

УДК 532.5

ФОРМИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ НАКЛОННЫХ ПЕТЕЛЬ В ТЕЧЕНИЯХ ИМПАКТА КАПЛИ

© 2021 г. Ю. Д. Чашечкин^{1,*}, А. Ю. Ильных^{1,**}

Представлено академиком РАН Д.М. Климовым 13.05.2021 г.

Поступило 13.05.2021 г.

После доработки 13.05.2021 г.

Принято к публикации 24.05.2021 г.

Методами высокоразрешающей фото- и видеорегистрации впервые прослежен процесс формирования и реструктуризации регулярной системы наклонных петель, содержащих вещество свободно падающей окрашенной капли, в толще принимающей жидкости. Петли длиной до 1.5 см, внедряющиеся в жидкость в режиме формирования всплеска, вытягиваются из небольших вихорьков, деформирующих стенку растущей каверны в узлах первичной сетки — областях накопления вещества капли. Существующие до 60 мс петли деформируются и переносятся интенсивными приповерхностными течениями в начальной фазе развития всплеска. Изменение общей структуры течения сопровождается образованием новых типов волокнистых структур распределения вещества капли. Быстро развивающиеся системы окрашенных волокон, существующие на всех этапах эволюции процессов импакта капли, вплоть до образования каскада колец, нарушают осевую симметрию течений.

Ключевые слова: окрашенная капля, распространение вещества, волокна, эксперимент

DOI: 10.31857/S2686740021040052

Фундаментальность процессов и разнообразие приложений объясняют расширение исследований импакта капли — последовательности физических и гидродинамических процессов при слиянии с покоящейся жидкостью. Сложность явления иллюстрирует факт отсутствия математической модели образования волокон, замеченных еще в первых опытах [1]. Появление новых инструментов — искровых источников света [2], фоторегистраторов [3], ламп-вспышек [4], источников ультрафиолетового и рентгеновского излучения [5], быстродействующих фото- и видеокамер [6], импульсных лазеров, позволяет регистрировать картину течения с субмикронным разрешением и долями микросекунд по времени (в [7] частота съемки до 10^7 к/с). Расчеты, выполненные для осесимметричных течений [7, 8], согласуются с данными экспериментов “на просвет”, визуализирующими контуры течения.

Новые методики, показывающие трехмерную природу течений импакта капли [9], выделяют быстрые плоские струйки [10], группы брызг

(мелких капель), циклически вылетающих наружу [11] и внутрь течения, где они попадают на поверхность сливающейся капли [12]. Прослежена последовательность процессов генерации различных волн: капиллярных — вне и внутри каверны и акустических — высокочастотных пакетов первичного контакта и более низкочастотных запаздывающих [13]. Картина течений быстро эволюционирует вследствие эффектов нелинейного взаимодействия и диссипации как собственно волн [14], так и сопутствующих тонких течений — лигаментов [15].

Отдельный интерес представляет изучение распределения вещества падающей капли в принимающей жидкости [16], необходимое для уточнения механизмов взаимного проникновения и смешения жидкостей, совершенствования химических, биохимических и нефтегазовых технологий. Исследования капельного обмена биоматериалами между атмосферой и гидросферой помогают определить механизмы распространения вирусов и бактерий, вызывающих инфекционные заболевания растений и животных [17], нарушения экологического баланса, особенно в средах, загрязненных нефтепродуктами [18]. Динамика течений на масштабах порядка нано- и микрометров зависит от формы бактерий, наличия и длины бактериальных нитей [19], параметров тонкой структуры течения.

¹ Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского
Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: chakin@ipmnet.ru

**E-mail: ilynykh@ipmnet.ru

Системы тонких волокон, содержащих вещество капли, зарегистрированы на дне каверны в окрестности линии контакта сливающихся жидкостей [16], в фазах расплывания венца [20] и начала образования всплеска, а также при формировании каскада вихревых колец [2]. Группы мелких вихрей, возникающих на стенке растущей каверны, воспроизведены в численных моделях [21, 22]. Однако последующая картина эволюции вихрей и переноса вещества капли в толщу жидкости с высоким разрежением не изучалась. В данной работе впервые прослежена трансформация неоднородностей поверхности каверны в систему наклонных петель в толще жидкости. Опыты выполнены в диапазоне параметров формирования всплеска.

ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ТЕЧЕНИЙ

В набор физических величин, определяющих динамику и структуру капельных течений, входят параметры контактирующих сред (индексами обозначены капля d , принимающая t жидкость, воздух a): плотности ρ_d, ρ_t и ρ_a (далее $\rho_{d,t,a}$), кинематические $\nu_{d,t,a}$ и динамические $\mu_{d,t,a}$ вязкости; полные σ_d^a, σ_t^a и нормированные коэффициенты поверх-

ностного натяжения $\gamma = \frac{\sigma_d^a}{\rho_d}, \gamma = \frac{\sigma_t^a}{\rho_t}$ [см³/с²]; уско-

рение свободного падения g , диаметр D , площадь поверхности S_d , объем V , масса M , скорость капли U в момент контакта. Для оценки влияния конверсии внутренней энергии при уничтожении или формировании свободной поверхности [20] оцени-

ваются кинетическая энергия капли $E_d = \frac{MU^2}{2}$ и

доступная потенциальная поверхностная энергия (ДППЭ) $E_\sigma = \sigma S_d$, сосредоточенная в тонком шаровом слое толщиной порядка размера молекулярного кластера $\delta_c \sim 10^{-6}$ см и объемом V_σ (плот-

ности энергий $W_E = \frac{E_k}{V_d}, W_\sigma = \frac{E_\sigma}{V_\sigma}$). При этом в

число безразмерных чисел, использующихся для описания капельных течений, в дополнение к

числам Рейнольдса $Re = \frac{UD}{\nu}$; Фруда $Fr = \frac{U^2}{gD}$; Бонда

$Bo = \frac{gD^2}{\gamma}$; Онезорге $Oh = \frac{\nu}{\sqrt{\gamma D}}$; Вебера $We = \frac{U^2 D}{\gamma}$,

