

УДК 53.091,532.69

## ПЕРЕНОС ВЕЩЕСТВА ОКРАШЕННОЙ КАПЛИ В СЛОЕ ЖИДКОСТИ С БЕГУЩИМИ ПЛОСКИМИ ГРАВИТАЦИОННО-КАПИЛЛЯРНЫМИ ВОЛНАМИ

© 2022 г. Ю. Д. Чашечкин\*

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, пр. Вернадского, 101, к. 1, Москва, 119526 Россия  
\*e-mail: yulidch@gmail.com

Поступила в редакцию 23.09.2021 г.

После доработки 01.11.2021 г.

Принята к публикации 08.12.2021 г.

Методами видеорегистрации прослежена эволюция картины распределения вещества капли чернил, свободно падающей на взволнованную поверхность жидкости. Система плоских поверхностных волн с частотой  $5.0 < f < 50$  Гц (длина волны  $0.7 < \lambda < 6.6$  см) создавалась вертикально осциллирующей заостренной полосой. Капли ализариновых чернил диаметром  $D = 0.5$  см свободно падали из дозатора и достигали контактной скорости  $U = 370$  см/с (режим формирования всплеска). В фазе первичного контакта окрашенная капля растекается во взволнованной жидкости так же, как в спокойной среде с образованием каверны, дно которой покрывает система окрашенных волокон, венца и всплеска. Растущий венец окружает группа тонких радиальных струек с вихревыми оголовками и отдельные пятна — следы возвратившихся ранее выброшенных капелек. Сохраняющаяся на поверхности окрашенная жидкость образует пятно неправильной формы, от которого отделяются погружающееся вихревое кольцо и приповерхностный вихревой диполь. Во всех компонентах течения краска длительное время сохраняется в форме тонких волокон вплоть до заключительной фазы размывания остаточными течениями и процессами молекулярной диффузии. Прослежены перемещения и общая структура разделившихся окрашенных областей.

**Ключевые слова:** гравитационно-капиллярные волны, капля, окраска, слияние, перенос вещества, волокна

**DOI:** 10.31857/S0002351522020031

Интерес к изучению процессов переноса вещества падающих в жидкость капель, механизмов формирования вихревых колец, волокнистая структура которых была отмечена уже в первых публикациях [1, 2], заметно вырос в последние годы. Детальные опыты позволили проследить эволюцию ряда структурных компонентов течений — мелких брызг, первичной каверны, выступающего на ее кромке венца, последующей центральной струйки (всплеска), захват газовых пузырьков и формирование медленно погружающегося вихревого кольца, образующего каскад вихрей, а также определить диапазон размерных и безразмерных параметров течений, в котором наблюдается изучаемый структурный компонент — составить карту режимов [3]. В дальнейшем перечень режимов течений был расширен, в дополнение к условиям растекания падающей капли с образованием всплеска в него вошли режимы отскока капли с сохранением объема и ее частичного

слияния с быстрым выбросом центрального ядра, потерявшего оболочку [4].

Усовершенствование осветительных приборов и видеорегистраторов позволило проследить эволюцию тонкой структуры течений на первых нано- и микросекундах процесса слияния, динамику выброса в атмосферу групп тонких брызг [5], разделения капли на отдельные волокна на границе области контакта сливающихся жидкостей [6]. После полного слияния капли на поверхности каверны и венца остается полосчатый и сетчатый рисунок, в котором вещество капли сохраняется на границах ячеек [7].

На последующем более продолжительном интервале происходит переформирование картины течения, образуются тонкие петли, группы вихрей [8], короткие кольцевые волны, охватывающие течение [9] и все новые структурные компоненты в центре течения — растущий всплеск, впадину или отрывающуюся каплю [10]. После

вырождения быстрых компонентов более тяжелая окрашенная жидкость постепенно опускается под действием сил инерции и плавучести и трансформируется в структурированный вихрь [1], порождающий каскад вторичных вихревых колец [2].

Сливающиеся капли вместе с растворенными и взвешенными веществами переносят в толщу жидкости газы, а вылетающие мелкие капельки (брызги), наоборот, выносят в атмосферу минеральные и органические вещества, активные соединения и биологические объекты (в частности, вирусы и бактерии, вызывающие распространение болезней растений и животных [11]). На интенсивность химических реакций и биологических процессов влияют тонкие структуры процессов переноса вещества капли в реагирующих средах [12]. Картина слияния также зависит от динамического состояния принимающей жидкости, которая может быть покрыта бегущими волнами, осциллировать с различной частотой, равномерно двигаться или вовлекаться в вихревое течение [13]. Поверхность капли искажают низкочастотные колебания [14] и короткие капиллярные волны [15].

В природных условиях капиллярные волны наблюдаются в широком диапазоне скоростей ветра в форме ряби в штиль [16], и, как паразитные волны на склонах длинных гравитационных волн, в штормовых условиях [17]. Короткие волны меняют шероховатость поверхности, влияют на обмен импульсом, энергией и веществом между атмосферой и океаном.

Теория капиллярных волн стала развиваться в конце XIX века, когда У. Томсон математически проанализировал собственные наблюдения картины волн впереди и позади рыболовной лески с борта дрейфующей яхты [18]. Результаты построенной теории капиллярных волн в идеальной жидкости вошли в основные трактаты по гидродинамике [19–21].

Полное дисперсионное уравнение для периодических возмущений с частотой  $\omega$  и волновым вектором  $k$  на поверхности вязкой однородной жидкости имеет более сложный вид [22]

$$2k(\omega^2 k_l - gk^2 - \sigma k^4 + 2i\omega\nu k_l(3k^2 - k_l^2)) - (k_l^2 + k^2)(\omega^2 - gk - \sigma k^3 + 2i\omega\nu k^2) = 0$$

и описывает собственно волны и сопутствующие тонкие течения – лигаменты ( $\sigma$  и  $\nu$  – коэффициенты поверхностного натяжения и кинематической вязкости,  $g$  – ускорение свободного падения). Регулярное решение уравнения равномерно

переходит в дисперсионное соотношение Томсона, описывающее поверхностные волны [18]. Сингулярному решению с волновым числом  $k_l$  соответствуют тонкие течения, влияющие на образование газовых пузырьков и генерацию звуковых пакетов падающими в жидкость каплями [10].

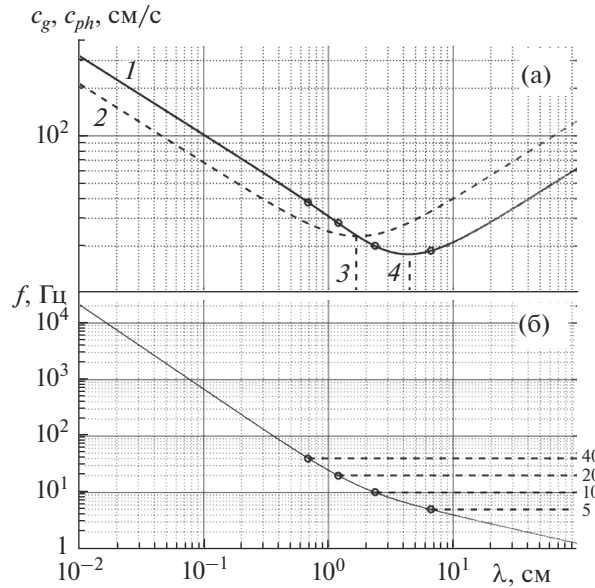
Неустойчивость капиллярных волн большой амплитуды, дробление, срыв гребней ветром [23] приводят к образованию мелких капель, высыхающих в атмосфере. Воздушные течения выносят минеральные остатки на большие высоты, где они служат центрами конденсации пара и формирования облаков, влияющих на погоду и климат планеты в целом [24].

