительно более крупный масштаб 8.8 мм (рис. 3в), образованный скоплениями мелких неоднородностей.

КАРТИНА ТЕЧЕНИЙ И АКУСТИКА ИМПАКТА МНОЖЕСТВЕННЫХ КАПЕЛЬ (ЭКСПЕРИМЕНТ II)

Одновременно падающие капли усложняют картину течения, в которой доминируют плавающие пузыри и области затемнения (в местах падения капель) и просветления в местах выглаживания поверхности (рис. 4). В типичной картине течений большую площадь поверхности занимают плавающие воздушные пузыри.

Местоположение и форма затемненных областей заметно меняются от кадра к кадру (рис. 4а–4г). На первых двух кадрах выражены округлые темные пятна в центральной области, затем появляется длинный рукав (рис. 4в), а на рис. 4г – сложная фигура. Пузыри различного размера собираются в группы, конфигурация которых быстро меняется.

Типичная фонограмма с гидрофона, установленного в центре области падения капель на глубине 5 см (рис. 4д), в данной временной шкале имеет вид шумовой дорожки размахом 5 Па с отдельными выбросами до 10 Па. Спектры, измеренные в моменты времени, соответствующие кадрам на рис. 4а–4в, начинаются с частоты 1 кГц (рис. 4е1–4е3), однако с ростом частоты их поведение существенно различается. Спектр на рис. 4е1 имеет широкий двугорбый пик вблизи 1.1 кГц и небольшой локальный максимум на 2.7 кГц. Спектр на рис. 4е2 занимает тот же частотный диапазон, однако он чисто линейчатый и

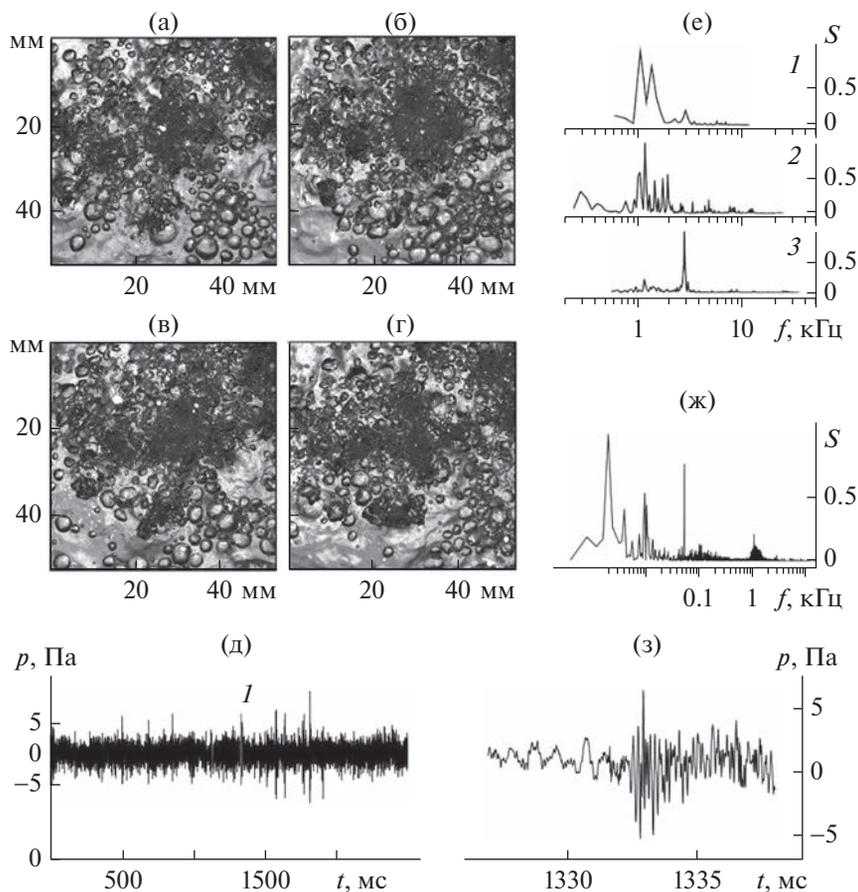


Рис. 4. (а–г) – Вид поверхности при падении множественных капель, $t_c = 30, 472, 682, 1129$ мс; (д) – полная фонограмма искусственного дождя; (е1–е3) – спектры участков длительностью 10 мс при $t = t_c$; (ж) – спектр и (з) – развертка участка 1 полной фонограммы.