входят отношения энергий $E_R = \frac{E_k}{E_\sigma}$ и их плотно-

стей $W_R = \frac{E_k V_\sigma}{E_\sigma V_D}$. Время передачи кинетической энергии капли принимающей жидкости состав-

ляет $\tau_E = \frac{D}{U} \sim 1$ мс, а поверхностной энергии в

зоне первичного контакта – $\tau = \frac{\delta_c}{U} \sim 3$ нс.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Опыты выполнены на стенде ТБП, входящем в состав комплекса УИУ “ГФК ИПМех РАН” [23]. Отдельные капли частично дегазированной воды диаметром $D = 0.42$ см, окрашенные ализариновыми чернилами (разбавленными в концентрации 1:200), свободно падали из дозатора, установленного на высоте $H = 53$ и 200 см в воду глубиной $h_f = 3$ см, налитую в квадратную кювету размером 10×10 см. Область падения капли освещалась студийным софитом ReyLab Xenos RH-1000 мощностью 1 кВт и светодиодными источниками Ortronis MultiLED со световым потоком 7700 лм. Картина течения регистрировалась высокоскоростной видеокамерой Ortronis CR3000x2 с частотой съемки 5000 кадр/с. Линия визуирования камеры располагалась в диапазоне углов от 0° (съемка “на просвет”) до 75° к горизонту. Выбор положения осветителей определялся критерием максимальной контрастности тонких структур картины регистрируемого течения.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Картина капельных течений зависит от свойств сред, диаметра и скорости капли в момент контакта. При малой скорости, когда ДППЭ капли больше кинетической энергии $E_R = 0.53$ ($D = 0.43$ см, $U = 0.34$ м/с при $H = 1$ см, $E_\sigma = 4.2$ мкДж, $E_k = 2.24$ мкДж, $W_R = 2 \times 10^{-5}$), слияние проходит в интрузивном режиме, общая поверхность сливающихся жидкостей окрашена однородно [24]. При больших скоростях капли в момент контакта ($U = 3.1$ м/с, $E_k = 200$ мкДж, $E_\sigma = 4.2$ мкДж, $E_R = 48$, $W_R = 1.7 \times 10^{-3}$) вещество капли в принимающей жидкости распределяется в отдельных волокнах, образующих линейные решетки и сетки [24]. Распад равномерно окрашенной капли на волокна на линии контакта сливающихся жидкостей прослежен в [16].

Фотограммы картины переноса окрашенной жидкости с границы каверны в толщу принимающей жидкости приведены на рис. 1. В процессе роста каверны волокна, образовавшиеся на ее поверхности, начинают стягиваться в компактные пятна. При этом стенка каверны теряет гладкость, на отдельных окрашенных участках образуются выступы и мелкие вихри диаметром $0.6 < d_r < 1.7$ мм (рис. 1, $t = 8$ мс, как и в [22]). Остаток венца покрыт короткими капиллярными волнами длиной $\lambda = 0.76$ мм.

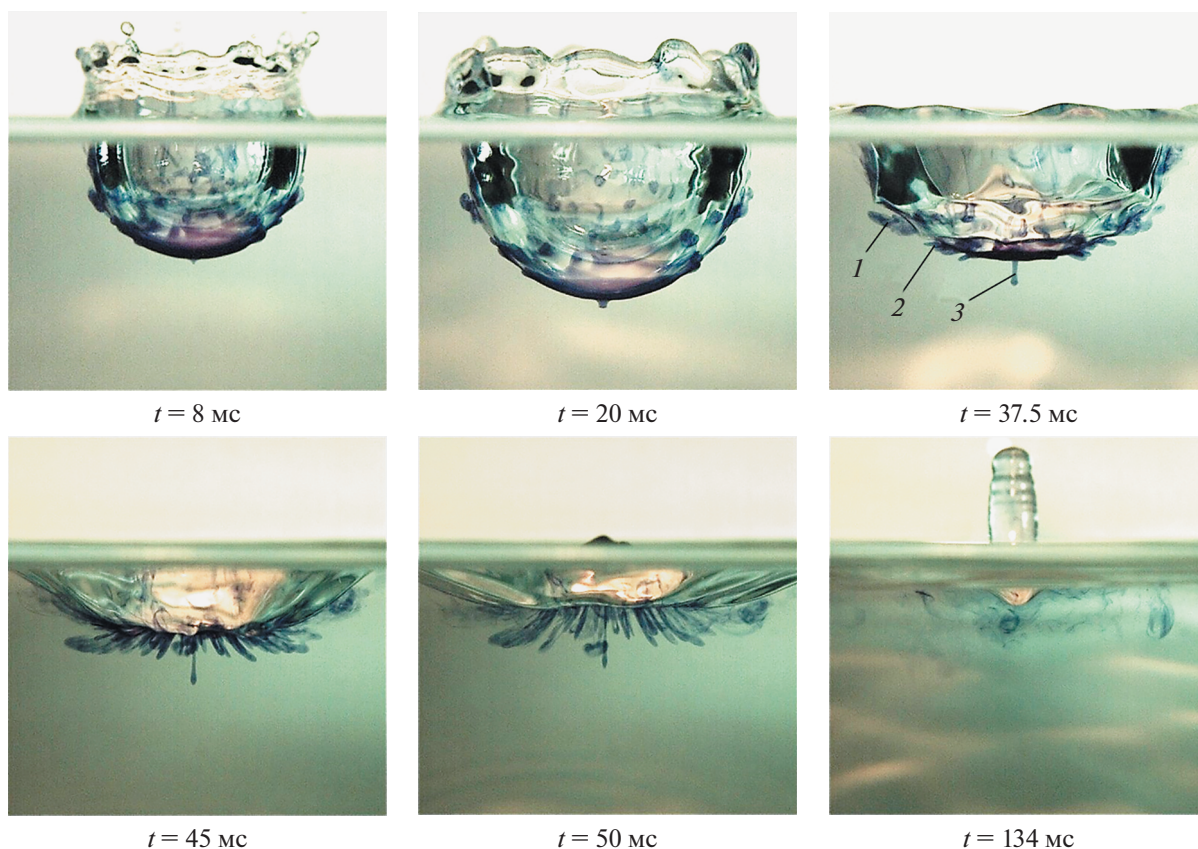


Рис. 1. Эволюция вихревых петель импакта капли разбавленных ализариновых чернил (разведение 1:200) в воде: $D = 0.43$ см, $U = 3.1$ м/с, $Re = 13300$, $We = 570$, $Fr = 228$, $Bo = 2.5$, $Oh = 0.0018$, $E_k = 200$ мкДж, $E_G = 4.2$ мкДж.

