

# Fine Structure Evolution of the Merger Pattern of a Compound Drop in the Impact Mode

S. K. Khaiirbekov, A. Yu. Ilinykh

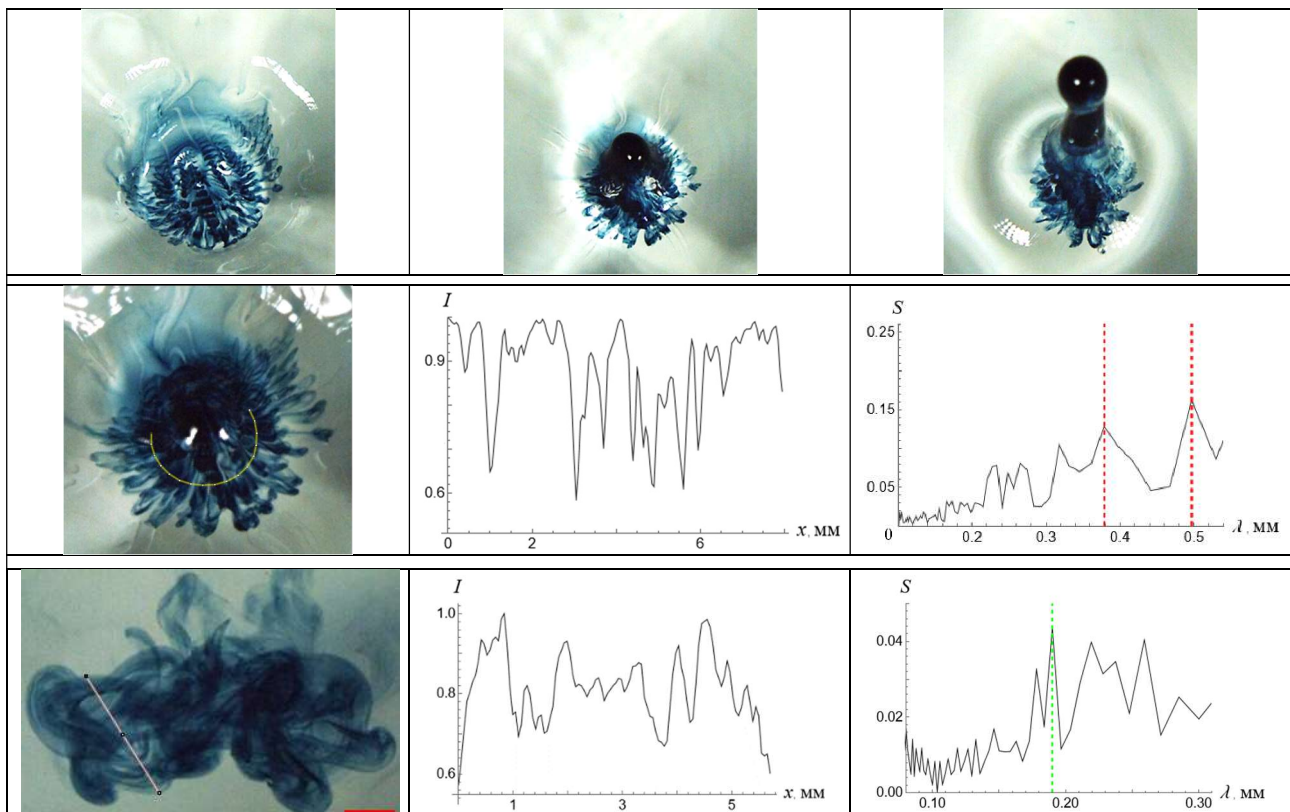
*Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics, Russian Academy of Sciences (IPMech RAS),  
Moscow, 119526, Russia*

msturistt09@gmail.com, ilynykh@ipmnet.ru

## Abstract

Using the method of high-speed video recording of the merging process of compound drops in deep water, the distribution patterns of the drop substance over the deformed surface of the target fluid in the splash formation mode were traced in the continuation of registration of fine structure evolution of the flow at the initial stage of merging of compound drops. In the experiments, the height of the drops' fall, their diameter, and the position of the core of the compound drop relative to its geometric center were varied. Fine structures were observed at all stages of the flow, starting from the contact of the oil shell of the compound drop with the surface of the target fluid, the formation of a cavern, the spreading of the core, and the formation of a splash. Using direct measurements and spectral analysis, the characteristic dimensions of fine flows and structures are estimated.

Keywords: compound drops, experiment, cavity, splash, fine structure.



First row – evolution of the substance of a compound drop during splash formation; distribution of relative irradiance and spatial spectrum before the splash (center row) and during the intrusion phase (bottom row)

УДК 532.5

# Эволюция тонкой структуры картины слияния составной капли в импактном режиме

Ш. Х. Хайирбеков, А. Ю. Ильиных

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН  
Россия, Москва, 119526, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1*

msturistt09@gmail.com,

ilynykh@ipmnet.ru

## Аннотация

Методом скоростной видеосъемки процесса слияния составных капель в глубокую воду прослежены картины распределения вещества капли по деформированной поверхности принимающей жидкости в режиме формирования всплеска в продолжение регистрации эволюции тонкой структуры течения на начальном этапе слияния составных капель. В проведенных опытах менялась высота падения капель, их диаметр, а также положение ядра составной чернильно-масляной капли относительно ее геометрического центра. Тонкие структуры наблюдались на всех этапах течения, начиная от касания масляной оболочки составной капли поверхности принимающей жидкости, формирования каверны, растекания ядра и формирования всплеска. С помощью прямых измерений и спектрального анализа оцениваются характерные размеры тонких течений и структур.

Ключевые слова: составные капли, эксперимент, каверна, всплеск, тонкая структура

## 1. Введение

Импакт капли – последовательность процессов слияния, формирования каверны, венца, всплеска – предмет экспериментальных исследований, начиная с конца 19 века. Большинство работ посвящено визуализации картины течения при слиянии капли однородной смешиваемой или несмешиваемой жидкости. Активно изучается геометрия каверн при слиянии смешиваемых [1, 2] или не смешиваемых [3, 4] жидкостей, формирование струйки Рэлея [5] и ее последующий распад на капли [6]. В связи с задачами акустики также изучается образование и схлопывание пузырьков и полостей [7]. Сочетание экспериментальных и численных инструментов позволило более полно понять микромеханику всплеска, позволило создать обширные математические модели изменения давления, скоростей и других параметров [8, 9].

Особый интерес представляют исследования всплеска при импакте капли, состоящей из неньютонской жидкости [10]. В последние годы большое число работ также посвящено изучению всплеска при падении капель жидкости на тонкие жидкие пленки на поверхности другой жидкости [8, 11] или твердого тела [12].