занимает ряд частот 1.1, 1.2, 1.5, 1.7 и 2.0 кГц. В спектре на рис. 4е3 всего два одиночных пика на 1.1 и 2.7 кГц.

В спектре полного сигнала доминируют низкочастотные компоненты в диапазоне $f < 50$ Гц. Все высокочастотные составляющие ($f > 1$ кГц), присутствующие и в спектрах на рис. 4е, имеют значительно меньшие амплитуды. Они представлены короткими группами вблизи небольших пиков на частотах 1.1 и 2.7 кГц.

Растянутый фрагмент фонограммы длительностью 10 мс ($t = 1328–338$ мс) иллюстрирует поведение акустического сигнала вблизи отметки 1 (рис. 4д). Начальный участок представляет собой низкочастотный шум, который затем переходит в высокочастотные осцилляции, в спектре которых – два выраженных пика на частотах 5.5 и 11.0 кГц. Отметим, что в ранних работах в экспериментах по измерению акустического шума искусственного и естественного [27, 48] дождя спектральные пики наблюдались в диапазоне до 15 кГц.

Высокочастотный участок полного спектра (рис. 5а) содержит пики на частотах, неравномерно разбросанных в диапазоне 1–8 кГц. Наиболее значимые пики относятся к частотам 0.1, 1.0, 2.7, 3.7, 5.5 кГц. В растянутом участке (рис. 5б) вблизи метки 1 на рис. 5а заметны отдельные линии, промежуток между которыми сохраняется при дальнейшем растяжении шкалы частот (рис. 5в). Аналогичное поведение демонстрирует и участок 2 на рис. 5а – его растянутый участок (рис. 5г) также содержит разделяющиеся локальные максимумы по обе стороны от главного пика (7.8 кГц), которые на его растянутом фрагменте выглядят еще более отчетливо (рис. 5д).

На рис. 6 представлены пространственные спектры флуктуаций освещенности оптической картины (рис. 4а), взятые вдоль диагоналей (1, 2) и окружностей (3, 4) (рис. 6а).

Сканирование видеокadra на рис. 6а вдоль диагоналей 1 и 2 дает пространственные спектры (рис. 6б, кривые 1 и 2), занимающие одинаковые диапазоны масштабов (0.3–25 мм) и содержащие

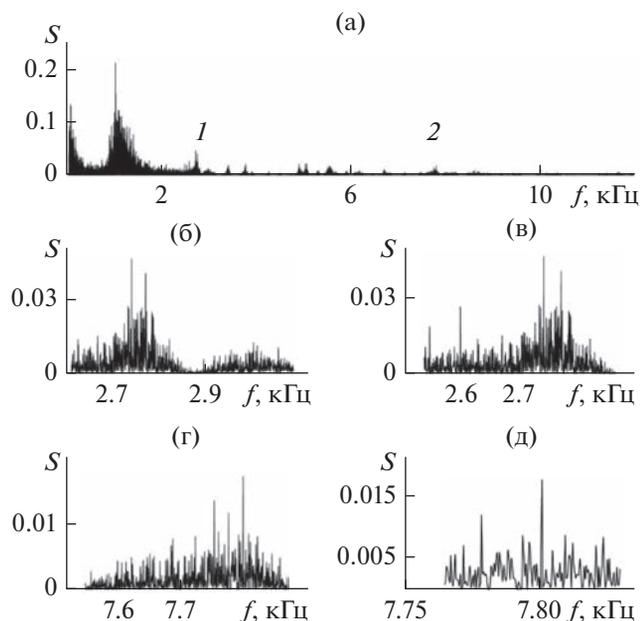


Рис. 5. (а) — Развертка высокочастотного участка спектра полной фонограммы (рис. 4ж) и (б–д) — его растянутые фрагменты в окрестностях локальных максимумов.