С заостренных вершин зубцов вылетают отдельные капли диаметром $0.4 < d_s < 1.1$ мм.

По мере роста каверны краска перераспределяется, на стенках каверны появляются вихорьки — кольца в центре изображения и полные образования на краях каверны (рис. 1, $t = 20$ мс).

С началом фазы стягивания (коллапса), когда поверхность каверны покрывается большими капиллярными волнами, приграничные течения вытягивают неоднородности стенки в наклонные петли 1, 2 (наиболее длинные 1 — в приповерхностном слое). Одновременно вниз растет центральная струйка 3 — след первичного контакта капли с принимающей жидкостью — области с максимальной эффективностью конверсии ДППЭ (рис. 1, $t = 37.5$ мс). Картина теней и каустик визуализирует кольцевые волны с острыми гребнями (в контуре на рис. 1, $t = 37.5$ мс два гребня на расстоянии 1.5 и 4 мм от дна каверны) и глубокие впадины.

С уменьшением высоты каверны плоскости петель медленно отклоняются к центру течения. Число петель растет (рис. 1, $t = 45$ мс), их концы движутся по сложным траекториям.

Длины петель достигают максимальных значений к началу формирования всплеска (рис. 1, $t = 50$ мс). В каверне выражены вертикальные деформации с острыми гребнями и плавными впадинами, сменившие горизонтальные кольцевые волны при $t = 37.5$ мс (рис. 1). При этом центральный оголовок отрывается от поддерживающей струйки и образует колечко ($d_r = 1.6$ мм) с ярко окрашенным контуром.

В фазе погружения центральной части всплеска кромка опускающегося пьедестала формирует узкую кольцевую впадину, охватывающую более узкую центральную часть всплеска. Внутренние течения поворачивают центральное вихревое колечко, окруженное системой из шести спиральных волокон, на 90° — из горизонтального к близко к вертикальному. Волокна вытягиваются и медленно растворяются. Далее они сохраняются в картине течения в форме тонких нитей толщиной $\delta_f \sim 0.1$ мм. Вершина погружающегося всплеска скругляется. От перешейка вниз бегут три капиллярных волны ($\lambda_s = 0.42, 0.67$ и 1 мм).

Начальные кадры процесса растекания капли анализируются в [11, 16]. Фотограммы, иллю-