В последние годы исследуется растекание в глубокой жидкости как однородных, так и составных капель, включающих несмешиваемые жидкости или плохо растворимые газы с дополнительными контактными поверхностями [13, 14].

В экспериментах с составными каплями особое внимание уделяется развитию течений на ранних стадиях импакта. В зависимости от условий опытов (состава и размеров капли, контактной скорости) наблюдаются различные типы течений, включающие образование полосчатых и более сложных структур [3]. В настоящей работе визуализируется картина течений на последующих этапах эволюции процессов переноса вещества составных капель при формировании всплеска и его распаде.

Экспериментальные результаты исследования всплеска после импакта составных капель активно используются в химической, нефтехимической, металлургической и пищевой промышленности [15], в совершенствовании биомедицинских технологий [16], а также при разработке мер по сохранению окружающей среды [17].

## 2. Параметризация

В число основных размерных параметров, характеризующие капельные течения, входят плотности  $\rho_d^n, \rho_d^s, \rho_a, \rho_t$ , четыре кинематических  $v_d^n, v_d^s, v_a, v_t$  и динамических вязкостей  $\mu_d^n, \mu_d^s, \mu_a, \mu_t$ ; шесть полных  $\sigma_{d,n}^s, \sigma_{d,n}^a, \sigma_{d,s}^a, \sigma_t^a, \sigma_t^{d,n}, \sigma_t^{d,s}$  и шесть нормированных на плотность  $\gamma_{d,n}^s, \gamma_{d,n}^a, \gamma_{d,s}^a, \gamma_t^a, \gamma_t^{d,n}, \gamma_t^{d,s}$  коэффициентов поверхностного натяжения для поверхностей раздела сред; эквивалентные диаметры  $D_n$  и  $D_s$ , площади поверхности  $S_d^n$ , и  $S_d^s$ , объемы  $V_d^n$ , и  $V_d^s$ ; массы  $M_d^n$  и  $M_d^s$  ядра и оболочки; ДППЭ  $En_{\sigma,d}^{n,s} = \sigma_d^{n,s} S_d^n$  и  $En_{\sigma,d}^{s,a} = \sigma_d^{s,a} S_d^s$ ; коэффициенты диффузии вещества ядра и оболочки капли в принимающей жидкости  $\kappa_t^{d,n}, \kappa_t^{d,s}$ , а также контактная скорость капли  $U$ , которая движется как целое, ее полная масса  $M_d = M_d^n + M_d^s$ , кинетическая энергия капли  $En_{k,d} = M_d U^2 / 2$  и ее компонентов – ядра  $En_k^n = M_d^n U^2 / 2$  и оболочки  $En_k^s = M_d^s U^2 / 2$ .

Большое число параметров позволяет сформировать развернутые группы собственных масштабов длины и времени, характеризующих слияние составной капли с принимающей жидкостью.

Собственные масштабы задачи определяют требования к методике эксперимента – выбору размера поля наблюдения, пространственного и временного разрешения инструментов.

Большое число масштабов однородной размерности отражает многообразие и сложность процессов, протекающих в широком диапазоне масштабов – от надмолекулярных порядка  $\delta_c \sim 10^{-6}$  см в процессах освобождения и накопления доступной потенциальной поверхностной энергии, до полного размера области течения.

Динамические параметры капли – импульс  $\mathbf{p}_d = M\mathbf{U}$ , кинетическая  $En_{k,d} = MU^2/2$  и полная доступная потенциальная поверхностная энергия (ДППЭ)  $En_{\sigma,d} = \sigma_d^{n,s} S_d^n + \sigma_d^{s,a} S_d^s$ .

Для сокращения описания процессов слияния составной капли значения параметров приведены только для воды. Плотность, поверхностное натяжение и другие параметры раствора чернил близки к значениям соответствующих параметров для воды.

## 3. Экспериментальная установка

Опыты выполнены на доработанном стенде для изучения тонкой структуры быстропротекающих процессов (ТБП), входящем в состав Уникальной исследовательской установки УИУ «ГФК ИПМех РАН» [18]. Картины слияния составных капель с принимающей жидкостью регистрировались скоростной видеокамерой Optronis CR 300×2 или фотоаппаратом Canon EOS 350D. Наблюдение свободной поверхности осуществлялось под углом  $\vartheta = 70^\circ$ . Длительность экспозиции составляла 200 мкс, скорость съемки – 4000 к/с.

Область течения освещали два многоточечных светодиодных осветителя 6 Optronis MultiLED со световым потоком 7700 лм.

Оболочечные составные капли формировались методом инъекции чернильного ядра из соосного тонкого капилляра в растущую масляную каплю на срезе капилляра. Более подробно методика опыта описана в [19].

В данных опытах ядро капли состояло из раствора ализариновых чернил, разбавленных в пропорции 1:20. Оболочка - рафинированное пищевое подсолнечное масло (плотность масла  $\rho_d^s = 0.91$  г/см<sup>3</sup>, коэффициент поверхностного натяжения на границе с воздухом  $\sigma_o^a = 33$  г/с<sup>2</sup>, а на границе с водой  $\sigma_w^o = 23.5$  г/с<sup>2</sup>).

Эксперименты проводились с использованием частично дегазированной водопроводной воды, для которой были приняты стандартные характеристики коэффициента поверхностного

натяжения и плотности при 20°C ( $\sigma = 73 \text{ г/с}^2$ ,  $\rho = 1.0 \text{ г/см}^3$ ). Принимающая жидкость находилась в кювете  $10 \times 10 \times 8 \text{ см}^3$ .

## 4. Основные результаты

В данных опытах исследовалась эволюция картины течения импакта составной чернильно-масляной капли в воде как на этапе формирования всплеска, так и на более поздних этапах. Всего были проведены три серии опытов с оболочечными каплями наружным диаметром  $3.3 < D_s < 5 \text{ мм}$ , свободно падающими с высоты  $H = 44 \text{ см}$  в первом опыте и  $H = 50 \text{ см}$  во втором и третьем опытах.

### 4.1. Начальный этап слияния составной капли и фаза формирования тонкой структуры

Эволюция распределения вещества составной капли на раннем этапе импакта с образованием ярко-выраженной решетчатой структуры показана на рис. 1. При контакте составной капли с поверхностью принимающей жидкости на начальном этапе за короткий промежуток времени происходит уничтожение поверхности масляной оболочки с высвобождением и трансформацией доступной потенциальной поверхностной энергии (ДППЭ), деформация поверхности принимающей жидкости и растекание тонкой масляной оболочки.