Основная часть экспериментальных исследований переноса вещества капли посвящена изучению погружающихся вихрей в покоящейся жидкости [1, 2, 6–8, 10]. Во вращающейся жидкости окрашенная капля растекается с образованием спиральных рукавов и винтовых линий [13]. Визуализация наклонной каверны на склоне и в центре впадины бегущей нелинейной уединенной волны проведена в [25].

Учитывая распространенность поверхностных волн и капель в природных условиях, научный и прикладной интерес представляет изучение переноса импульса, энергии и вещества капли, свободно падающей на регулярно взволнованную поверхность. Цель данной работы – визуализация переноса вещества капли, падающей в жидкость с бегущими плоскими поверхностными волнами малой амплитуды при слабой выраженности нелинейных эффектов. Опыты выполнены в диапазоне параметров, соответствующих образованию всплеска в покоящейся жидкости [3, 4].

### ФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССОВ В ТОЛЩЕ И НА КОНТАКТНОЙ ПОВЕРХНОСТИ “АТМОСФЕРА–ГИДРОСФЕРА”

Методическую основу работы составляет система фундаментальных уравнений переноса массы, компонентов вещества, импульса и энергии, которые здесь для краткости не приводятся [20, 26]. При этом учитывается действие нескольких механизмов передачи энергии, как кинетической со слиянием капли, так и быстро освобождающейся доступной потенциальной поверхностной энергии (ДППЭ), сосредоточенной в шаровом слое толщиной порядка размера молекулярного кластера  $\delta \propto 10^{-6}$  см и объемом  $V_\sigma$  [8, 26] при уничтожении свободной поверхности сливающихся жидкостей.



**Рис. 1.** Условия опытов (отмечены точками) в двух формах представления дисперсионного соотношения для поверхностных волн: а) – зависимости групповой  $c_g$  (кривая 1) и фазовой скорости  $c_{ph}$  (2) от длины волны  $\lambda$ ; б) – частоты  $f = f(\lambda)$ ; метками 3 и 4 отмечены минимальные значения фазовой ( $c_{ph} = c_g = 23.13$  см/с) и групповой ( $c_g^{\min} = 17.77$  см/с) скорости волн.

В набор физических величин, определяющих динамику и структуру капельных течений, входят параметры контактирующих сред (индексами обозначены капля  $d$ , принимающая жидкость  $t$ , воздух  $a$ ): плотности  $\rho_d$ ,  $\rho_t$  и  $\rho_a$  (далее  $\rho_{d,t,a}$ ), кинематические  $\nu_{d,t,a}$  и динамические  $\mu_{d,t,a}$  вязкости; полные  $\sigma_d^a$ ,  $\sigma_t^a$  и нормированные коэффициенты поверхностного натяжения  $\gamma = \sigma_d^a / \rho_d$ ,  $\gamma = \sigma_t^a / \rho_t$  (здесь принималось  $\gamma = \sigma / \rho = 73 \text{ см}^3 / \text{с}^2$  при температуре  $T = 20^\circ\text{C}$ ); ускорение свободного падения  $g$ , диаметр  $D$ , площадь поверхности  $S_d$ , объем  $V$ , масса  $M$ , скорость  $U$  капли в момент контакта, кинетическая энергия  $E_k = MU^2/2$  и ДППЭ капли  $E_\sigma = \sigma S_d$ , плотности компонентов энергии  $W_E = E_k / V_d$ ,  $W_\sigma = E_\sigma / V_\sigma$ .

В данной серии опытов капли диаметром  $D = 0.5$  см свободно падали из дозатора. Контактная скорость капли, которая определялась по видеofilmам, составляла  $U = 370$  см/с, компоненты энергии  $E_k = 1.3 \times 10^4$  эрг,  $E_\sigma = 57.3$  эрг, и их плотности  $W_k = 67.5 \times 10^3$  эрг/см<sup>3</sup>,  $W_\sigma = 1.5 \times 10^7$  эрг/см<sup>3</sup>. Безразмерные параметры, “числа”, используемые при описании капельных течений, составляют: Рейнольдса  $Re = UD/\nu =$

$= 1.8 \times 10^4$ ; Фруда  $Fr = U^2/gD = 275$ , Бонда  $Bo = gD^2/\gamma = 6.7$ ; Онезорге  $Oh = \nu/\sqrt{\gamma D} = 0.02$ ; Вебера  $We = U^2 D/\gamma = 924$ , отношения компонентов энергии  $E_R = \frac{E_k}{E_\sigma} = 230$  и их плотностей  $W_R = \frac{E_k V_\sigma}{E_\sigma V_D} = 0.005$  попадают в диапазон условий, соответствующих образованию выраженного всплеска (кумулятивной струи) [3, 4]. Время передачи кинетической энергии капли принимающей жидкости составляет  $\tau_E = D/U \sim 1$  мс, а поверхностной энергии в зоне первичного контакта –  $\tau = \delta_c/U \sim 10$  нс.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Опыты выполнены на стенде “Эффекты свободной поверхности (ЭСП)”, входящем в состав Уникальной исследовательской установки “ГФК ИПМех РАН” [27]. Стенд включает прозрачный бассейн  $1.5 \times 0.4 \times 0.6$  м<sup>3</sup>, волнопродуктор поверхностных волн собственного изготовления, дозатор капель, осветительную и регистрирующую аппаратуру.

Рабочим элементом волнопродуктора служит заостренная ( $\sim 12^\circ$ ) клиновидная пластина длиной 300 мм и высотой 20 мм, вертикальные колебания которой возбуждались динамиком Ivolga Drive 8F. Пластина располагалась в центре бас-

сейна под небольшим углом к поперечной оси бассейна, так что быстро затухающие отраженные капиллярные волны непосредственно в область наблюдения не попадали.

Рабочая полоса частот волнопродуктора лежит в диапазоне  $1 < f < 70$  Гц, размах колебаний до 3 мм. Условия опытов отмечены на рис. 1, на графиках зависимости частоты  $f = \frac{\omega}{2\pi}$ , групповой  $c_g = \frac{\partial\omega}{\partial k}$  и фазовой скорости  $c_{ph} = \frac{\omega}{k}$  от длины волн  $\lambda$ .