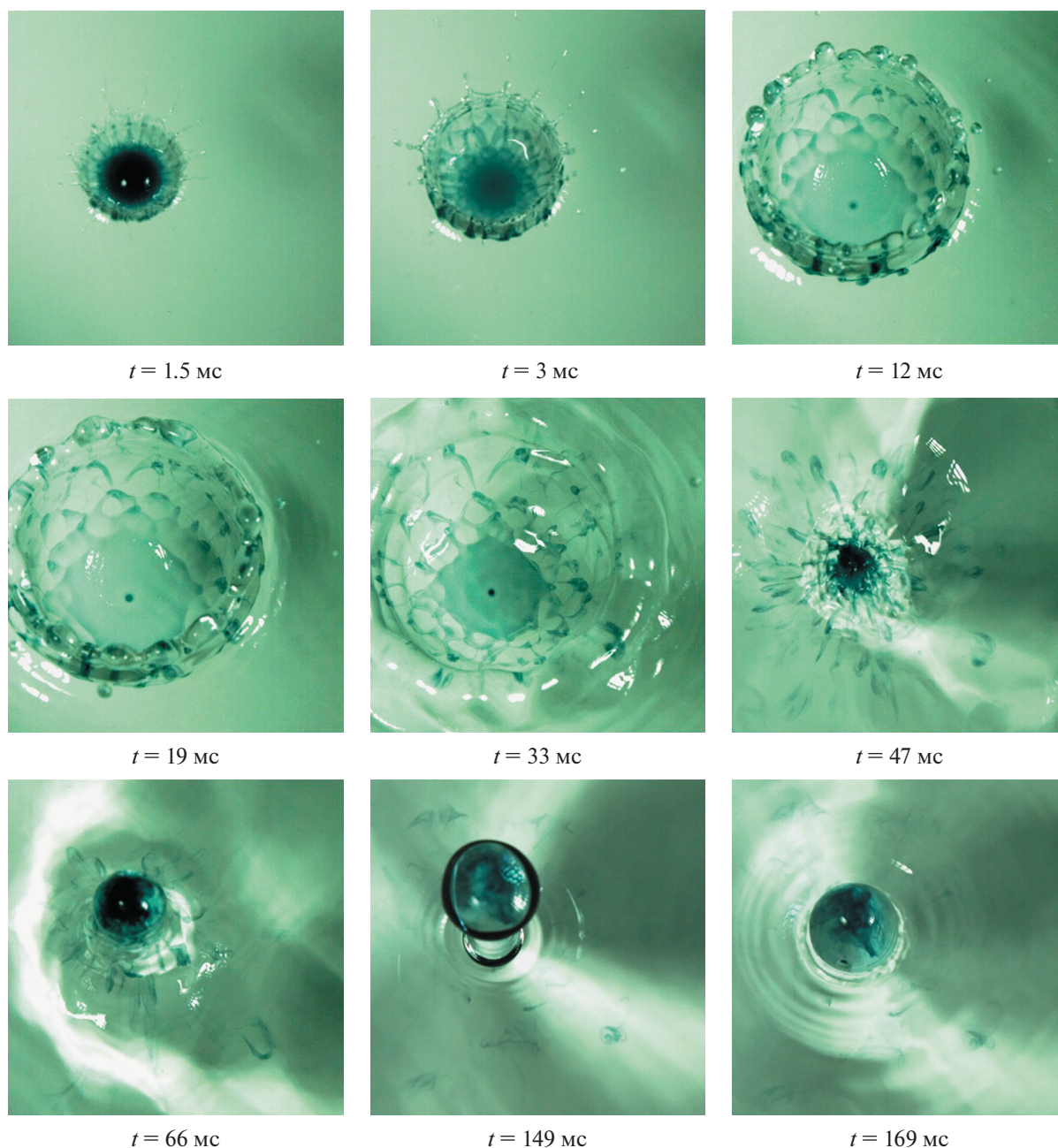


Рис. 2. Фронтальная картина течений импакта капли раствора ализариновых чернил (условия опытов как и на рис. 1, угол визирования 70° к горизонту).

стрирующие дальнейшую эволюцию фронтальной картины распределения вещества капли, приведены на рис. 2 (линия визирования под углом 70° к горизонту). В режиме формирования всплеска ($E_k > E_G$) вещество погружающейся капли переносится от линии контакта капли по поверхности каверны и венца в радиальных волокнах – лиганентах толщиной $0.1 < \delta_l < 0.3$ мм, которые разделены принимающей жидкостью с шагом $9^\circ < \Delta\varphi < 18^\circ$ (рис. 2, $t = 1.5$ мс). Окрашен-

ный остаток капли сохраняется на дне каверны. На вершине венца формируется шеврон с зубцами и шипами длиной $l_s = 4$ мм.

После полного растекания капли на поверхности каверны и венца остается многоуровневая сетка из ячеек с заостренными углами (рис. 2, $t = 3$ мс). С вершин системы шипов синхронно вылетают группы мелких капель ($d_s < 0.7$ мм). Окрашенные выступы на стенке каверны (рис. 2, $t = 3$ мс в направлении на б ч) со временем преобразуются

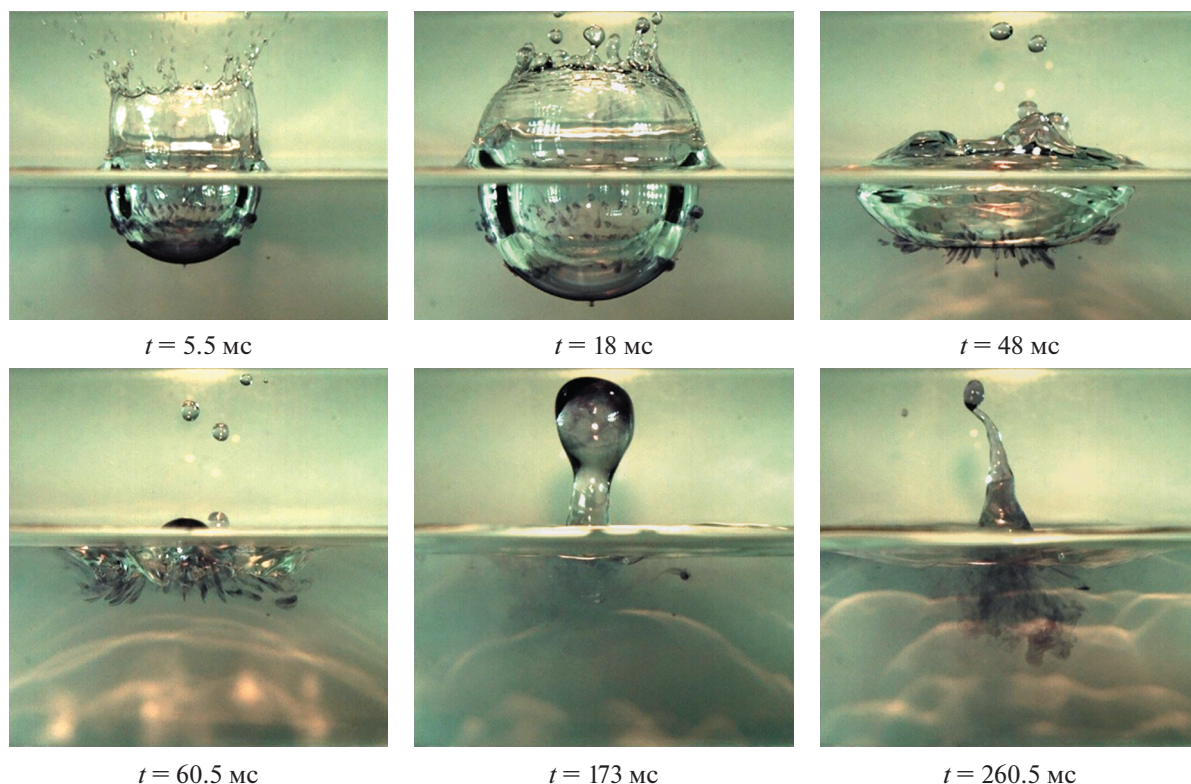


Рис. 3. Вихревые петли импакта капли разбавленных ализариновых чернил (разведение 1:200) в воде: $D = 0.43$ см, $U = 5.2$ м/с, $Re = 22300$, $We = 1600$, $Fr = 640$, $Bo = 2.5$, $Oh = 0.0018$, $E_k = 562$ мкДж, $E_\sigma = 4.2$ мкДж, $E_R = 134$, $W_R = 4.7 \cdot 10^{-3}$.

в вихревые кольца ($0.5 < d_r < 0.7$ мм, рис. 2, $t = 12$ мс) и далее — в вытянутые петли. Диаметр капель, вылетающих с шипов венца, достигает $d_s \sim 1$ мм.

Темной точке в центре каверны соответствует центральная струйка (на рис. 1 видна при $20 < t < 45$ мс). Сетчатая структура поверхности каверны образована тремя ярусами треугольных ячеек высотой $h_n \sim 3$ мм, число которых уменьшается, а верхняя часть сглаживается (рис. 2, $t = 19$ мс).