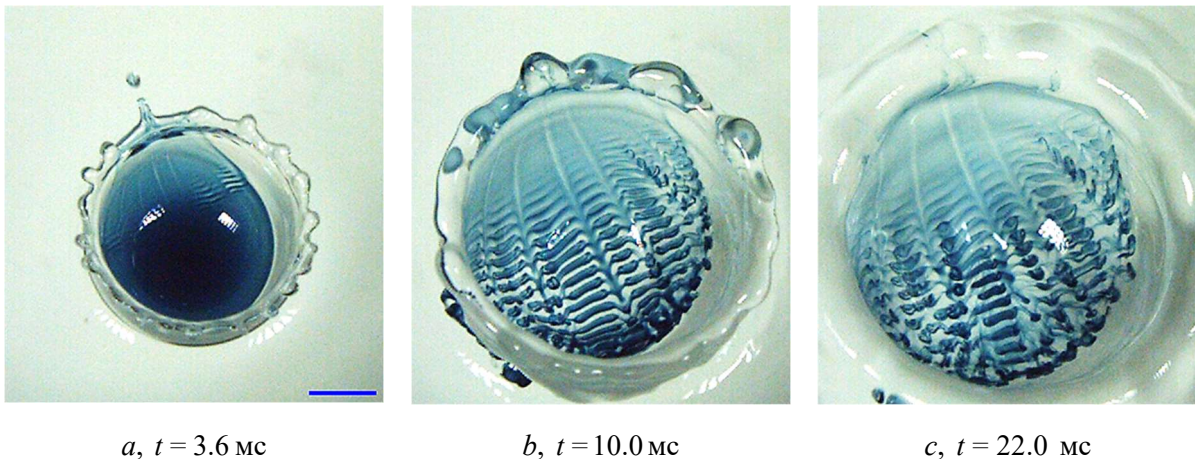


Рис. 1. Эволюция распределения вещества составной чернильно-масляной капли на начальном этапе слияния составной капли в импактном режиме. Длина маркера – 4 мм. Высота падения капли  $H = 44 \text{ см}$  (контактная скорость  $U = 2.9 \text{ м/с}$ );  $D_n = 2.8 \text{ мм}$ ;  $D_s = 5 \text{ мм}$ . Угол визирования –  $70^\circ$  к горизонту.  $E_k = 257 \text{ мкДж}$ ,  $E_{n\sigma,d} = E_\sigma^n + E_\sigma^s = 3.2 \text{ мкДж}$

При дальнейшем погружении капли уничтожается поверхность раздела чернила-масло ядра составной капли, происходит выделение энергии и растекание ядра по возмущенной, деформированной поверхности принимающей жидкости с масляной пленкой на ней. При этом картина распределения вещества ядра капли имеет секторальную структуру, заполненную периодическими полосчатыми элементами.

### 4.2. Начало формирования всплеска. Перестройка структуры

Выборка видеок кадров, иллюстрирующая дальнейшую эволюцию растекания составной оболочечной, капли приведена на рис. 2 (первый этап представлен на рис. 1). Серия фотографий объединена в отдельную выборку ввиду качественных изменений основных структурных компонентов течения.

Трансформация начальной линейчатой структуры в более сложную центрированную, свидетельствующую о начале формирования всплеска, начинается при  $t = 25.0 \text{ мс}$  (рис. 2, *a*). Концентрация чернил в центре каверны и изменение ее формы и знака кривизны являются индикатором начала формирования всплеска.



Рост центральной кумулятивной струи наблюдается в течение  $\Delta t \sim 10$  мс после начала импакта. Изменение формы каверны вызывает сложную деформацию первоначально линейчатых структур распределения окрашенного вещества капли.

Первоначальная структура петель частично сохраняется на периферии остатка каверны (рис. 2, *e*). В момент времени  $t = 43.3$  мс (рис. 2, *f*) в значительной области по периферии растущего всплеска наблюдаются масляные лигаменты. Всплеск с гладким распределением пигмента достигает своей максимальной высоты при  $t = 66.5$  мс (рис. 2, *g*). При  $t = 111.7$  мс (рис. 2, *h*) наблюдается разрыв спадающего всплеска, при котором образуется две большие капли, окрашенные пигментом ядра.