Минимальная фазовая скорость волн на поверхности жидкости  $c_{ph} = c_g = \sqrt[4]{4g\gamma} = 23.13$  см/с достигается в точке пересечения кривых  $c_{ph}(\lambda) = c_g(\lambda)$  при  $\lambda_{\min} = 1.67$  см, минимальная групповая скорость составляет  $c_g^{\min} = 17.77$  см/с при волновом числе  $k_m = \sqrt{c_k \frac{g}{\gamma}} = 1.44$  см<sup>-1</sup>,  $c_k = \frac{(2\sqrt{3}-3)}{3}$ , длина волны  $\lambda = 4.36$  см. Ветви с нормальной дисперсией (фазовая скорость растет с увеличением длины,  $\lambda > \lambda_{\min}$ ) соответствуют гравитационно-капиллярные (ГКВ), а с аномальной дисперсией – капиллярно-гравитационные волны (КГВ).

Бассейн заполнялся частично дегазированной водопроводной водой. На глубине 5 см горизонтально располагался белый пластиковый экран, позволяющий реализовать прямой теневой метод наблюдения малоконтрастных возмущений поверхности прозрачной жидкости. Над бассейном устанавливались дозатор капель, волнопродуктор и видеокамера “Ortronis 3000x2”. Рабочая частота съемки составляла 50 Гц. Для сбора данных и управления экспериментом использовался специальный интерфейсный блок.

В ходе опытов вначале проводилась регистрация картины растекания окрашенной капли, падающей на невозмущенную поверхность, которая, как оказалось, количественно и качественно согласуется с данными опытов [7, 8]. В ходе продолжительной выдержки после проведения опыта внесенная краска размывалась процессами диффузии и остаточными движениями в бассейне, неустранимые колебания которого вызывались торможением поездов метро и дорожного транспорта. Когда следы окраски исчезали, включался волнопродуктор. После установления стационарного поля плоских волн последовательно включались камера и дозатор капель. Регистрация прекращалась, когда один из компонентов поверхностного течения выходил за границы поля наблюдения.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

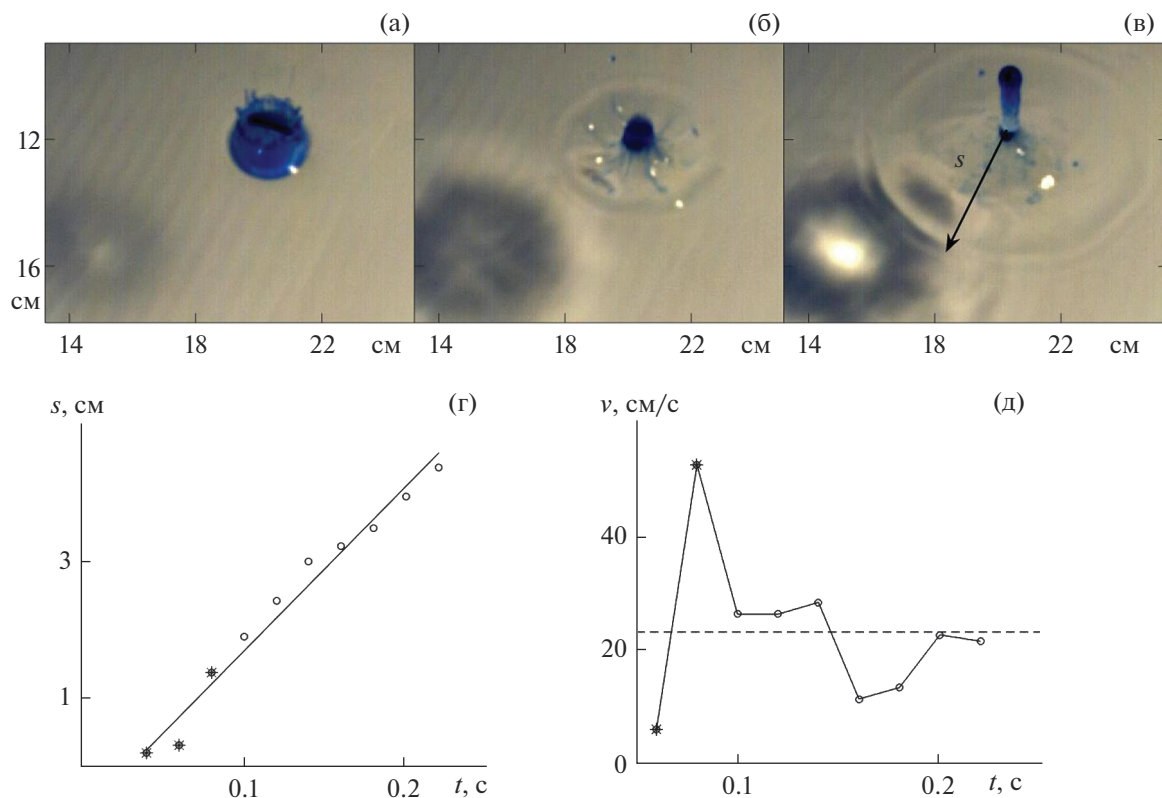
Как показали проведенные опыты, картина растекания капли, упавшей на взволнованную поверхность, на начальном этапе практически совпадает с наблюдаемой в невозмущенной жидкости [3–7] и слабо зависит от частоты базовых поверхностных волн. Картины слияния капли диаметром  $D = 0.5$  см,  $U = 370$  см/с с жидкостью, взволнованной короткими КГВ с частотой  $f = 40$  Гц и длиной  $\lambda = 0.7$  см приведены на рис. 2.

Неравномерно окрашенный венец с зубцами, всплеск в фазе роста, окруженный восьмью окрашенными петлями, и максимальной высоты с кольцевой системой капиллярных волн, представлены на рис. 2а–2в. В стадии погружения всплеска основная часть окрашенной жидкости собирается на его вершине и в основании. Изменения радиуса венца  $s$  и расходящегося кольцевого возмущения от времени приведены на рис. 2г. Скорость расширения венца и кольцевого фронта (рис. 2д), за исключением начального участка формирования, совпадает с минимальной скоростью распространения капиллярных волн  $c_{\min} = \sqrt[4]{4g\gamma}$  [19, 21]. Наблюдаемые отклонения от номинальных значений  $c_{\min}$  связаны с эффектами интерференции визуализирующих световых полей, затрудняющими определение положения гребня кольцевых волн. Структура изображения на отражающей поверхности показывает возможность применения невозмущающего теневого метода для определения амплитудно-фазовых параметров волн.

В ходе дальнейшей эволюции течений (при  $1.9 < t < 5$  с) краска распределяется в приповерхностном пятне сложной формы с вихревой структурой волокон и рукавами в головной части, окруженном облаком окрашенных мелких пятен (следов возвратившихся брызг) на рис. 3а).

Падающая капля имеет только вертикальную компоненту импульса. Однако в ходе распада капли от первичного пятна в области слияния отделяются идентифицируемые структурные элементы, каждый из которых имеет собственную форму и горизонтальную компоненту импульса, обеспечивающую продолжительное перемещение. Движение элементов прослеживалось после окончания быстрой начальной фазы формирования каверны и всплеска (время  $t$  отсчитывается от момента первичного контакта капли).