счетное количество пиков. Пиковые частоты спектров 1 и 2 не совпадают, что особенно выражено в мелкомасштабной области ($\lambda < 6.3$ мм) и менее — в крупномасштабной. Спектр вдоль диагонали 1 более разреженный, в нем преобладают пики вблизи масштабов 1.5, 3, 5 и 10 мм. Для спектра вдоль диагонали 2 характерно частое расположение пиков с нарастающей амплитудой в интервале 1.5–5 мм и спадающей в интервале 7–12 мм. Мелким масштабам соответствуют размеры пузырей в нижнем и верхнем углах диагонали, крупным — темные скопления у центра — места контакта капель.

Распределение масштабов по криволинейным траекториям — в данном случае, вдоль окружностей 3 ($R = 10$ мм) и 4 ($R = 22$ мм), выглядит более дискретным, особенно в мелкомасштабной части, и, в то же время, показывает сильное различие по составу спектральных линий и огибающей (рис. 6б, кривые 3 и 4). Спектр вдоль малой окружности 3 содержит два пика ($\lambda = 4.8$ и 9.6 мм), которые, с учетом двукратного различия в амплитудах, можно интерпретировать как основной (доминирующий) масштаб и субгармонику. Спектр большой окружности 4 резко отличается в мелкомасштабном диапазоне наличием выраженных пиков, обусловленных размерами разнокалиберных пузырей, беспорядочно распределенных вдоль окружности. Амплитуды максимумов сопоставимы с главными максимумами на масштабах $\lambda = 6.3$ и 10 мм. Наиболее крупномасштабные пи-

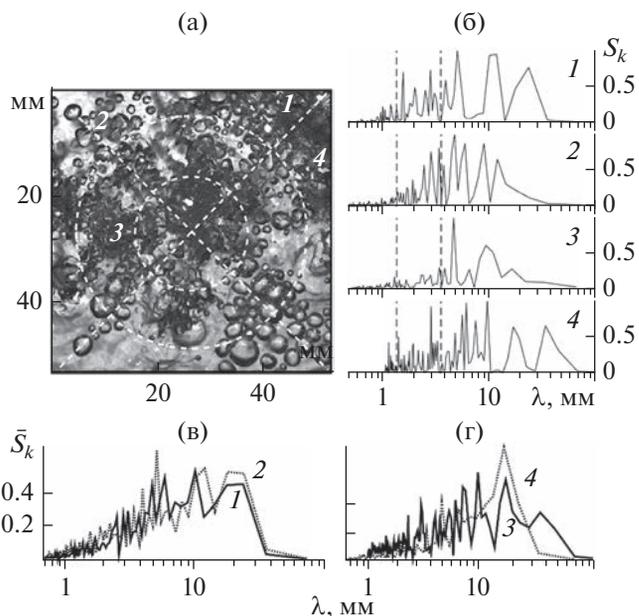


Рис. 6. (а) — Траектории сканирования освещенности при $t = 30$ мс; (б) — нормированные спектры S_k флуктуаций освещенности вдоль диагоналей 1, 2 и окружностей 3, 4 при $t = 30$ мс (кривые 1–4, отмечен диапазон измеренных размеров падающих капель); (в, г) — накопительные спектры в моменты $t = 30, 472, 500, 682, 1129$ и 2114 мс.

ки при $\lambda = 17.3$ и 34.6 мм оказываются кратными и имеют одинаковые амплитуды, что может свидетельствовать о присутствии двух периодических структур (скоплениях) с указанными масштабами.

На рис. 6в и 6г приведены накопительные спектры, полученные осреднением пространственных спектров по ряду моментов времени $t = 30, 472, 500, 682, 1129$ и 2114 мс. Накопительные спектры вдоль диагоналей (рис. 6в, 1 и 2) имеют признаки подобия, в них наиболее отчетливы масштабы вблизи 3 и 5 мм, которые присутствуют и в момент $t = 30$ (рис. 6б, 1 и 2).