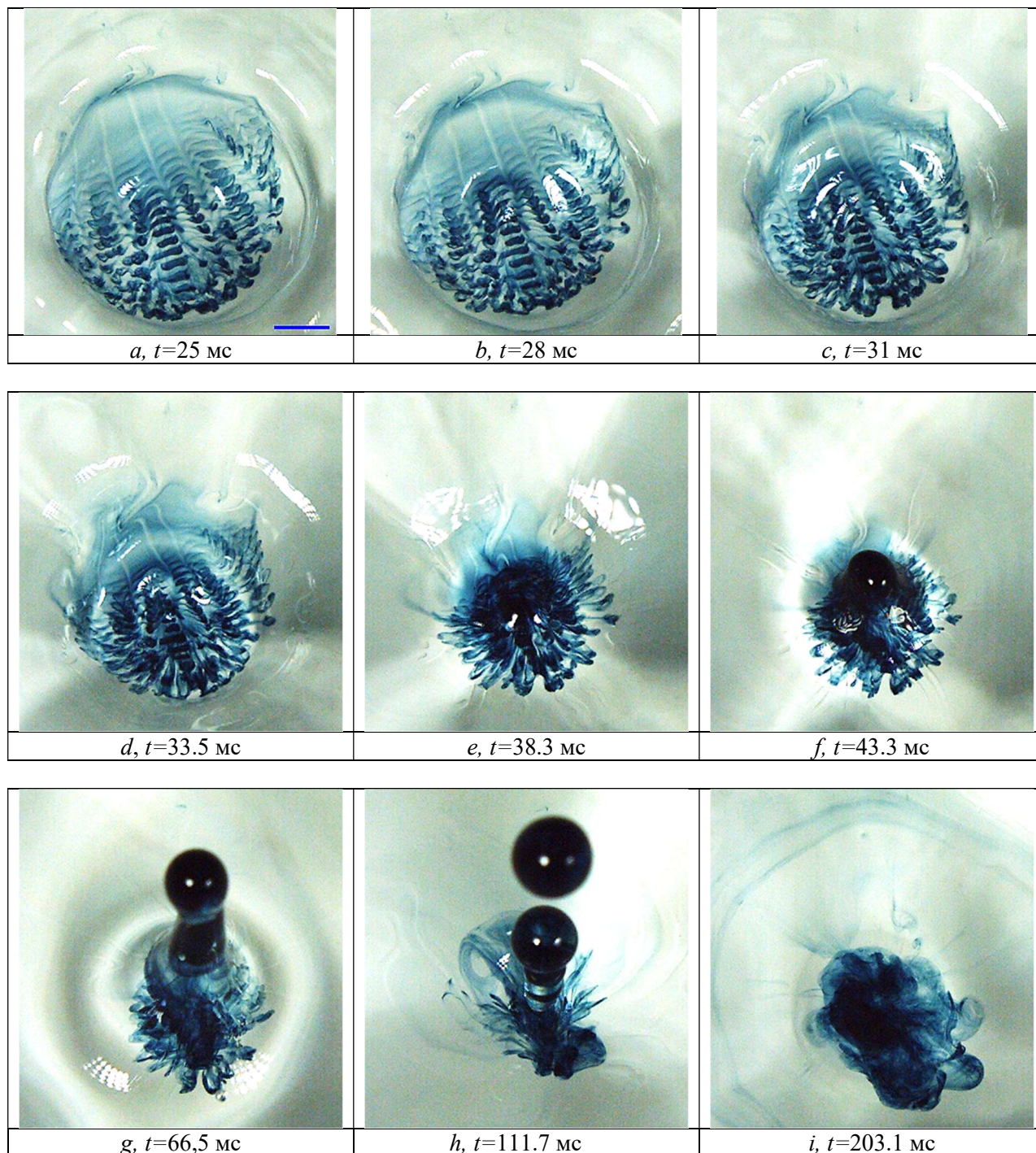


Рис. 2. Эволюция распределения вещества составной чернильно-масляной капли на этапе формирования и разрушения кумулятивной струи. Длина маркера – 4 мм. Высота падения капли  $H = 44$  см;  $D_n = 2.8$  мм;  $D_s = 5$  мм. Угол визирования –  $70^\circ$  к горизонту

Картина распределения, содержащая тонкие волокна и завитки, становится более диффузной при  $t = 203.1$  мс (рис. 2, *i*). Здесь в центре течения пигмент распределен однородно, а на периферии прослеживаются тонкие волокна. На значительном расстоянии от центра находятся два концентрических диффузных кольца из краски. Кольцевые капиллярные волны визуализируют два концентрических диффузных кольца. Капиллярные волны, которые хорошо видны в распределении освещенности на рис. 2, *g*, на рис. 2, *i* представлены двумя парными кольцевыми линиями.

Сложную трехмерную структуру, включающую волокна, кольца и петли, окрашенные пигментом каплей, иллюстрирует увеличенное изображение картины течения на рис. 3, а для определения вариаций характерных размеров петель от периферии растущего всплеска к центру проведен спектральный анализ. Окружности, вдоль которых измерялось изменение освещенности показаны на рис. 4.

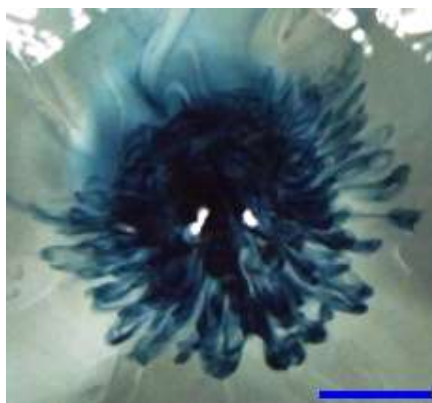


Рис. 3. Эволюция распределения вещества составной капли при  $t = 38.3$  мс. Масштабный маркер – 3 мм (контрастность, яркость и резкость – без изменений)

Перед выполнением дискретного преобразования Фурье исходное изображение было конвертировано в 8-битное, значения пикселей которого меняются в пределах  $0 \div 255$ . Далее производится инверсия изображения (более темным участкам исходного изображения соответствуют более высокие значения яркости пикселей) для соответствия абсцисс максимальных амплитуд спектра измеряемым структурам (ширинам петель). Значения флуктуаций относительной освещенности на рис. 4 были нормированы на собственные максимумы.

В пространственном спектре вариации освещенности вдоль внешнего радиуса (рис. 4, *a–c*) выделены масштабы  $\lambda = 0.63$  и  $0.95$  мм. На спектре промежуточного радиуса (рис. 4, *d–f*) имеется один выраженный пик, соответствующий характерной ширине петель  $\lambda = 0.59$  мм. В пространственном спектре на рис. 4, *g–i* выделяются характерные длины  $\lambda = 0.38$  и  $0.49$  мм. Указанные значения длин волн согласуются со значениями ширины петель, полученных посредством прямых измерений с осреднением.

### 4.3. Эволюция вещества составной капли на заключительном этапе слияния

Заключительный этап слияния чернильно-масляной капли показан на рис. 5. За время порядка  $0.5$  с вещество составной капли постепенно распределяется в принимающей жидкости. Под действием процессов диффузии полосчатые структуры расплываются. В целом картина распределения сглаживается. Однако на рис. 5, *c, d*, а также на увеличенном изображении рис. 6 прослеживается тонковолокнистая структура на масштабах, значительно меньших характерных масштабов петель, измеренных в предыдущем разделе. В картине течения начинают формироваться круглые разнонаправленные петли с выраженной тонкой структурой, увеличенное изображение которой приведено на рис. 6.