Распад первоначального пятна на отдельные структурные компоненты в данном опыте начинается при  $t = 0.38$  с. На ранней стадии при  $t = 1.9$  с от пятна отделяется кольцевой вихрь диаметром  $d \sim 1$  см. Судя по сближению с собственной тенью, вихрь погружается и одновременно смещается вле-



**Рис. 2.** Эволюция венца и каверны импакта капли в поле плоских капиллярно-гравитационных волн ( $f = 40$  Гц,  $\lambda = 0.7$  см,  $c_{ph}^{\min} = 23.1$  см/с): а–в) –  $t = 0.02, 0.08, 0.14$  с, г, д) – радиус и скорость расширения венца (звездочки) и гребня (кружки) капиллярных волн (штриховой линией отмечена минимальная фазовая скорость поверхностных волн).

во вдоль фазовой поверхности плоских волн. Угловое положение большого диаметра вихря меняется от кадра к кадру (рис. 3а–3в). В энергетическом спектре флуктуаций диаметра кольца (кривая 1 на рис. 3г),

$$S(f) = \frac{1}{f_s N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-i2\pi f n} \right|^2$$

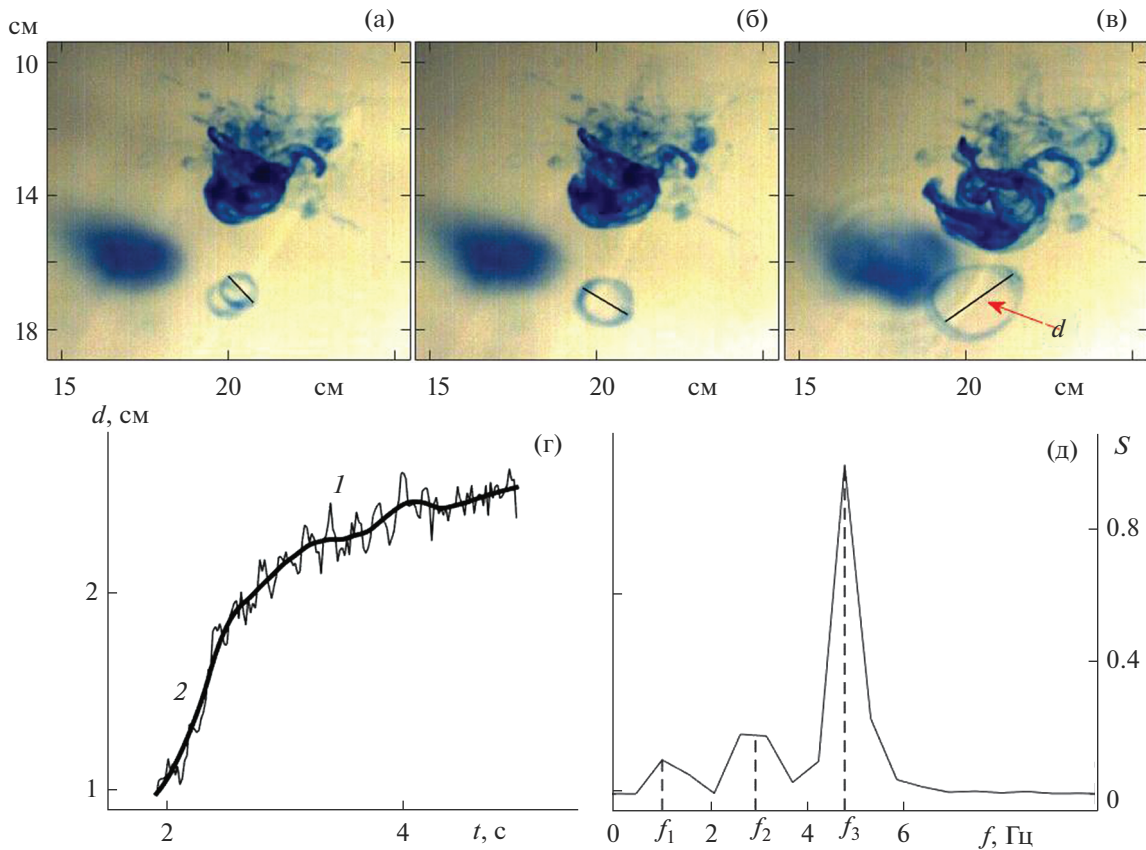
нормированном на собственный максимум, выражена пиковая частота 5 Гц (рис. 3д). Здесь  $x_n = d_n - \langle d \rangle$ ,  $d_n$  и  $\langle d_n \rangle$  текущий и средний по длительности реализации  $N$  диаметр кольца,  $f_s = N/T$ ,  $T$  – интервал наблюдения. В спектре также выражены осцилляции с частотами  $f = 1.0, 3.0, 5.0$  Гц. Частота бегущих волн совпадает с максимальной частотой осцилляций кольца.

Окрашенное пятно первичного контакта, располагающееся в приповерхностном слое жидкости, имеет сложную внутреннюю структуру с непрерывно перестраивающимися незамкнутыми волокнами кольцевой формы (рис. 3а–3в). Тень пятна на

экране оконтурена парой коротких кольцевых капиллярных волн.

В стадии распада окрашенной каверны и венца (рис. 4а) в поле плоских ГКВ ( $f = 5$  Гц,  $\lambda = 6.6$  см) округлое контактное пятно (как и на рис. 3а) за время  $t = 1.5$  трансформируется в структуру с остроконечными лучами (рис. 4б). От первичного пятна, направление перемещения которого составляет угол  $\theta = -45^\circ$  с групповой скоростью ГКВ, отделяется погружающийся кольцевой вихрь, который вначале перемещается довольно быстро  $u_r(0) = 5.1$  см/с. Описание течений здесь и далее проводится в правой лабораторной системе координат, одна ось которой совпадает с направлением групповой скорости ГКВ, вторая ось направлена вдоль фазовой поверхности бегущих плоских волн, а третья – вертикально.

Помимо погружающегося кольца, которое наблюдалось во многих опытах в покоящейся принимающей жидкости, в волновом поле формируется еще одна компактная структура, располагающаяся в приповерхностном слое, имеющая дипольный вихревой оголовок. За ним остается двойной окра-



**Рис. 3.** Начальная стадия растекания окрашенной капли в поле плоских ГКВ ( $f = 5$  Гц,  $\lambda = 6.6$  см,  $c_g = 18.7$  см/с): а–в) – картина течения при  $t = 1.9, 2.3, 5.0$  с. г) – зависимость диаметра вихревого кольца  $d$  от времени (кривые 1, 2 – текущее значение и скользящее осреднение с шагом 0.1; д) – энергетический спектр флуктуаций диаметра кольца.

шенный след, имеющий форму вытянутой петли, (отмечен стрелкой на рис. 4в).