Спектр вдоль большой окружности (рис. 6а, 4) кроме крупномасштабного пика имеет всего один выраженный максимум на масштабе 5 мм (рис. 6г, 4), присутствующем и в спектре вдоль малой окружности (рис. 6г, 3). Последний почти линейчатый, в нем присутствуют все встречающиеся в картине размеры пузырей. Значимый диапазон масштабов возмущений поверхности ограничен снизу максимальным размером (3 мм) падающих капель.

ВЫВОДЫ

Впервые проведены эксперименты, в которых получены акустические и оптические образы воз-

мущений, создаваемых периодическим и множественным соударением капель с возмущенной водной поверхностью.

При периодическом соударении в картине течения сохраняются те же структурные элементы (каверна, венец, всплеск, стример), что и в случае одиночной капли; однако они утрачивают симметрию. После нескольких соударений на поверхности появляются плавающие пузыри диаметром от 1 до 6 мм, число которых постепенно возрастает.

В фонограмме присутствует тот же набор сигналов, что и при ударе одиночной капли. При этом ударный импульс сопровождает каждый удар капли, а резонансный пакет отмечается лишь в редких случаях. Спектр полной фонограммы имеет два выраженных максимума – низкочастотный вблизи 0.2 кГц (связан с периодом падения капель) и более высокочастотный 0.7 кГц, обусловленный резонансным звучанием редких пузырей.

При множественном соударении картина течений, характерных для одиночной капли, полностью отсутствует. На поверхности плавают группы пузырей различной формы и размера. Текущие пространственные спектры имеют вид линейчатых, однако состав и расположение пиковых масштабов меняется в каждый момент времени. В накопительных спектрах, снятых вдоль прямых и окружностей, также преобладают линейчатые участки, в которых выделяются пики на частотах, встречающихся в спектрах для отдельных моментов времени.

Фонограмма множественного падения капель состоит из контрастных участков, одни из которых имеют вид шумовой дорожки, другие представляют собой отдельные резонансные пакеты. Соответственно, спектры отдельных реализаций являются сплошными, другие представляют ограниченный набор гармоник.

В спектре общей фонограммы выделяются два участка – низкочастотный (до 50 Гц), в котором сосредоточена основная энергия сигнала, и высокочастотный с максимальной граничной частотой 2.7 кГц.

В целях практической имплементации лабораторных данных целесообразно увеличивать число дозаторов с одновременным расширением диапазона скоростей соударения.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 19-19-00598). Эксперименты проведены на стенде ЭСП УИУ “ГФК ИПМех РАН”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Worthington A.M.* A Study of Splashes. Oxford, UK: Green, and Company, 1908. 129 p.