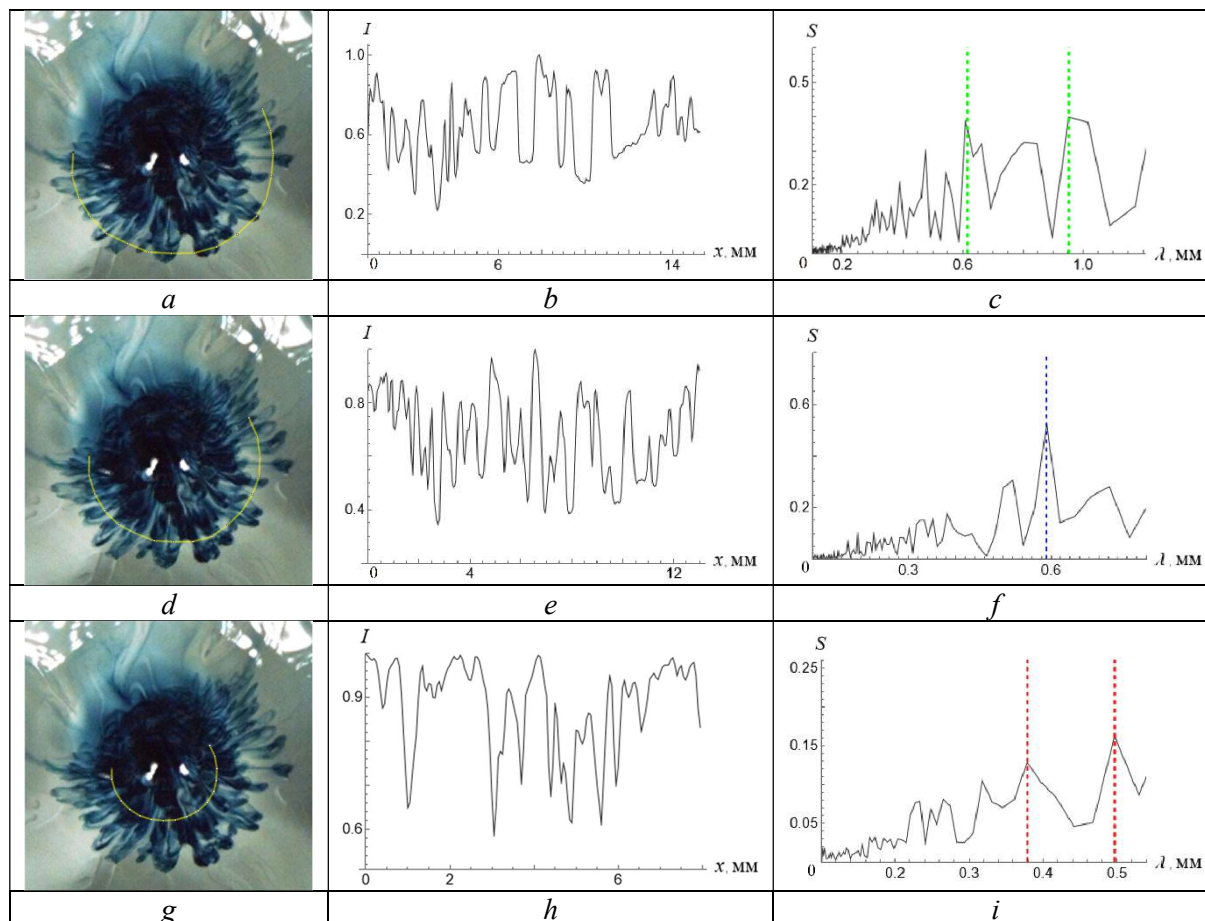


Рис. 4. Распределение вещества составной капли в воде в режиме импакта в фазе роста всплеска: *a, d, g*) – положение линий, вдоль которых проводилось сканирование при  $t = 38.3$  мс; *b, e, h* – распределение относительной освещенности вдоль дуги; *c, f, i* – пространственный спектр (цветными штриховыми линиями показаны абсциссы максимумов)

Для оценки масштабов тонких волокон было выполнено дискретное преобразование Фурье: максимальная амплитуда на спектре соответствует длине 0.19 мм (зеленая штриховая линия на рис. 7). Корректному анализу спектра на меньших масштабах мешает дробовой шум в изображении, а также ограничение пространственного разрешения фотоматрицы камеры: изображение было откалибровано так, что ширина одного пикселя составляет 0.05 мм. Поскольку прямые измерения показали, что в изображении присутствуют протяженные структуры, яркость которых меняется в размерах одного пикселя, точное измерение ширины тонких волокон затруднительно. Качественно можно указать, что их толщина варьируется в пределах  $0.01 \div 0.1$  мм.

#### 4.4. Наблюдение картины течения в боковой проекции

Эволюция картины распределения вещества ядра капли в начальном этапе слияния при  $t < 24.5$  мс приведена в [5]. Выборки видеоряда, иллюстрирующие дальнейшую перестройку структуры в боковой проекции, начиная с момента схлопывания каверны приведена на рис. 8, *a* ( $H = 50$  см,  $U = 3.1$  м/с). В стадии максимального погружения область окрашенной жидкости имеет несимметричную угловатую форму. Отличительная особенность – поперечно волокнистая структура в правой части стенки каверны. Поперечные волокна, пронизывающие стенку каверны при слиянии однородной жидкости, ранее визуализированы [20].

По мере схлопывания каверны асимметрия картины распределения пигмента ядра капли становится еще более выраженной (рис. 8, *b*). Распределение пигмента капли на стенке каверны имеет выраженный волокнистый характер. Протяженные волокна образуют вытянутые петли. Петлевая структура поперечных волокон выражена в левой части рис. 8, *b*. Темное пятно в центре рисунка – растущий всплеск.

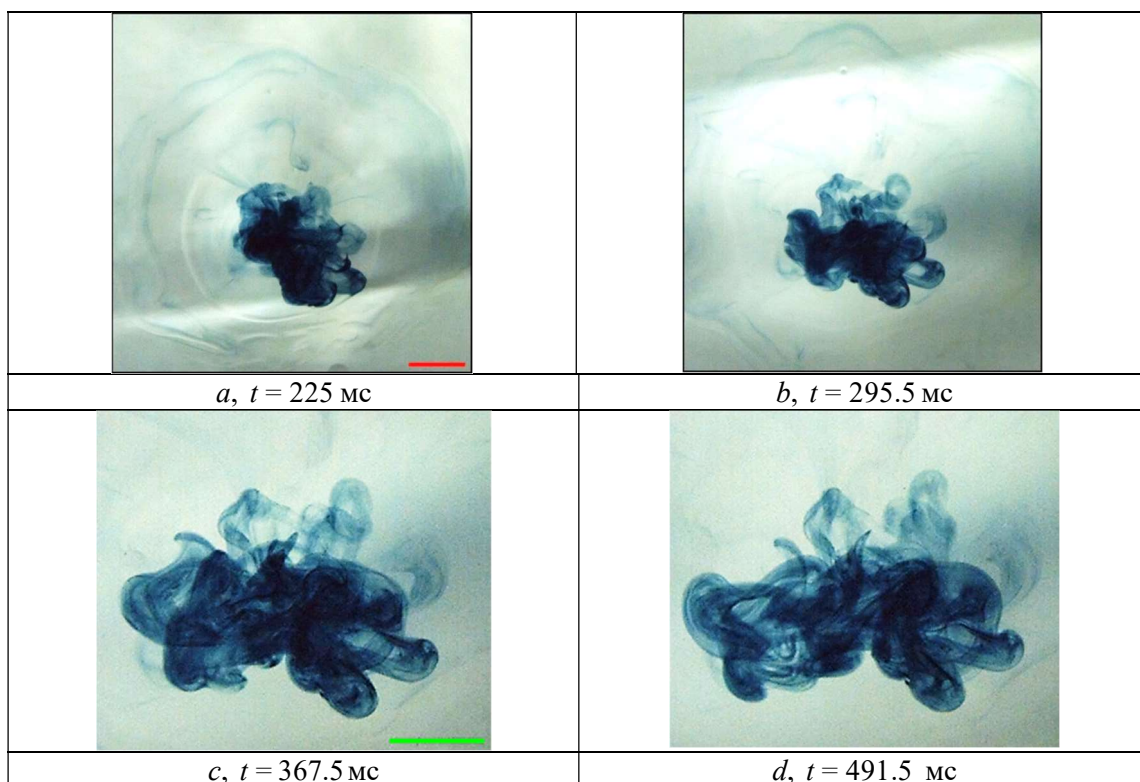


Рис. 5. Эволюция распределения вещества составной капли на позднем этапе слияния составной капли в импактном режиме. Длины маркеров – 4 мм. Высота падения капли  $H = 44$  см;  $D_n = 2.8$  мм;  $D_s = 5$  мм. Угол визирования –  $70^\circ$  к горизонтальной плоскости