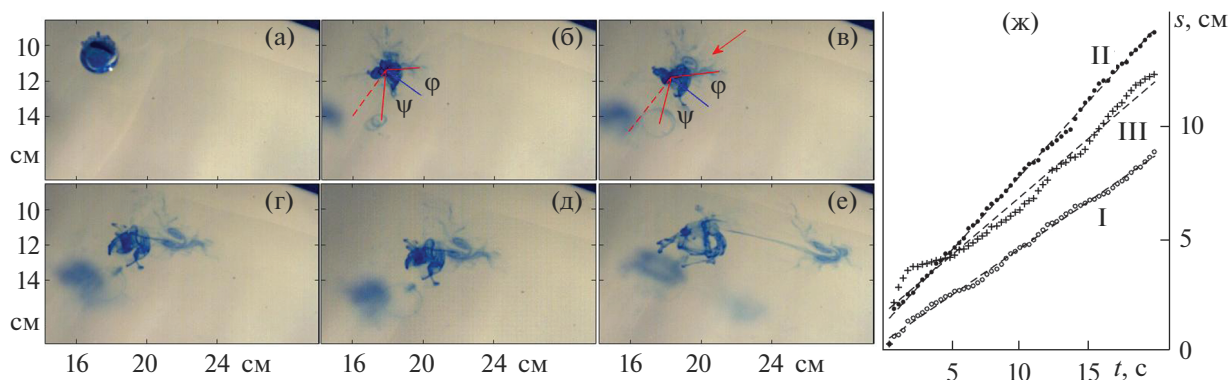
При  $f = 5$  Гц трансформация всплеска в нерегулярное пятно практически завершилась за время  $t = 0.38$  с, поверхностный диполь и погружающееся кольцо сформировались одновременно к моменту  $t = 0.72$  с. На кадрах (рис. 4б, в) сплошной линией обозначено направление групповой скорости, штриховой (красной) – положение фазовой поверхности, сплошными красными – направления перемещения кольцевого вихря и приповерхностного диполя, составляющие угол  $\varphi = 39.7^\circ$  и  $45.0^\circ$  при  $t = 1.5$  и  $3.5$  с с групповой скорости плоских волн.

Постепенно донный кольцевой вихрь размывается, а диполь вытягивается в петлю с вихревыми оголовками (рис. 4г), и далее – в грибовидную структуру (рис. 4д). Вихревая петля с законцовками окружена разделенными окрашенными волокнами, часть которых ориентирована нормально, часть – вдоль ее границы. В течение последу-

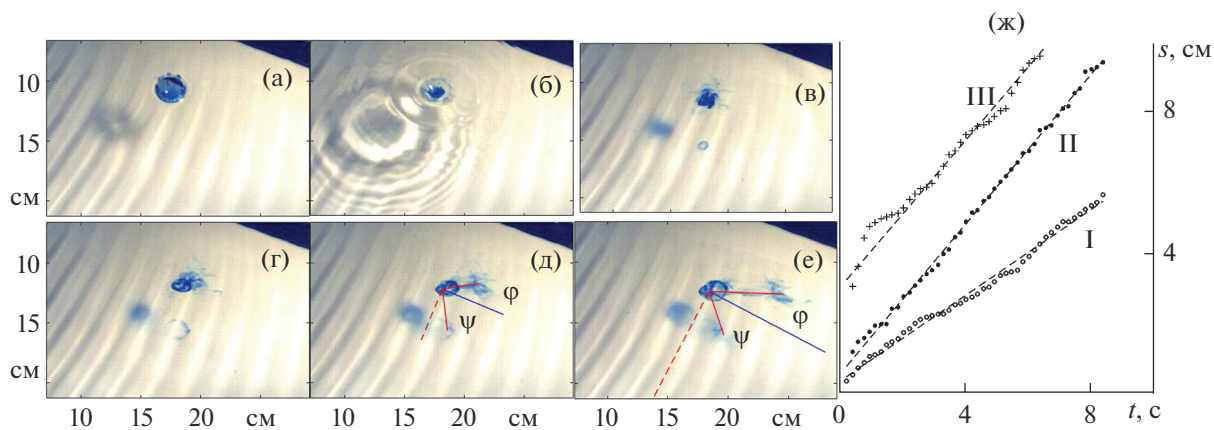
ющих  $\Delta t = 10$  с (рис. 4д) центральное пятно трансформируется в перечеркнутое кольцо, соединенное окрашенными волокнами с отошедшим диполем (рис. 4е). Продолжающиеся медленно двигаться окрашенные области постепенно размываются под действием процессов диффузии, волновых и остаточных течений в бассейне.

Расстояния от центра области слияния, которые проходят выделенные структурные компоненты, приведены на рис. 4ж в лабораторной системе координат. Разделившиеся вихрь и диполь перемещаются в горизонтальном направлении практически равномерно везде, за исключением начального участка, где они испытывают взаимное влияние. Смещения компонентов аппроксимируются линейной функцией  $s_i = u_i t + c_i$ , в которой ( $p$ ) индекс соответствует пятну, ( $d$ ) – приповерхностному диполю и ( $r$ ) – погружающемуся кольцу.

Наиболее медленно перемещается основное пятно окрашенной жидкости, визуализирующее



**Рис. 4.** Эволюция картины растекания капли окрашенной жидкости упавшей в поле плоских волн ( $f = 5$  Гц,  $\lambda = 6.6$  см,  $c_g = 18.7$  см/с): а–е) –  $t = 0.2, 1.5, 3.5, 6.0, 7.5, 17.5$  с; д) – кривые I–III смещения центров пятна, диполя и кольца (значки – измерения, прямые – линейные аппроксимации).



**Рис. 5.** Эволюция картины растекания окрашенной капли в поле плоских волн ( $f = 10$  Гц,  $\lambda = 2.4$  см,  $c_g = 20.1$  см/с): а–е) –  $t = 0.04, 0.2, 1.1, 2.5, 4.3, 7.6$  с; д) – кривые (I–III) – перемещения первичного пятна, передней кромки диполя и центра погружающегося кольца.

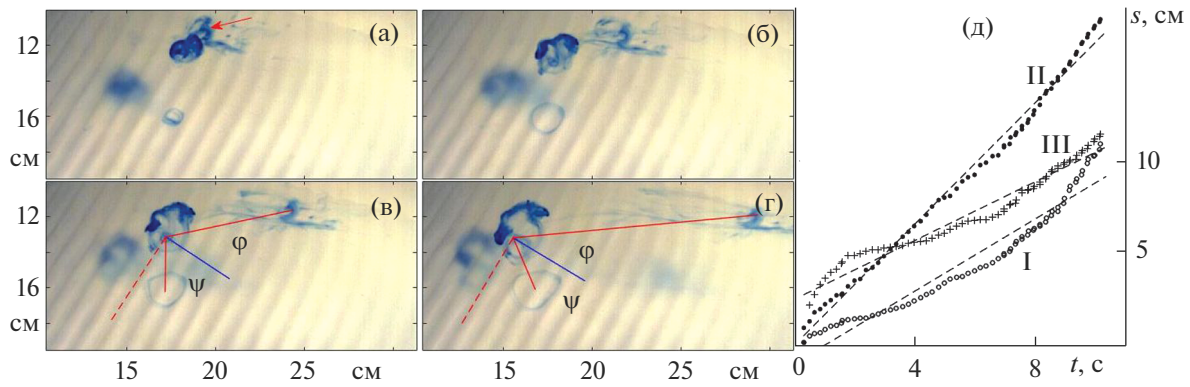
область слияния капли (кривая I –  $u_p = 0.40$  см/с,  $c_p = 0.5$  см). Передняя кромка приповерхностного диполя перемещается в среднем со скоростью  $u_d = 0.66$  см/с,  $c_d = 1.29$ , на начальном участке  $u_d(0) = 5.1$  см/с (кривая II на рис. 4ж). Погружающееся вихревое кольцо (кривая III, рис. 4ж) движется чуть медленнее ( $u_r = 0.50$  см/с,  $c_r = 1.8$  см, в начале  $u_r(0) = 5.1$  см/с). Вихрь движется к центру волнового поля, его траектория составляет угол  $\psi = -62.6$  и  $-68.5^\circ$  при  $t = 1.5$  и  $3.5$  с.