2. *Mallock H.R.A.* Sounds produced by drops falling on water // Proc. R. Soc. Lond. A. 1918. V. 95. P. 138–143.
3. *Jones A.T.* The sound of splashes // Science. 1920. V. 52. P. 295–296.
4. *Чашечкин Ю.Д.* Пакеты капиллярных и акустических волн импакта капли // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2021. № 1(94). С. 73–92.
5. *Franz G.J.* Splashes as sources of sound in liquids // J. Acoust. Soc. Am. 1959. V. 31. P. 1080.
6. *Minnaert M.* On musical air bubbles and the sounds of running water // Phil. Mag. 1933. V. 16. P. 235–248.
7. *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. P. 577–602.
8. *Gillot G., Derec C., Génevaux J.-M., Simon L., Benyahia L.* A new insight on a mechanism of airborne and underwater sound of a drop impacting a liquid surface // Phys. Fluids. 2020. V. 32. 062004. P. 1–10. <https://doi.org/10.1063/5.0010464>
9. *Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю.* Эволюция формы последовательных каверн импакта свободно падающей капли // Докл. Росс. Акад. наук. Физика, технические науки. 2021. Т. 501. С. 25–33.
10. *Howe M.S., Hagen N.A.* On the impact noise of a drop falling on water // J. Sound Vib. 2011. V. 330. № 4. P. 625–635.
11. *Чашечкин Ю.Д., Прохоров В.Е.* Эволюция структуры акустических сигналов, вызванных ударом падающей капли о жидкость // Акуст. журн. 2020. Т. 66. № 4. С. 377–390.
12. *Beacham S.T., Tilger C.F., Oehlschlaeger M.A.* Sound generation by water drop impact on surfaces // Experimental Thermal and Fluid Science. 2020. V. 117. 110138. P. 1–8.
13. *Прохоров В.Е., Чашечкин Ю.Д.* Генерация звука при падении капли на поверхность воды // Акуст. журн. 2011. Т. 57. № 6. С. 792–803.
14. *Phillips S., Agarwal A., Jordan P.* The sound produced by a dripping tap is driven by resonant oscillations of an entrapped air bubble // Sci. Rep. 2018. V. 8. № 1. Art. № 9515. P. 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-27913-0>
15. *Prokhorov V.E.* Acoustics of oscillating bubbles when a drop hits the water surface // Phys. Fluids. 2021. V. 33. P. 083314. P.1–9.
16. *Deka H., Ray B., Biswas G., Dalal A., Tsai P.-H., Wang A.-B.* The regime of large bubble entrapment during a single drop impact on a liquid pool // Phys. Fluids. 2017. V. 29. 09210.
17. *Руденко О.В., Маков Ю.Н.* Звуковой удар: от физики нелинейных волн до акустической экологии (обзор) // Акуст. журн. 2021. Т. 67. № 1. С. 3–30.
18. *Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю.* Распад капли на отдельные волокна на границе области контакта с принимающей жидкостью // Докл. Росс. Акад. наук. Физика, технические науки. 2021. Т. 497. С. 31–35.
19. *Gillot G., Simon L., Génevaux J.-M., Benyahia L.* Acoustic signatures and bubble entrainment mecha-