Рис. 6. Эволюция распределения вещества составной капли на позднем этапе слияния составной капли в импактном режиме. Длина маркера – 1 мм

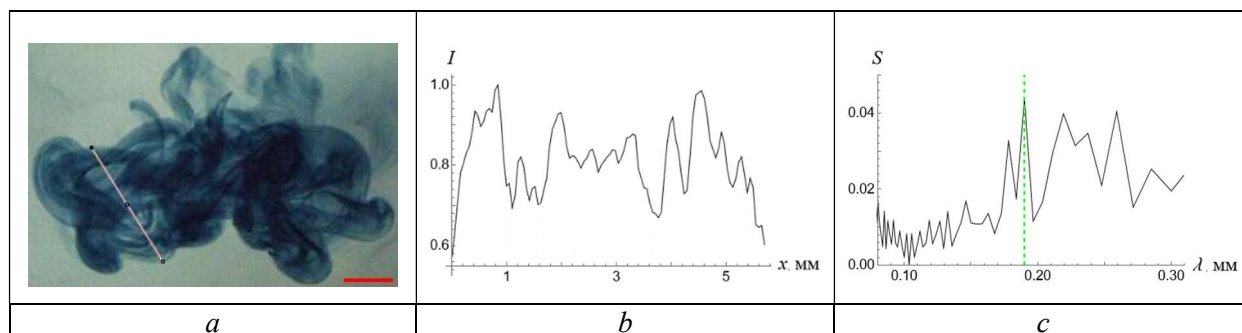


Рис. 7. Тонковолокнистая структура распределения вещества ядра составной капли на поздних этапах импакта: *a* – распределение вещества составной капли при  $t = 491.5$  мс с линией замера освещенности (масштабный маркер – 2 мм); *b* – распределение относительной освещенности; *c* – пространственный спектр



Формирующийся всплеск (рис. 8, *c*) стягивает значительную часть пигмента с поверхности каверны, которая становится частично прозрачной. Сплошное пятно остается только в центре левой части. Кольцевая структура контура всплеска указывает на существование капиллярные волн, покрывающих всю его поверхность. В толще жидкости волокна распадаются на последовательности тонких продольных и поперечных петель.

По мере роста всплеска форма его вершины меняется из заостренной в скругленную. Картина пигмента в толще жидкости еще более просветляется (рис. 8, *d*). Погружающийся всплеск разрывается, вершина остатка скругляется. По остающейся центральной части бегут капиллярные волны. В центре течения формируется новая каверна. В картине течения остаются выраженными мелкие вихорьки, принимающие кольцевую форму с коническим следом – левая половина рис. 8, *e*.

По мере погружения всплеска растет глубина и площадь каверны, в которой сосредоточена основная часть пигмента капли. На сферическом оголовке вершины всплеска наблюдаются капиллярные волны (рис. 8, *f*).

Бугристый характер кромки окрашенной жидкости указывает на существование тонких поперечных струйных течений в толще принимающей жидкости. С началом схлопывания каверны размеры неоднородности кромки окрашенной области уменьшаются (рис. 8, *g*).