С увеличением частоты поверхностных волн (рис. 5,  $f = 10$  Гц,  $\lambda = 2.4$  см) сохраняется общая структура начальной фазы картины течения и увеличивается контрастность наложенных волновых полей (рис. 5а). Кольцевая капиллярная

волна с минимальной скоростью распространения, отделяющая от венца пять более быстрых (и более коротких волн, видимых на теневой проекции), представлена на рис. 5б. Формирующийся всплеск окружен собственной группой коротких капиллярных волн, которым соответствует яркое светлое кольцо на тени течения.

Выход кольцевых капиллярных волн из поля зрения при  $t = 0.34$  с совпадает с окончанием перестройки каверны и всплеска в окрашенное пятно первичного контакта нерегулярной формы, которое смещается прямолинейно  $s_p = u_p t + c_p$  в направлении, составляющем угол  $\theta = -26.9^\circ$  с групповой скоростью волн  $c_g$ .

При  $t = 0.52$  с от пятна, окруженного системой волокон, отделяется погружающееся вихревое



**Рис. 6.** Эволюция картины растекания окрашенной капли в поле плоских волн ( $f = 20$  Гц,  $\lambda = 1.2$  см,  $c_g = 28.2$  см/с): а–г) –  $t = 2.5, 4.5, 6.5, 10.5$  с, д) – кривые I–III – смещения первичного пятна, передней кромки диполя и центра погружающегося кольцевого вихря.

кольцо диаметром  $d_r = 0.63$  см, и приповерхностный диполь, тонкие волокна в котором постепенно собираются в отдельные группы – пряди. Кольцо перестраивается ( $d_r = 1.1$  см  $t = 1.1$  с, рис. 5в), при  $t = 2.5$  с в нем наблюдаются прозрачные перетяжки и окрашенное утолщение (рис. 5г). Достигая дна, кольцо останавливается, теряет регулярную форму (рис. 5д), начинает расширяться и размываться.

Со временем волокнистая структура главного пятна становится еще более контрастной, длина приповерхностной струйки растет. В интервале  $7.6 < t < 11$  с планарная петля трансформируется в сложную волокнистую структуру (рис. 5е), график зависимости длины которой от времени показан на рис. 5ж. Быстрая эволюция тонкой структуры течения служит свидетельством влияния тонких лигаментов, дополняющих кольцевые и плоские волны [18, 19] на динамику переноса и перераспределения вещества.

Как и в предыдущем опыте, горизонтальные перемещения компонентов аппроксимируются линейными функциями с постоянной горизонтальной компонентой скорости  $s_i = u_i t + c_i$ . Основное пятно окрашенной жидкости – остаток области слияния капли с принимающей жидкостью, движется со средней скоростью  $u_p = 0.6$  см/с,  $c_p = 0.3$  см под углом  $\theta = -26.9^\circ$  к групповой скорости плоских волн (рис. 5ж, кривая I).

Передняя кромка приповерхностного диполя (кривая II на рис. 5), перемещается со средней скоростью  $u_d = 1.1$  см/с (на начальном участке  $u_d(0) = 7.6$  см/с),  $c_d = 0.5$  см в направлении, составляющем  $\phi = 60^\circ$  и  $31.4^\circ$  с групповой скоростью при  $t = 4.3$  и  $7.6$  с. Здесь на начальном участке

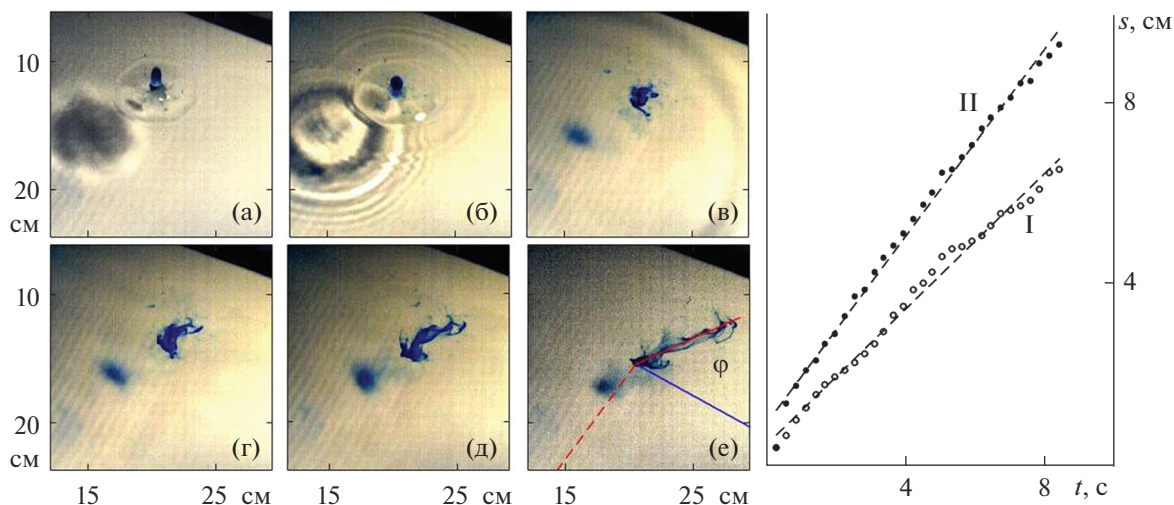
наиболее быстро движется вихревое кольцо ( $u_r(0) = 7.6$  см/с, в среднем  $u_r = 1.1$  см/с,  $c_r = 2.9$  см – кривая III рис. 5ж) под углом  $\psi = -55.7^\circ$  и  $-30.2^\circ$  к групповой скорости при  $t = 4.3$  и  $7.6$  с.

Структура течения сохраняет основные свойства при дальнейшем увеличении частоты плоской волны, в данном опыте  $f = 20$  Гц,  $\lambda = 1.2$  см (рис. 6). Преобразование каверны и венца в первичное пятно структурированной жидкости завершается к  $t = 0.26$  с, когда начинает отделяться струйка, преобразующаяся в вихревой диполь. Погружающееся кольцо отделяется от пятна при  $t = 0.44$  с.

Основная масса окрашенной жидкости капли остается в приповерхностном пятне, которое перемещается вдоль генеральной кривой I, составляющей угол  $\theta = -23.7^\circ$  с направлением групповой скорости плоских волн (рис. 6ж). Скорость центра пятна равна  $u_p = 0.97$  см/с,  $c_p = -0.87$  см/с. Волокнистая картина распределения краски в пятне непрерывно перестраивается и постепенно формирует систему петель.