Постепенно общая контрастность окрашенной картины течения падает, что указывает на диффузионное расплывание чернил. Максимальная концентрация красителя наблюдается на вершинах зубцов и примыкающим к ним окрашенным волокнам на стенках в нижней части рисунка (рис. 2, $t = 19$ мс). В жидкость выступают мелкие вихорьки ($d_r \sim 0.6 \pm 0.1$ мм).

С началом коллапса продолжается рост горизонтального размера каверны. Центральное пятно, околтуренное линией с острыми гребнями, уменьшается и просветляется. В нем проявляется сетчатая структура с кольцевыми элементами (рис. 2, $t = 33$ мс). В венце остаются отдельные окрашенные волокна.

Тонкая структура дна остатка каверны усложняется с появлением всплеска, вершина которого покрыта мелкими впадинами с острыми стенками, образующими кольцевые структуры с шагом $\delta_r \sim 0.7$ мм. Одновременно радикально перестраивается картина распределения вещества капли. Основная часть окрашенной жидкости стягивается в оголовок растущего всплеска, остальная поверхность жидкости просветляется. При этом видны короткие петли длиной $1.8 < l_l < 4.8$ мм, внутренние концы которых закрывает кромка растущего пьедестала всплеска ($d_p = 1.78$ см). К пьедесталу примыкают группы длинных петель ($l_l = 1.2$ см), расположенных с угловым шагом $10^\circ < \Delta\varphi < 20^\circ$.

Оголовок растущего всплеска быстро сглаживается, и в картине течения остаются выраженными только капиллярные волны на вершине пьедестала ($\lambda_c = 0.3, 0.35$ мм, рис. 2, $t = 66$ мс). Остатки вихревых петель в центре заключены в кольцо ($d_c = 2.5$ см) и за его пределами ($l_l = 1.4$ см справа внизу).

Со временем мелкомасштабные компоненты сглаживаются, петли размываются, и выраженным остается всплеск ($d_s = 3.8$ мм) с оголовком

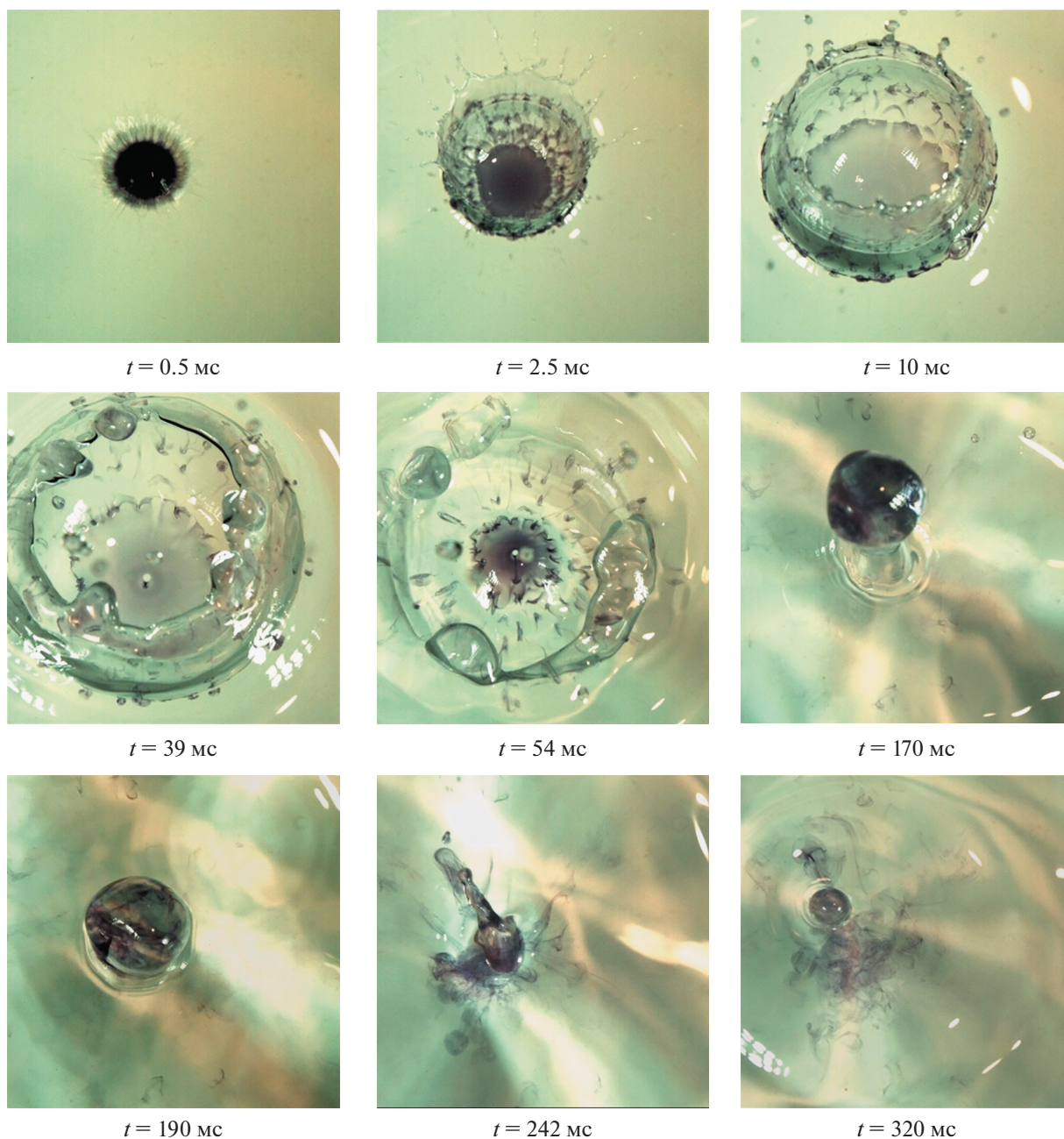


Рис. 4. Фронтальная картина течений импакта капли раствора ализариновых чернил (условия опытов как и на рис. 3, угол визирования 70° к горизонту).