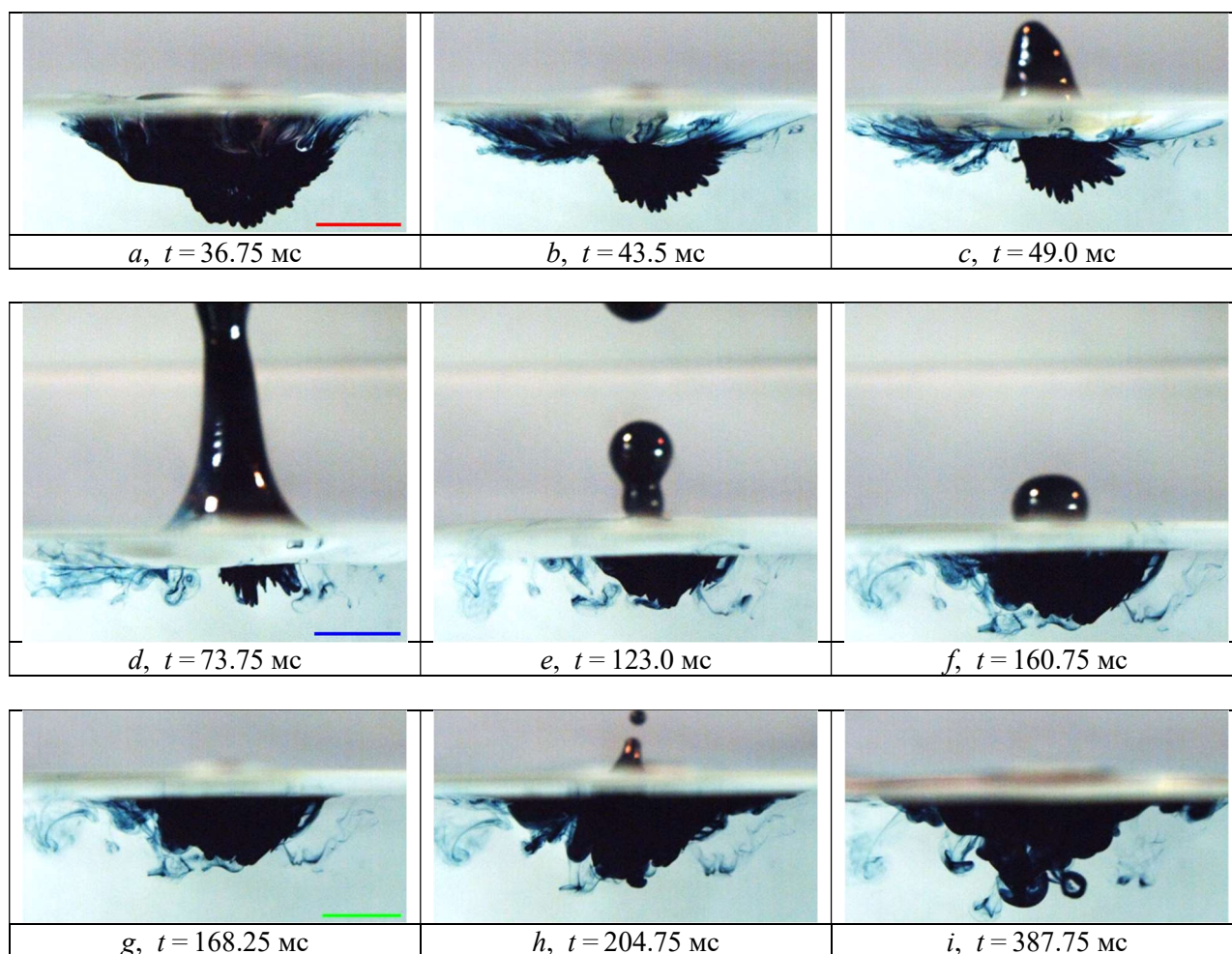


Рис. 8. Эволюция распределения вещества составной капли с центрально расположенным ядром в режиме формирования всплеска и на поздней стадии. Длины маркеров – 5 мм. Высота падения капли  $H = 50$  см (скорость контакта  $U = 3.1$  м/с);  $D_n = 2.7$  мм;  $D_s = 3.3$  мм. Угол визирования –  $0^\circ$ .  $E_k = 87$  мкДж,  $E_{n,\sigma,d} = E_\sigma^n + E_\sigma^s = 1.8$  мкДж

Формирование вторичного всплеска, с вершины которого выбрасываются вторичные мелкие капельки (рис. 8, *h*), сопровождается увеличением окрашенной области в толще жидкости. В дальнейшей эволюции течения выражена общая деформация области окрашенной жидкости и образование отдельных кольцевых вихрей, покидающих область слияния капли (рис. 8, *i*). Проведенная визуализация показывает, что в картине течения выражены как крупные структурные компоненты (каверны, всплеск, вторичные капли), так и тонкие струи с вихревыми оголовками, оставляющие характерные волокнистые следы в принимающей жидкости.

## 5. Обсуждение результатов

Проведенные опыты с регистрацией растекания составных капель показали, что в картине течения выражены как традиционные крупномасштабные компоненты – каверна, венец, всплеск, кольцевые капиллярные волны, так и тонкоструктурные компоненты, искажающие симметрию картины слияния чернильного ядра. Наблюдения показали, что распределение пигмента составной капли на всех этапах течения характеризуется тонкой волокнистой структурой. Минимальные размеры толщин волокон лежат на границе разрешения техники регистрации. Проведенный спектральный анализ показал, что характерные толщины волокон в петлях убывают от периферии к центру.

Распад течения на последовательности регулярных волокон и сохранение волокнистой структуры на всех этапах эволюции течения указывает на необходимость более детального анализа свойств решений фундаментальных уравнений, выделения и оценку свойств сингулярных компонентов [7, 21].

## 6. Заключение

Проведена визуализация картины распределения пигмента окрашенного ядра – раствора чернил, в масляной оболочке составной капли в импактном режиме, в котором кинетическая энергия капли заметно больше потенциальной поверхностной энергии капли. На всех этапах эволюции и во фронтальной, и в боковой проекции наблюдается волокнистое распределение пигмента. Симметрия картины перестраивается в процессе эволюции течения.

## Благодарности и ссылки на гранты

Работа выполнена на стенде ТБП, входящим в комплекс УИУ «ГФК ИПМех РАН» в Лаборатории механики жидкостей ИПМех РАН при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Госзадания, номер госрегистрации: 124012500442-3.

## Литература

1. Ильиных А. Ю. Волны и пузыри импакта капли // Известия РАН. Серия физическая. 2023. Т. 87, № 1. С. 99–104. DOI: 10.31857/S0367676522700181
2. Ray B., Biswas G., Sharma A. Regimes during liquid drop impact on a liquid pool. *Journal of Fluid Mechanics*. 2015. Vol. 768. Pp. 492–523. doi:10.1017/jfm.2015.108
3. Chashechkin Y. D., Il'inykh A. Y., Khairbekov S. K. The Initial Stage of the Coalescence of a Compound Drop in an Impact Regime // *Fluid Dyn*. 2024. Vol. 59. Pp. 202–218. DOI: 10.1134/S0015462824600226
4. Mohasan M., Aqeel A. B., Lv P., Yang Y., Duan H. Cavity dynamics of water drop impact onto immiscible oil pool with different viscosity // *Acta Mechanica Sinica*. 2021. Vol. 37. No. 3. Pp. 447–455. DOI:10.1007/s10409-020-01032-4
5. Castillo-Orozco E, Davanlou A., Choudhury P.K., Kumar R. Droplet impact on deep liquid pools: Rayleigh jet to formation of secondary droplets // *Phys. Rev*. 2015. E92, 053022. DOI:10.1103/PhysRevE.92.053022

6. Чашечкин Ю. Д., Ильиных А. Ю. Разрыв спадающего всплеска – динамического следа слияния свободно падающей капли с покоящейся принимающей жидкостью // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. 2022. Т. 505, № 1, стр. 50–58.  
DOI: 10.31857/S268674002203004X
7. Чашечкин Ю. Д. Пакеты капиллярных и акустических волн импакта капли // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естеств. науки. 2021. № 1. С. 73–92.
8. Josserand C, Ray P, Zaleski S. Droplet impact on a thin liquid film: anatomy of the splash // *Journal of Fluid Mechanics*. 2016. Vol. 802. Pp. 775–805. doi:10.1017/jfm.2016.468
9. Fudge B. D., Cimpanu R., Castrejón-Pita A. A. Dipping into a new pool: The interface dynamics of drops impacting onto a different liquid // *Phys Rev E*. 2021. Vol. 104 (6-2): 065102.  
DOI: 10.1103/PhysRevE.104.065102
10. Xiaoyun Peng, Tianyou Wang, Kai Sun, Zhizhao Che. Droplet splashing during the impact on liquid pools of shear-thinning fluids with yield stress // *Physics of Fluids*. 2021. Vol. 33. No. 11. 112106.  
DOI: 10.1063/5.0068234
11. Saushin I. Splashing criterion when drop impacting on the liquid with liquid film // *E3S Web of Conferences*. 2023. vol. 389, 01034. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338901034>
12. Rajendran S., Jog M. A., Manglik R. M. Predicting splash of a drop impacting a thin liquid film // *Langmuir*. 2023. Vol. 39 (41). Pp. 14764–14773. DOI: 10.1021/acs.langmuir.3c02185
13. Blanken N., Saleem M.S., Thoraval M.-J., Antonini C. Impact of compound drops: a perspective // *Current Opinion in Colloid & Interface Science*. 2020. Vol. 51, 101389.  
<https://doi.org/10.1016/j.cocis.2020.09.002>
14. Wang L., Thoraval M.-J. Air-in-liquid compound drop impact onto a pool // *Phys. Fluids*. 2022. vol. 34. pp. 102101. DOI: 10.1063/5.0086745
15. Sapei L., Naqvi M. A., Rousseau D. Stability and release properties of double emulsions for food applications // *Food Hydrocolloids*. 2012. Vol. 27(2). Pp. 316–323. DOI:10.1016/j.foodhyd.2011.10.008
16. Kan H. C., Udaykumar H. S., Shyy W., Tran-Son-Tay R. Hydrodynamics of a compound drop with application to leukocyte modeling // *Phys. Fluids*. 1998. Vol. 10(4). Pp. 760–774. DOI:10.1063/1.869601
17. Kim D., Lee J., Bose A., Kim I., Lee J. The impact of an oil droplet on an oil layer on water // *J. Fluid Mech*. 2020. Vol. 906. <https://doi.org/10.1017/jfm.2020.791>
18. 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>
19. Чашечкин Ю. Д., Ильиных А. Ю., Хайирбеков Ш. Х. Тонкая структура распределения вещества составной капли в принимающей жидкости в режиме формирования всплеска // *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*. 2023. Т.24, вып. 5. <http://doi.org/10.33257/PhChGD.24.5.1073>
20. Chashechkin Y. D., Il'inykh A. Y. Fine flow structure at the miscible fluids contact domain boundary in the impact mode of free-falling drop coalescence // *Fluids*. 2023. Vol. 8, no. 10. Pp. 269.  
DOI: 10.3390/fluids8100269
21. Chashechkin Y. D. Foundations of engineering mathematics applied for fluid flows // *Axioms*. 2021. Vol. 10. No. 4. Pp. 286. <https://doi.org/10.3390/axioms10040286>