Вытекающая из пятна приповерхностная окрашенная струйка (рис. 6б), трансформируется в вихревой диполь, передняя кромка которого на начальном участке смещается со скоростью  $u_d(0) = 4.5$  см/с, а на основном равномерном участке  $u_d = 1.63$  см/с,  $c_d = 0.15$  см/с (кривая I, рис. 6ж). Направление движения диполя составляет  $\phi = 45.2^\circ$  и  $36.3^\circ$  при  $t = 6.5$  и  $10.5$  с. Струйка распадается на пряди – систему волокон, движущихся практически с постоянной скоростью (рис. 6в, 6г). Положение переднего фронта приповерхностной струйки показано на рис. 6д, кривая II.





**Рис. 7.** Эволюция картины растекания окрашенной капли в поле плоских волн ( $f = 40$  Гц,  $\lambda = 0.7$  см,  $c_g = 37.8$  см/с): а–е) –  $t = 0.02, 0.2, 1.1, 2.5, 4.3, 7.6$  с; д) – кривые I–III) – смещения первичного пятна и передней кромки диполя.

Вихревое кольцо (начальная скорость  $u_r(0) = 5.8$  см/с) быстро тормозится и на основном участке нерегулярной траектории, располагающейся под углом  $\psi = -57.6^\circ$  и  $-35.8^\circ$  оси абсцисс, составляет  $u_r = 0.79$  см/с,  $c_r = 2.57$  см. При  $t = 10.5$  с его диаметр достигает  $d_r = 2.6$  см (рис. 6г).

В начальной фазе растекания капли в поле высокочастотных КГВ (рис. 7,  $f = 40$  Гц,  $\lambda = 0.7$  см) при  $t = 0.28$  с венец и всплеск преобразуются в первичное пятно неправильной формы с выраженными вихревыми включениями, окруженное мелкими пятнышками – следами упавших брызг (рис. 7а). С уменьшением длины плоских капиллярных волн все более отчетливо визуализируется система кольцевых капиллярных волн (рис. 7б), охватывающих область слияния капли [9, 19]. Как и в предыдущих опытах, основная часть вещества капли собирается на вершине и в основании растущего всплеска, окруженного остатком расплывающегося венца.

На фоне высокочастотных плоских капиллярных волн выделены пакеты кольцевых капиллярных волн (за коротковолновым фронтом  $\lambda = 0.5$  см следуют более длинные волны  $\lambda = 0.7$  и  $1.1$  см), которые регистрируются в интервале  $0.1 < t < 2.0$  с (рис. 7б). Перемещение центра основного пятна (нерегулярная кривая I на рис. 7ж), ориентированное под углом  $\theta = -53.5^\circ$  аппроксимируется линейной функцией  $s_p = u_p t + c_p$ ,  $u_p = 0.75$  см/с,  $c_p = 0.45$  см.

Приповерхностный вихрь, который начинает идентифицироваться при  $t > 0.56$  с, равномерно

движется по прямой со скоростью передней кромки  $u_d = 1.04$  см/с,  $s_0 = 0.92$  см. Направление его движения составляет угол  $\varphi = 62.6^\circ$  с направлением групповой скорости плоских волн.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенные опыты показывают, что во всех случаях вещество капли переносится во взволнованной жидкости неравномерно с образованием нескольких независимо движущихся компактных вихревых элементов со сложной внутренней волокнистой структурой. Распад компактного пятна на отдельные волокна, разделенные принимающей жидкостью, свидетельствует о влиянии тонких лигаментов, сопровождающих плоские бегущие волны и нестационарные кольцевые волны импакта капли. Наложение изменчивых компонентов, и крупных (волн и вихрей), и тонких, число которых растет со временем вследствие эффектов нелинейного взаимодействия [26], усложняет картину течения.

Образование волокон связывается с неоднородностью распределения компонентов внутренней энергии, включающей доступную потенциальную энергию в течениях со свободной поверхностью, и химическую энергию, обусловленную неоднородностью распределения концентрации растворенных веществ, а также различием темпа передачи или освобождения энергии.

Картины полей независимых базовых параметров течений жидкости – плотности, концентрации растворенных компонентов, импульса и полной энергии, существенно отличаются след-

ствии различия механизмов и скоростей переноса каждой из инвариантных величин. При этом вещество и полная энергия сохраняются на всех этапах процесса растекания капли, а импульс уменьшается за счет вязкой диссипации. Механизм распада компактного пятна на первоначально быстро движущиеся вихревые компоненты различных размеров, включающие кольцевые вихри и вихревые диполи, а также тонкие волокна, нуждается в дополнительном изучении.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На доработанной установке ЭСП УИУ “ГФК ИПМех РАН” методом видеорегистрации впервые экспериментально прослежен перенос вещества свободно падающей капли чернил в жидкости с бегущими плоскими гравитационно-капиллярными волнами с частотой  $5 < f < 50$  Гц (в диапазоне минимума групповой скорости распространения волн  $18.7 < c_g < 37.8$  см/с).

В режиме образования всплеска ( $D = 0.5$  см,  $U = 370$  см/с),  $D = 0.5$  см,  $U = 370$  см/с, на начальном этапе растекания вещество капли распространяется в жидкости с взволнованной поверхностью также, как в покоящейся жидкости с образованием лигаментов – тонких волокон и их сборок – прядей – на стенках каверны, боковой поверхности и шевроне венца. Далее в области слияния капли образуется структурированное окрашенное пятно, медленно  $0.4 < u_p < 0.97$  см/с, по сравнению с групповой скоростью плоских волн  $c_g$ , дрейфующее вдоль линейной траектории, составляющей угол  $23.7^\circ < -\vartheta < 53.5^\circ$  с направлением распространения бегущих волн. Постепенно контрастность волокнистой картины уменьшается вследствие диффузии чернил и воду и, наоборот, воды в окрашенные волокна.

В процессе перемещения окрашенный след импакта капли распадается на несколько независимых структурных компонентов, включающих погружающийся кольцевой вихрь и приповерхностный вихревой диполь. Каждый из компонентов течения длительное время сохраняет свою геометрию и перемещается по близкой к линейной траектории.

Вихрь диаметром  $0.5 < d_r < 1$  см движется со скоростью  $0.5 < u_r < 1.1$  см/с по приближенно прямолинейной траектории, составляющей угол  $31.4^\circ < |\psi| < 68.5^\circ$  (в неравенстве приведен модуль угла  $\psi$   $31.4^\circ < \psi < 68.5^\circ$  с направлением групповой скорости  $c_g$ ). Вихревой диполь перемещается по траектории, составляющей угол  $31.4^\circ < \varphi < 62^\circ$  с

направлением  $c_g$  со скоростью  $0.7 < u_d < 1.1$  см/с. Образование погружающегося вихря и приповерхностного диполя наблюдалось во всем диапазоне частот, включающем обе ветви дисперсионной кривой.