($d_o = 8.4$ мм), отделенный от принимающей жидкости узкой кольцевой впадиной ($d_v = 5.3$ мм) — следом погрузившегося пьедестала. От ее внешней границы разбегаются капиллярные волны ($\lambda_c = 0.6, 0.82, 1.6$ мм). У поверхности остаются окрашенные колечки ($d_f \sim 2$ мм).

Контакт оголовка с поверхностью жидкости сопровождается образованием группы капиллярных волн (в жидкости $\lambda_c = 0.78, 0.97, 1.34, 2.1$ мм, на

оголовке $\lambda_c = 0.23$ мм) и радиальных течений, искажающих их гребни. Отдельные окрашенные волокна, их сборки, пятна встречаются и в оголовке всплеска, и во всем объеме жидкости (рис. 2, $t = 169$ мс).

Отмеченные особенности картины течения сохраняются и при большей скорости контакта капли (рис. 3, $U = 5.2$ м/с). Однако венеч тонкий, его кромка сильнее изрезана, с вершин коротких шипов выбрасывается большое число

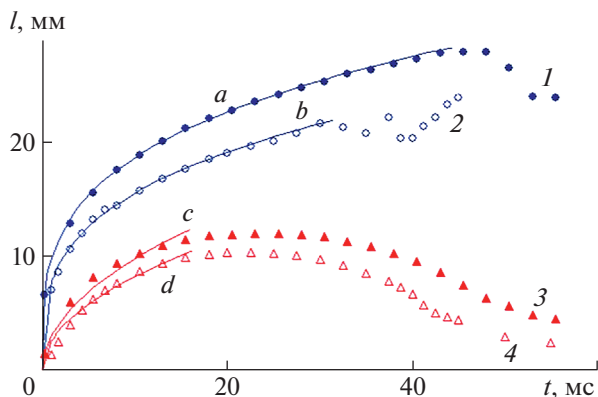


Рис. 5. Изменения ширины (1, 2) и глубины (3, 4) каверн импакта капли ($D = 0.43$ см): (кривые 1, 3) – $U = 5.2$ м/с; (2, 4) – $U = 3.1$ м/с; участки *a–d* – аппроксимации функциями вида $l(t) = mt^n$.

мелких брызг (рис. 3, $t = 5.5$ мс). На стенках каверны выражены окрашенные горизонтальные кольца на расстоянии $h_c = 1.6$ и 2.7 мм от дна каверны.

Окрашенная жидкость собирается в отдельные пятна на стенках каверны, на горизонтах $h = 3.6$ и 9.1 мм от дна каверны, порождающие мелкие вихорьки (рис. 3, $t = 18$ мс). Центральная донная струйка здесь присутствует, но выражена слабее.

Группы коротких наклонных петель формируются к началу схлопывания каверны (рис. 3, $t = 48$ мс). Более четкие волокна длиной $3 < l_f < 3.5$ мм и петли образуются к началу роста всплеска, когда стенки каверны покрыты вертикальными впадинами, разделенными острыми гребнями (рис. 3, $t = 60.5$ мс).

К началу спадания всплеска интенсивные внутренние течения размывают четкие петли в толще жидкости, формируя слабо окрашенную область с клочковатой структурой (рис. 3, $t = 173$ мс). Окрашенная вершина всплеска ($d_s = 8.5$ мм) располагается на прозрачной ножке ($d_o = 4.3$ мм). Каустики в нижней части рисунка прорисовывают гребни капиллярных волн.

Погрузившийся всплеск вносит порцию окрашенной жидкости с волокнистой структурой в толщу жидкости. Сформировавшаяся впадина, прорисованная яркими каустиками (рис. 3, $t =$

Таблица 1. Параметры интерполяций размеров каверн

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
<i>m</i>	9.8	7.8	3.1	2.6
<i>n</i>	0.28	0.3	0.5	0.5
Δt , мс	43	30	15.5	15.5

$= 260.5$ мс), заполняется жидкостью и образует конический стример ($h_s = 1.46$ см) с оголовком ($d_s = 2.7$ мм).

Во фронтальной проекции (рис. 4) на фоне более выраженной диффузной окраски каверны и растущего венца выделяются тонкие волокна, радиально отходящие от линии слияния остатка капли, как и в [16, 24]. Тонкие плотно окрашенные волокна длиной до $l_f = 3$ мм находятся в плене венца (рис. 4, $t = 2.5$ мс). Вылетающие брызги содержат обе контактирующие жидкости.

На утолщенной кромке венца выражены отдельные зубцы с шагом $2.0 < \delta_\phi < 5.4$ мм, и кольцевые волны ($\lambda_c = 0.27$ мм). Контур толщиной $\delta_b = 0.9$ мм ограничивает неоднородно окрашенную центральную часть дна каверны. Пятна ($0.6 < d_p < 0.8$ мм) с шагом $\delta_\phi \sim 3$ мм на его нижней части – след формирующихся мелких вихрей, которые видны и в верхней части каверны. Динамика пузырьков ($d_b = 2.2$ мм, угловое положение – на 5 ч) у стенки венца также изучалась в [25].

Плотность окраски спадающего венца с крупными зубцами плавно уменьшается, однако вихревые колечки ($d_r < 0.75$ мм) остаются контрастными (рис. 4, $t = 39$ мс).

Окраска центра течения становится более плотной к началу формирования всплеска (рис. 4, $t = 54$ мс). Основание пьедестала оконтуривают яркие волокна, дно каверны покрывают отдельные колечки ($d_r \sim 2$ мм) и петли ($3.0 < l_l < 15$ мм).

Значительная часть краски собирается в оголовке всплеска, цилиндрическая струйка прозрачная (рис. 4, $t = 170$ мс). Коническое основание пьедестала ($d_s = 4.8$ мм) окружает узкая кольцевая впадина диаметром $d_c = 6.3$ мм и шириной $\delta_w = 0.35$ мм, от внешней кромки которой разбегаются кольцевые волны ($\lambda_c = 0.48, 0.74$ мм), искажающие радиальные течения. Отдельные волокна окрашенной жидкости разбросаны по всему полю наблюдения.