- nisms of a drop impacting a water surface with surfactant // *Phys. Fluids*. 2021. V. 33. 077114.
20. *Chashechkin Yu.D., Plynykh A.Yu.* Total coalescence, rebound and fast partial bounce: three kinds of interaction of free fallen drop with a target fluid // *FDMP*. 2020. V. 16. № 4. P. 801–811.
 21. *Rayleigh L.* On the equilibrium of liquid conducting masses charged with electricity // *Philosophical Magazine*. 1882. V. 14. № 87. P. 184–186.
 22. *Кистович А.В., Чашечкин Ю.Д.* Поверхностные колебания свободно падающей капли идеальной жидкости // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2018. Т. 54. № 2. С. 206–212
 23. *van Hinsberg N.P., Charbonneau-Grandmaison M.* Single-drop impingement onto a wavy liquid film and description of the asymmetrical cavity dynamics // *Phys. Rev. E*. 2015. V. 92. P. 013004. P. 1–12.
 24. *Pumphrey H.C., Crum L.A., Bjorno L.* Underwater sound produced by individual drop impacts and rainfall // *J. Acoust. Soc. Am.* 1989. V. 85. P. 1518–1526.
 25. *Wang A., Kuan C., Tsai P.* Do we understand the bubble formation by a single drop impacting upon liquid surface? // *Phys. Fluids*. 2013. V. 25. 101702.
 26. *Knudsen V.O., Alford R.S., Emling J.W.* Underwater ambient noise // *J. Marine Res.* 1948. V. 7. P. 410–429.
 27. *Bjorno L.* Underwater rain noise: sources, spectra and interpretations // *J. De Physique IV. Colloque C5. Supplement de J. De Physique 3*. 1994. V. 4. P. C5-1023–C5-1030.
 28. *Nystuen J.A., Moore S.E., Stabeno P.J.* A sound budget for the southeastern Bering Sea: Measuring wind, rainfall, shipping, and other sources of underwater sound // *J. Acoust. Soc. Am.* 2010. V. 128. № 1. P. 58–65.
 29. *Бардышев В.И.* Распределения спектральной плотности подводного шума в шельфовой зоне Тихого океана // *Акуст. журн.* 2010. Т. 56. № 3. С. 348–351.
 30. *Ashokan M., Latha G., Ramesh R.* Analysis of shallow water ambient noise due to rain and derivation of rain parameters // *Applied Acoustics*. 2015. V. 88. P. 114–122.
 31. *Liu S., Li Q., Shang D., Tang R., Zhang Q.* Measurement of underwater acoustic energy radiated by single raindrops // *Sensors*. 2021. V. 21. 2687. P. 1–16.
 32. *Pumphrey H.C., Crum L.A., Bjorno L.* Underwater sound produced by individual drop impacts and rainfall // *J. Acoust. Soc. Am.* 1989. V. 85. № 4. P. 1518–1526.
 33. *Kathiravelu G., Lucke T., Nichols P.* Rain Drop Measurement Techniques: A Review // *Water*. 2016. V. 8. P. 29.
 34. *Fehlmann M., Rohrer M., von Lerber A., Stoffel M.* Automated precipitation monitoring with the Thies disdrometer: Biases and ways for improvement // *Atmos. Meas. Tech.* 2020. V. 13. P. 4683–4698.
 35. *Осадкомер Третьякова.* <https://meteo59.ru/book/pribory-i-nablyudeniya/osadkomer.php>
 36. *Ma B.B., Nystuen J.A., Lien R.-C.* Prediction of underwater sound levels from rain and wind // *J. Acoust. Soc. Am.* 2005. V. 117. P. 3555.
 37. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Механика сплошных сред. Гидродинамика и теория упругости. М.: ОГИЗ. ГИТТЛ, 1944. 624 с.
 38. *Chashechkin Y.D.* Foundations of engineering mathematics applied for fluid flows // *Axioms*. 2021. V. 10. P. 286.
 39. *Эйзенберг Д., Кауцман В.* Структура и свойства воды. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 280 с.
 40. *Feistel R., Harvey A.H., Pawlowicz R.* International Association for the Properties of Water and Steam. Advisory Note No. 6: Relationship between various IAPWS documents and the International Thermodynamic Equation of Seawater-2010 (TEOS-10). 2016. P. 1–5.
 41. *Кистович А.В., Чашечкин Ю.Д.* Динамика гравитационно-капиллярных волн на поверхности неоднородно нагретой жидкости // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2007. Т. 43. № 1. С. 109–116.
 42. *Agbaglah G., Thoraval M., Thoroddsen S., Zhang L, Fezzaa K., Deegan R.* Drop impact into a deep pool: vortex shedding and jet formation // *J. Fluid Mech.* 2015. V. 764. R1. P. 1–12. <https://doi.org/10.1017/jfm.2014.723>
 43. *Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю.* Множественные выбросы брызг при ударе капли // *Докл. Рос. Акад. наук*. 2020. Т. 494. С. 42–46.
 44. 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). <https://ipmnet.ru/uniquequip/gfk/>
 45. *Чашечкин Ю.Д., Прохоров В.Е.* Гидродинамика удара капли: короткие волны на поверхности венца // *Докл. Акад. наук*. 2013. Т. 451. № 1. С. 41–45.
 46. *Чашечкин Ю.Д., Прохоров В.Е.* Структура первичного звукового сигнала при столкновении свободно падающей капли с поверхностью воды // *Журн. эксп. теор. физ.* 2016. Т. 149. № 4. С. 864–875.
 47. *Прохоров В.Е.* Ударное акустическое излучение при столкновении капли изменяющейся формы с поверхностью воды // *Письма в Журн. эксп. теор. физ.* 2020. Т. 112. № 9. С. 591–597.
 48. *Ma B., Nystuen J.A.* Passive acoustic detection and measurement of rainfall at sea // *J. atmospheric and oceanic technology*. 2005. V. 22. P. 1225–1248.