Быстрая эволюция тонкой структуры течения указывает на важную роль дополняющих волны лигаментов на процессы переноса и перераспределения вещества. Физическая природа механизма распада компактного пятна, образованного сливающейся каплей, на независимо движущиеся вихри, отдельные волокна и пряди, нуждается в дальнейшем изучении.

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

Автор благодарен к.т.н. В.Е. Прохорову за помощь в проведении экспериментов и обработке данных.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rogers W.B.* On the formation of rotating rings by air and liquids under certain conditions of discharge // *Am. J. Sci. (Ser. 2)*. 1858. V. 26. P. 246–268. <https://biodiversitylibrary.org/page/36868460>.
2. *Thomson J.J., Newall H.F.* On the formation of vortex rings by drops falling into liquids, and some allied phenomena // *Proc. R. Soc. London*. 1885. V. 29. P. 417–436. <https://doi.org/10.1098/rspl.1885.0034>
3. *Ray B., Biswas G., Sharma A.* Regimes during liquid drop impact on a liquid pool // *J. Fluid Mech.* 2015. V. 768. P. 492–523. <https://doi.org/10.1017/jfm.2015.108>
4. *Chashechkin Yu.D., Пуныкх А.Ю.* Total coalescence, rebound and fast partial bounce: three kinds of interaction of free fallen drop with a target fluid // *Fluid Dynamics & Material Processing (FDMP)*. 2020. V. 16. № 4. P. 801–811. <https://doi.org/10.32604/fdmp.2020.09168>
5. *Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю.* Множественные выбросы брызг при ударе капли // *Доклады РАН*. 2020. Т. 494. С. 42–46. <https://doi.org/10.31857/S2686740020050181>
6. *Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю.* Распад капли на отдельные волокна на границе области контакта с принимающей жидкостью // *Докл. Российской академии наук. Физика, Технические науки*. 2021. Т. 497. С. 31–35. <https://doi.org/10.31857/S2686740021020139>
7. *Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю.* Полосчатые структуры в картине распределения вещества капли по поверхности принимающей жидкости // *Докл.*

- Российской академии наук. Физика, Технические науки. 2018. Т. 481. № 2. С. 145–150.  
<https://doi.org/10.1134/S1028335818070066>
8. Чашечкин Ю.Д. Эволюция тонкоструктурного распределение вещества свободно падающей капли в смешивающихся жидкостях // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 3. С. 67–77.  
<https://doi.org/10.1134/S0001433819020026>
  9. Zhu G.-Z., Li Z.-H., Fu D.-Y. Experiments on ring wave packet generated by water drop // Chin. Scie. Bul. 2008. V. 53(11). P. 1634–1638.
  10. 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.  
<https://doi.org/10.18698/1812-3368-2021-1-73-92>
  11. de Oliveira Silva A., Savi D.C., Raiser P.H.S. et al. Epidemiological aspects of *Phyllosticta citricarpa* colonization and viability in *Citrus sinensis* // J. Plant. Dis. Prot. 2017. V. 124. P. 73–80.  
<https://doi.org/10.1007/s41348-016-0046-8>
  12. Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю. Формирование системы наклонных петель в течениях импакта капли // Докл. Физика, технические науки, 2021. Т. 499. С. 39–48.  
<https://doi.org/10.31857/S2686740021040052>
  13. Степанова Е.В., Чаплина Т.О., Трофимова М.В., Чашечкин Ю.Д. Структурная устойчивость процесса переноса вещества из компактного пятна в составном вихре // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48. № 5. С. 578–590.  
<https://doi.org/10.1134/S000143381205009X>
  14. Rayleigh. On the capillary phenomena of jets // Proc. R. Soc. London. 1879. V. 29. P. 71–97.
  15. 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.  
<https://doi.org/10.7868/S0003351518020095>
  16. Toffoli A., Bitner-Gregersen E. M. Types of ocean surface waves, wave classification // Encyclopedia of maritime and offshore engineering. N.Y.: John Wiley & Sons, Ltd. 2017.  
<https://doi.org/10.1002/9781118476406.emoe077>
  17. Hung L.-P., Tsa W.-T. The Formation of parasitic capillary ripples on gravity–capillary waves and the underlying vortical structures // J. Phys. Oceanogr. 2009. V. 39. Iss.2. P. 263–269.
  18. Thomson W. Hydrokinetic solutions and observations // Phil. Mag. 1871. V. 42. P. 362–377.  
<https://doi.org/10.1017/cbo9780511694523.031>
  19. Лэмб Г. Гидродинамика. М.–Л.: ГИТТЛ, 1949. 928 с.
  20. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика сплошных сред. Гидродинамика и теория упругости. Т. 3. М.–Л. ОГИЗ. ГИТТЛ. 1944. (и все последующие издания)
  21. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика. Часть 1. М., 1963. 584 с.
  22. 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.
  23. Theofanous T.G. Aerobreakup of Newtonian and viscoelastic liquids // Annu. Rev. Fluid Mech. 2011. V. 43(1). P. 661–690.
  24. Mingjin Tang M., Cziczo D.J., Grassian V.H. Interactions of Water with Mineral Dust Aerosol: Water Adsorption, Hygroscopicity, Cloud Condensation, and Ice Nucleation // // Chemical Reviews. 2016. V. 116(7) P. 4205–4259.  
<https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00529>
  25. 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. 013004 1–12.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.92.013004>
  26. Chashechkin Y.D. Foundations of engineering mathematics applied for fluid flows // Axioms. 2021. V. 10. 286.  
<https://doi.org/10.3390/axioms10040286>
  27. УИУ “ГФК ИПМех РАН”:  
<http://www.ipmnet.ru/uniquequip/gfk/#equip>

## Transfer of the Substance of the Colored Drop in the Liquid Layer with Running Plane Gravitational-Capillary Waves

Yu. D. Chashechkin\*

A. Yu. Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Vernadsky Ave., 101, building 1, Moscow, 119526 Russia  
 \*e-mail: yulidch@gmail.com

The evolution of the distribution pattern of an ink droplet freely falling on the surface of an agitated liquid is traced by video recording methods. A system of running plane gravity-capillary waves with a frequency of  $5.0 < f < 50$  Hz (wavelength  $0.7 < \lambda < 6.6$  cm) was created by a vertically oscillating pointed strip. Drops of alizarin ink with a diameter of  $D = 0.5$  cm fell freely from the dispenser (contact velocity  $U = 370$  cm/s)

in the mode of splash formation. In the phase of primary contact and coalescence, the substance of a drop merging with a wavy liquid spreads as in a quiet medium with the formation of a system of fibers on the surface of a cavity, a crown, and a splash, which are surrounded by a group of thin radial jets with vortex heads and separate spots - traces of returned early ejected droplets. Subsequently, the colored liquid is divided into three independently moving formations - a finely structured area of primary contact of an irregular shape, a submerging vortex ring, and a near-surface vortex dipole, in which the paint is distributed in the form of thin fibers. The fibrous distribution of the droplet substance is retained at all subsequent stages of evolution up to erosion by residual flows and processes of molecular diffusion. The geometry of movement and the general structure of the separated colored areas are traced.

**Keywords:** gravitational-capillary waves, drop, color, coalescence, transfer of matter, filaments