Погружение всплеска сопровождается образованием новой группы коротких волн ($\lambda_c = 0.3$ мм, $t = 190$ мс, рис. 4). Стример в этом опыте состоит из цилиндрического основания, конической центральной части и оголовка ($d_s = 1.4$ мм).

Погружение оголовка стримера сопровождается генерацией новой группы капиллярных волн ($\lambda_c = 0.4$ мм). Из области его падения вытягиваются окрашенные волокна и разбегаются мелкие вихри (на 7 ч при $t = 242$ мс). Окрашенные волокна сохраняются в областях причудливой формы (рис. 4, $t = 320$ мс).

Размеры каверн в опытах, представленных на рис. 1–4, приведены на рис. 5. Наборы эксперимен-

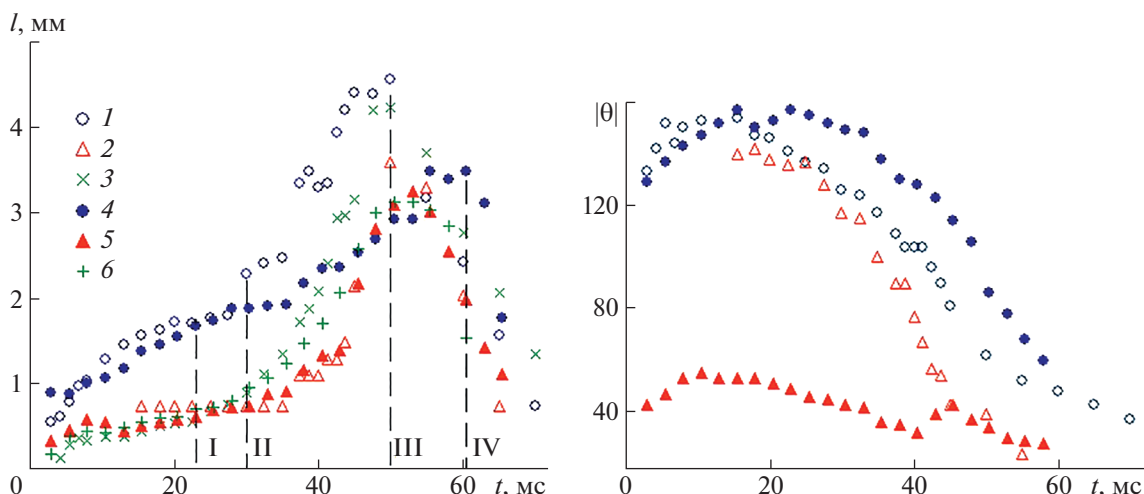


Рис. 6. Изменения длин l и модуля углов наклона вихревых петель $|\theta|$ к вертикали ($D = 0.43$ см): кривые 1, 2 – приповерхностная и диагональная петли ($U = 3.1$ м/с); 3, 4 – то же для $U = 5.2$ м/с; 5, 6 – центральная струйка; линии I, II отмечают время достижения максимального размера и начала схлопывания каверны, III, IV – появления всплеска ($U = 3.1$ м/с и 5.2 м/с соответственно).

тальных точек 1–4 на интервале Δt аппроксимируются функциями a, b, c, d вида $l(t) = mt^n$, $[l] = \text{мм}$, $[t] = \text{мс}$. Значения коэффициента m , показателя n , длительность интервала Δt согласованности интерполяции с данными приведены в табл. 1.

Немонотонные вариации размеров при $t > 35$ мс отражают влияние крупномасштабных осцилляций поверхности жидкости и капиллярных волн, как охватывающих венец, так и сбегających с его кромки в каверну.

Изменения длин наклонных петель (приповерхностной 1 и под углом 45° – 2), а также центральной струйки 3, которые начинают идентифицироваться как оголовки вихрей при $t > 1$ мс, приведены на рис. 6. На начальном этапе они монотонно растут и аппроксимируются функциями вида $l(t) = mt^n + c$, $[l] = [\text{мм}]$, $[t] = [\text{мс}]$ (значения коэффициентов m , показателей n и слагаемого c приведены в табл. 2).

Быстрорастущей петле 1, которая вытягивается из вихревого кольца приповерхностным течением, соответствует показатель $n = 0.5$ ($m = 0.38$). Темп неравномерного роста длины центральной струйки более высокий $l_c = 1.6 \times 10^{-7} t^4$. Промежу-

точные струйки растут медленнее. Верхние концы петель фиксированы на движущейся стенке каверны, а внешние поднимаются вместе с каверной и поворачиваются к центру под действием приповерхностных течений.

Приповерхностные петли быстро удлиняются в начальной фазе. Срединные петли медленно растут на начальной стадии и быстро – при коллапсе каверны. Предельная длина центральной струйки уменьшается с ростом высоты свободного падения капли.

Изменения в характере кривых связаны со структурной перестройкой общей картины течений: прекращением роста глубины и сменой направления движения дна каверны (началом коллапса), появлением нового компонента – всплеска. Время существования наклонных вихревых петель данного типа в толще жидкости достигает 60 мс. Далее они втягиваются в приповерхностный слой и выходят из поля наблюдения.

Угловое положение петель меняется более плавно. В начале формирования петли смещаются восходящими течениями, вызванными углублением каверны, вытесняющей окружающую жидкость. В фазе коллапса плоскости петель на-

Таблица 2. Параметры интерполяции длин петель

	1	2	3	4	5	6
m	0.38	5×10^{-6}	1.6×10^{-7}	0.35	7.5×10^{-7}	4.6×10^{-7}
n	0.5	4	4	0.5	4	4
c	0	0.7	0.32	0	0.5	0.5

чинают отклоняться к центру течения. При этом концы петель движутся по сложным траекториям.

В процессе эволюции каверн картины петель усложняются, осевая симметрия течения нарушается. Проникающие в принимающую жидкость тонкие петли в капельных течениях влияют на локализацию и темп протекания химических и биохимических реакций в случае различия составов контактирующих веществ.