## References

1. Il'inykh A. Yu., Waves and bubbles of the impact of a drop, *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2023, vol. 87, no. 1, pp. 99–104 [in Russian]. DOI: 10.31857/S0367676522700181
2. Ray B., Biswas G., Sharma A., Regimes during liquid drop impact on a liquid pool, *Journal of Fluid Mechanics*, 2015, vol. 768, pp. 492–523. DOI:10.1017/jfm.2015.108
3. Chashechkin Y. D., Il'inykh A. Y., Khairbekov S. K., The Initial Stage of the Coalescence of a Compound Drop in an Impact Regime, *Fluid Dyn.*, 2024, vol. 59, pp. 202–218.  
DOI: 10.1134/S0015462824600226



4. Mohasan M., Aqeel A. B., Lv P., Yang Y., Duan H., Cavity dynamics of water drop impact onto immiscible oil pool with different viscosity, *Acta Mechanica Sinica*, 2021, vol. 37, no. 3, pp. 447–455. DOI:10.1007/s10409-020-01032-4
5. Castillo-Orozco E., Davanlou A., Choudhury P. K., Kumar R., Droplet impact on deep liquid pools: Rayleigh jet to formation of secondary droplets, *Phys. Rev.*, 2015, E92, 053022. Doi:10.1103/PhysRevE.92.053022
6. Chashechkin Yu. D., Ilyinykh A. Yu., Rupture of a falling splash – a dynamic trace of the fusion of a freely falling drop with a stationary receiving liquid, *Doklady Physics*, 2022, vol. 505, no. 1, pp. 50–58. DOI: 10.31857/S268674002203004X
7. Chashechkin Yu. D., Packets of capillary and acoustic waves of drop impact, *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2021, no. 1, pp. 73–92 [in Russian]. DOI: 10.18698/1812-3368-2021-1-73-91
8. Jossierand C, Ray P, Zaleski S., Droplet impact on a thin liquid film: anatomy of the splash, *Journal of Fluid Mechanics*, 2016, vol. 802, pp. 775-805. doi:10.1017/jfm.2016.468
9. Fudge B. D., Cimpeanu R., Castrejón-Pita A. A., Dipping into a new pool: The interface dynamics of drops impacting onto a different liquid, *Phys Rev E*, 2021, vol. 104 (6-2): 065102. DOI: 10.1103/PhysRevE.104.065102
10. Xiaoyun Peng, Tianyou Wang, Kai Sun, Zhizhao Che, Droplet splashing during the impact on liquid pools of shear-thinning fluids with yield stress, *Physics of Fluids*, 2021, vol. 33, no. 11: 112106. DOI: 10.1063/5.0068234
11. Saushin I., Splashing criterion when drop impacting on the liquid with liquid film, *E3S Web of Conferences*, 2023, vol. 389, 01034. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338901034>
12. Rajendran S., Jog M. A., Manglik R. M. Predicting splash of a drop impacting a thin liquid film, *Langmuir*, 2023, vol. 39, no. 41, pp. 14764–14773. DOI: 10.1021/acs.langmuir.3c02185
13. Blanken N., Saleem M. S., Thoraval M.-J., Antonini C., Impact of compound drops: a perspective, *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 2020, vol. 51, 101389. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2020.09.002>
14. Wang L., Thoraval M.-J., Air-in-liquid compound drop impact onto a pool, *Phys. Fluids*, 2022, vol. 34, pp. 102101. DOI: 10.1063/5.0086745
15. Sapei L., Naqvi M.A., Rousseau D., Stability and release properties of double emulsions for food applications, *Food Hydrocolloids*, 2012, vol. 27, no. 2, pp. 316–323. DOI:10.1016/j.foodhyd.2011.10.008
16. Kan H. C., Udaykumar H. S, Shyy W., Tran-Son-Tay R., Hydrodynamics of a compound drop with application to leukocyte modeling, *Phys. Fluids*, 1998, vol. 10(4), pp. 760–774. DOI:10.1063/1.869601
17. Kim D., Lee J., Bose A., Kim I., Lee J., The impact of an oil droplet on an oil layer on water, *J. Fluid Mech.*, 2020, vol. 906. DOI: <https://doi.org/10.1017/jfm.2020.791>
18. Hydrophysical complex for modeling hydrodynamic processes in the environment and their impact on underwater technical objects, as well as the distribution of impurities in the ocean and atmosphere, Institute for Problems in Mechanics RAS. Available online: <http://ipmnet.ru/uniquequip/gfk> (accessed on 15 June 2023)
19. Chashechkin Y., Ilyinykh A., Khairbekov S., Fine Structure of the Compound Drop Substance Distribution in the Target Fluid in the Splash Formation Mode, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2023, vol.24, iss. 5. <http://doi.org/10.33257/PhChGD.24.5.1073>
20. Chashechkin Y. D., Ilyinykh A. Y., Fine flow structure at the miscible fluids contact domain boundary in the impact mode of free-falling drop coalescence, *Fluids*, 2023, vol. 8, no. 10, p. 269. DOI: 10.3390/fluids8100269
21. Chashechkin Y. D., Foundations of engineering mathematics applied for fluid flows, *Axioms*, 2021, vol. 10, no. 4, p. 286. <https://doi.org/10.3390/axioms10040286>

Статья поступила в редакцию 2 августа 2024 г.