БЛАГОДАРНОСТИ

Эксперименты проведены на стендах УИУ “ГФК ИПМех РАН”.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 19-19-00598).

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. *Worthington A.M.* A Study of splashes. Longmans, Green, London, 1908. 129 p.
4. *Edgerton H.E., Killian J.R.* Moments of Vision: The Stroboscopic Revolution in Photography. 1979. Cambridge: MIT Press, 177 p.
5. *Zhang V., Toole J., Fezzaa K., Deegan R.D.* Splashing from drop impact into a deep pool: multiplicity of jets and the failure of conventional scaling // *J. Fluid Mech.* 2012. V. 703. P. 402–413. <https://doi.org/10.1017/jfm.2012.249>
6. *Thoroddsen S.T., Etoh T.G., Takehara K.* High-speed imaging of drops and bubbles // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2008. V. 40. P. 257–285. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.40.111406.102215>
7. *Visser C.W., Frommhold P.E., Wildeman S., Mettin R., Lohse D., Sun C.* Dynamics of high-speed micro-drop impact: numerical simulations and experiments at frame to-frame times below 100 ns // *Soft Matter*. 2015. V. 11. P. 1708–1722. <https://doi.org/10.1039/c4sm02474>
8. *Gilet T., Mulleners K., Lecomte J. P., Vandewalle N., Dorbolo S.* Critical parameters for the partial coalescence of a droplet // *Phys. Rev. E* 75, 036303. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.75.036303>
9. *Ersoy N.E., Eslamiana M.* Capillary surface wave formation and mixing of miscible liquids during droplet impact onto a liquid film // *Phys. Fluids*. 2019. V. 31. 012107. <https://doi.org/10.1063/1.5064640>
10. *Thoroddsen S.T.* The ejecta sheet generated by the impact of a drop // *J. Fluid Mech.* 2002. V. 451. P. 373–381. <https://doi.org/10.1017/S0022112001007030>
11. *Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю.* Множественные выбросы брызг при ударе капли // Доклады РАН. Физика, технические науки. 2020. Т. 494. С. 42–46. <https://doi.org/10.31857/S2686740020050181>
12. *Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю.* Капиллярные волны на поверхности погружающейся в жидкость капли // ДАН. 2015. Т. 465. № 4. С. 548–554. <https://doi.org/10.7868/S0869565215340101>
13. *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>
14. *Руденко О.В.* Разрушение сингулярности профиля сильно нелинейной волны в диссипативной среде // Доклады РАН. Физика, технические науки. 2020. Т. 492. С. 63–67. <https://doi.org/10.31857/S2686740020030098>
15. *Chashechkin Yu.D.* Conventional partial and new complete solutions of the fundamental equations of fluid mechanics in the problem of periodic internal waves with accompanying ligaments generation // *Mathematics*. 2021. V. 9. № 586. <https://doi.org/10.3390/math9060586>
16. *Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю.* Распад капли на отдельные волокна на границе области контакта с принимающей жидкостью // Доклады РАН. Физика, технические науки. 2021. Т. 497. С. 31–35. <https://doi.org/10.31857/S2686740021020139>
17. *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>
18. *Meckenstock R.U., et al.* Water droplets in oil are microhabitats for microbial life // *Science*. 2014. V. 345. P. 673–675. <https://doi.org/10.1126/science.1252215>
19. *White A.R., Jalali M., Sheng J.* Hydrodynamics of a rising oil droplet with bacterial extracellular polymeric substance (eps) streamers using a microfluidic microcosm // *Front. Mar. Sci.* 2020. V. 7. Article 294. P. 1–14. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00294>
20. *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>
21. *Thoroval M.-J., Takehara K., Thoroddsen S. von Kármán vortex street within an impacting drop // Phys. Rev. Lett.* 2012. V. 108 (26). 264506. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.108.264506>

22. Wu S., Zhang J., Xiao Q., Ni M.J. Comparison of two interfacial flow solvers: Specific case of a single droplet impacting onto a deep pool // *Comp. Mathem. Applic.* 2021. V. 81. № 1. P. 664–678.
<https://doi.org/10.1016/j.camwa.2020.01.010>
23. УИУ “ГФК ИПМех РАН”: Гидрофизический комплекс для моделирования гидродинамических процессов в окружающей среде и их воздействия на подводные технические объекты, а также распространения примесей в океане и атмосфере. Сайт: <http://www.ipmnet.ru/uniquequip/gfk/#equip>.
24. Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю. Задержка формирования каверны в интрузивном режиме слияния свободно падающей капли с принимающей жидкостью // *Доклады РАН. Физика, технические науки.* 2021. Т. 496. С. 34–39.
<https://doi.org/10.31857/S268674002101003X>
25. Zou J., Ji C., Yuan B.-G., Ren Y.-L., Ruan X.-D., Fua X. Large bubble entrapment during drop impacts on a restricted liquid surface // *Phys. Fluids.* 2012. V. 24. 057101.
<https://doi.org/10.1063/1.3703674>

FORMATION OF A SYSTEM OF INCLINED LOOPS IN THE FLOW OF A DROP IMPACT

Yu. D. Chashechkin^a and A. Yu. Ilinykh^a

^a *Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

Presented by Academician of the RAS D.M. Klimov

The process of formation and restructuring of a regular system of inclined loops containing the substance of a freely falling colored drop in the bulk of the target fluid has been traced by the methods of high-resolution photo and video recording for the first time. Loops up to 1.5 cm long, penetrating into the target fluid in the mode of splash formation, are pulled out from small vortices that deform the wall of the growing cavity at the nodes of the primary network that are in the regions of accumulation of the drop matter. Loops existing up to 60 ms are deformed and carried by intense near-surface flows in the initial phase of the splash formation. The change in the general structure of the flow is accompanied by the formation of new types of fibrous structures of the drop substance distribution. The rapidly developing systems of colored fibers existing at all stages of the evolution of the drop impact processes, up to the formation of a cascade of rings, violate the axial symmetry of the flows.

Keywords: colored drop, substance distribution, fibers, experiment